

Considerações de interesse sobre a avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio: contribuições à revisão da NBR 5628:2001

Considerations of interest about the laboratory evaluation of structural elements in fire: contributions for the revision of the NBR 5628:2001

Armando Lopes Moreno Junior
Júlio Cesar Molina

Resumo

Existe um crescente interesse sobre a pesquisa sobre a segurança das estruturas em situação de incêndio no Brasil, mas ainda existem aspectos que carecem de discussão. A simulação e avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio é um desses aspectos, principalmente no que diz respeito à metodologia de ensaio. A norma técnica brasileira NBR 5628:2001 necessita de revisão com vistas à adaptação das metodologias internacionais à realidade brasileira ou, até mesmo, à definição de novas metodologias que considerem variáveis relevantes para o contexto local. Este trabalho apresenta um ponto de partida para essas discussões e reúne os parâmetros que norteiam os procedimentos metodológicos para a avaliação de elementos estruturais, em escala natural, com carga, e em situação de incêndio. Parâmetros de interesse como dimensões mínimas dos elementos, taxas de elevação de temperatura com o tempo, infraestrutura para o ensaio, instrumentação dos elementos estruturais, entre outros, são avaliados à luz da normalização nacional e internacional vigente. Espera-se que este trabalho forneça subsídios para a futura revisão da NBR 5628:2001 e estimule pesquisadores brasileiros a ingressar nessa nova e árdua linha de pesquisa.

Palavras-chave: Incêndio. Metodologia. Ensaio. Laboratório. Estruturas.

Abstract

There is a growing interest on the research on the structural safety under fire in Brazil, but some aspects that still need discussion. The simulation and laboratory evaluation of structural elements under a fire situation is one of those aspects, especially regarding the testing methodology. The Brazilian standard NBR 5628:2001 needs to be reviewed in order to adapt international methodologies to our reality or even to establish new methodologies, considering variables that are relevant in the local context. This paper provides a starting point for those discussions, by gathering the parameters that that guide the methodological procedures for the evaluation of structural elements in natural scale, under load, and in a fire situation. Relevant parameters, such as the minimum dimensions of the elements to be tested, rates of temperature rise with time, infrastructure for tests, instrumentation of the structural elements, among others, have been evaluated based on current national and international standardization. It is hoped that this work will make contributions for the future revision of the NBR 5628:2001 standard, and encourage Brazilian researchers to join this new and arduous research theme.

Keywords: Fire situation. Methodology. Test. Laboratory. Structures.

Armando Lopes Moreno Junior
Departamento de Estruturas,
Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo
Universidade Estadual de Campinas
Avenida Albert Einstein 951, Cidade
Universitária Zeferino Vaz, Distrito de
Barão Geraldo, Barão Geraldo
Campinas - SP - Brasil
Caixa-postal 6021
CEP 13083-852
Tel.: (19) 3521-2363 Ramal 12363
E-mail: almoreno@fec.unicamp.br

Júlio César Molina
Departamento de Estruturas, Escola
de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo
Avenida Trabalhador São-carlense,
400, Centro
Sao Carlos - SP - Brasil
CEP 13560-970
Tel.: (16) 3373-8227
E-mail:
juliocesarmolina@yahoo.com.br

Recebido em 04/07/12
Aceito em 04/12/12

Introdução

Em muitas situações o projetista pode encontrar dificuldades em simular analítica ou numericamente o comportamento de um elemento estrutural em situação de incêndio. Essas dificuldades podem ser devidas à existência de materiais que não têm definidas, com exatidão, suas propriedades térmicas ou, até mesmo, pela alteração dessas propriedades térmicas quando em trabalho conjunto com outros materiais. Nesses casos, o caminho está na investigação do comportamento do elemento estrutural em laboratório, que corresponde à “análise experimental” do problema.

A análise experimental na linha de pesquisa de segurança contra incêndios pode ser uma ferramenta poderosa na busca de respostas do comportamento de elementos estruturais. Ela pode ajustar parâmetros de interesse à modelagem numérica ou, até mesmo, definir, isoladamente, a resistência ao fogo do elemento estrutural analisado. A “resistência ao fogo” é definida como a capacidade de um elemento estrutural permanecer durante um tempo determinado exercendo as funções para as quais foi projetado, sob a ação de incêndio. Portanto, um ensaio em laboratório para a simulação de incêndio é um meio de avaliar se um elemento estrutural obedece a parâmetros limites de comportamento, estabelecidos por normas técnicas de caráter legislativo nacional e/ou internacional.

No Brasil, esses ensaios são regidos pelas normas NBR 10636 (ABNT, 1989) Paredes divisórias sem função estrutural: determinação da resistência ao fogo: método de ensaio, pela NBR 5628 (ABNT, 2001a) Componentes construtivos estruturais: determinação da resistência ao fogo e pela NBR 14432 (ABNT, 2001b) Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações: procedimento.

Internacionalmente, as normas mais antigas, de maior aceitação pelo meio técnico/científico, que são empregadas na parametrização de procedimentos para a avaliação de elementos estruturais em situação de incêndio são a ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999) *Fire Resistance tests: elements of building construction* e a ASTM E119 (AMERICAN..., 2000) *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*. Na América do Norte a norma mais utilizada é a ASTM E119 (AMERICAN..., 2000). Na Europa e Ásia, a ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999) é a mais utilizada. Países como o Japão, Austrália e Nova Zelândia têm suas próprias normas técnicas.

São também utilizadas, em menor escala, normas técnicas europeias: EN 1363-1 (EUROPEAN..., 2012a) *Fire resistance tests: general requirements*, EN 1365-1 (EUROPEAN..., 2012b) *Fire resistance tests for loadbearing elements: part 1: walls* e EN 1365-2 (EUROPEAN..., 2000) *Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 2: Floors and roofs*.

Os parâmetros básicos que norteiam a maioria dessas normas, tanto nacionais quanto internacionais, foram discutidos e desenvolvidos no início do século XX. Excetuando-se pequenas revisões ao longo desse período, pode-se afirmar que a metodologia de avaliação sugerida para os ensaios ainda é, essencialmente, a mesma daquela época.

Este trabalho, da mesma forma que Cazeli *et al.* (2001), Silva (2002), Silva e Velarde (2010) ou Silva (2011), no que diz respeito a outras normas da área de incêndio nacionais, tem o objetivo de iniciar essas discussões com vistas à atualização da normalização nacional sobre avaliação de elementos estruturais em situação de incêndio, em laboratório. Uma análise de cada aspecto de interesse na discussão de procedimentos normativos para a avaliação da resistência ao fogo de elementos estruturais é apresentada. Parâmetros como dimensões mínimas dos elementos para o ensaio, taxas de elevação da temperatura com o tempo, infraestrutura para o ensaio, instrumentação dos elementos estruturais, limites específicos de resistência ao fogo, entre outros, são avaliados à luz da normalização nacional e internacional em vigor. Ao final, espera-se que este trabalho forneça subsídios para a futura revisão da norma NBR 5628 (ABNT, 2001a) e estimule futuros pesquisadores brasileiros a ingressarem nessa nova e árdua linha de pesquisa sobre segurança das estruturas em situação de incêndio.

Incêndio-padrão

A típica representação de um incêndio real em termos da elevação da temperatura com o tempo é apresentada na Figura 1, na qual podem ser observadas três fases distintas do incêndio. Na primeira fase o incêndio inicia-se e o incremento da temperatura com o tempo é bem pequeno. Na segunda fase, de inflamação generalizada, as temperaturas crescem rapidamente, alcançando extremos bastante elevados e, uma vez desenvolvido e sem intervenções, o incêndio continuará até que todo o material combustível existente no ambiente seja consumido. A terceira

fase caracteriza-se pelo resfriamento, com diminuição gradual da temperatura com o tempo.

Cada incêndio é único e caracterizado por parâmetros próprios. Sendo assim, a curva mostrada na Figura 1 apresenta infinitas variações em termos de duração de cada fase, temperaturas máximas alcançadas e tempo total de duração do incêndio. Simular esse comportamento envolve o conhecimento, entre tantos outros, de fatores como dimensões e características físicas do ambiente, características térmicas e mecânicas do material combustível, aberturas de ventilação do ambiente e medidas existentes de combate a incêndio.

Na análise em laboratório, a padronização dos procedimentos de ensaio é necessária. Testes semelhantes, realizados em diferentes laboratórios e por diferentes pesquisadores, só poderão ter resultados comparados quando regidos por procedimentos de ensaio idênticos. Para tanto, no início do século XX foi sugerida a padronização da evolução da temperatura com o tempo, durante um incêndio, para fins de testes laboratoriais, conforme apresentado na Figura 2.

A mais difundida dessas tentativas de padronização internacional, que também é adotada no Brasil, é a curva recomendada pela norma ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999), que relaciona a elevação da temperatura com o tempo de incêndio para materiais celulósicos. A norma americana, ASTM E119 (AMERICAN..., 2000), especifica uma curva padronizada para materiais celulósicos que é ligeiramente diferente da recomendada pela ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999). Nessas curvas padronizadas, as fases correspondentes às etapas de pré-ignição e de resfriamento não têm representação. Nelas, a relação da elevação da

temperatura com o tempo é sempre ascendente, com taxas de elevação diferenciadas ao longo do tempo.

Logicamente, são muitas as diferenças entre as curvas padronizadas e as curvas representativas de um incêndio real. Padronizar um incêndio não é tarefa fácil. Existem implicações tanto de segurança quanto econômicas envolvidas nessa tarefa.

Alguns aspectos da curva-padrão merecem uma discussão mais apurada em futuras revisões da NBR 5628 (ABNT, 2001a), principalmente no que diz respeito à eliminação da fase de resfriamento existente em todo incêndio real. É nessa fase que alguns materiais estruturais podem recuperar parte de sua resistência mecânica e rigidez, perdidas durante a fase anterior, e mais crítica do incêndio real. A citada provável recuperação de resistência de alguns elementos estruturais pode contribuir em muito no adiamento de eventual ruína do elemento incendiado. Nesse caso, a opção por um padrão similar ao estabelecido pela ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999) ou ASTM E119 (AMERICAN..., 2000), onde a fase de resfriamento não é considerada, não simularia, em laboratório, o real comportamento do elemento estrutural analisado em situação de incêndio (BEYLER *et al.*, 2007; NATIONAL..., 2006).

Como exemplo, cita-se o trabalho de Kodur e Fike (2008), em que um pilar que teve sua resistência ao fogo estabelecida em 2 h, em laboratório, e sob incêndio padronizado pela ASTM E119 (AMERICAN..., 2000), resistiu até o final de um incêndio natural simulado com inclusão da etapa de resfriamento.

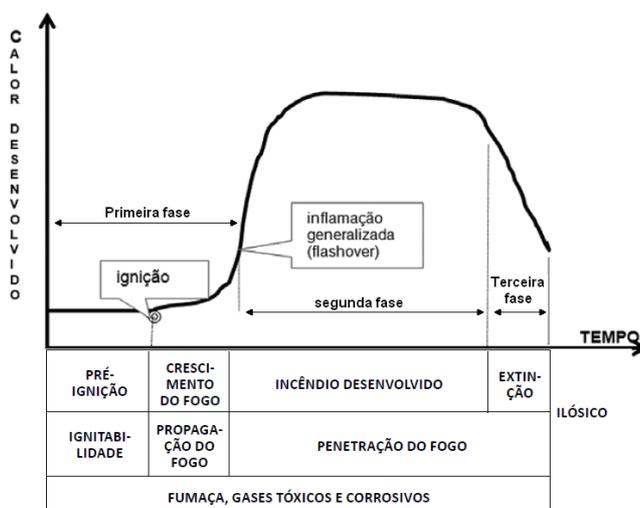


Figura 1 - Curva de evolução do incêndio celulósico

Fonte: Seito *et al.* (2008).

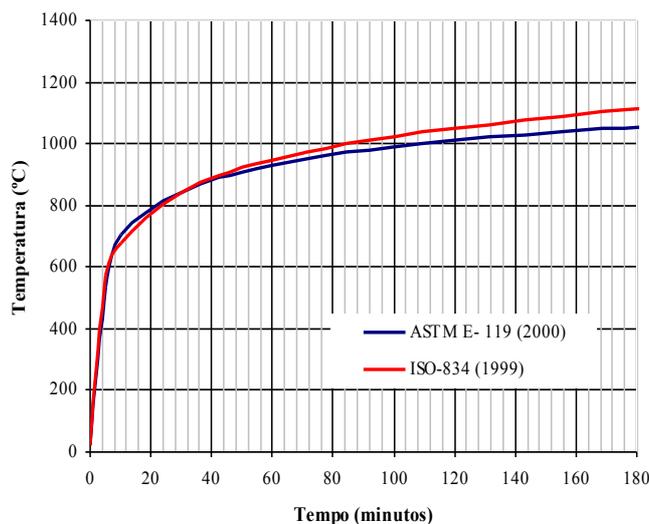


Figura 2 - Curvas de “incêndio-padrão”

Atualmente, existem excelentes modelos matemáticos simplificados para a simulação de um incêndio real através da geração de curvas paramétricas. A correta simulação da evolução de temperatura com o tempo envolve desde o conhecimento do comportamento dos materiais ao fogo (composição química, forma física, área superficial exposta, inércia térmica, etc.) até fatores intrínsecos ao ambiente onde esses materiais estão inseridos (tipo de uso da edificação, ventilação, elementos de compartimentação, etc.).

As curvas de evolução da temperatura com o tempo geradas através desses modelos matemáticos simplificados podem ser denominadas como “incêndios de projeto”. Algumas dessas curvas de “incêndios de projeto” poderiam ser incorporadas às normas técnicas que tratam da avaliação da resistência ao fogo de elementos estruturais em laboratório.

Na Figura 3 são ilustradas cinco curvas de “incêndios de projeto”, sendo duas dessas curvas obtidas por recomendação da ASTM (AMERICAN..., 2000). Uma das curvas de incêndio-padrão, neste caso, é a correspondente ao incêndio em materiais celulósicos (AMERICAN..., 2000) e a outra é a correspondente ao incêndio com hidrocarbonetos ASTM E1529 (AMERICAN..., 2010).

As curvas de “incêndio de projeto”, ilustradas na Figura 3, diferem entre si pela intensidade considerada. Um incêndio caracterizado como de pequena intensidade seria o especificado pela curva FV04-200, corresponde ao modelo matemático de incêndio gerado para um fator de ventilação igual a 0,04 e carga de incêndio

específica de 200 MJ/m². Outra dessas curvas representa a evolução da temperatura com o tempo de um incêndio dito como severo, curva FV08-800, para um fator de ventilação de 0,08 e carga de incêndio específica de 800 MJ/m². Uma terceira curva é o resultado do modelo matemático para um incêndio de projeto caracterizado como de média intensidade, para um fator de ventilação de 0,12 e carga de incêndio específica de 900 MJ/m².

Parece atual, portanto, a necessidade de discussões em termos da avaliação da conveniência em adotarem-se “incêndios de projeto” na forma de curvas em futura revisão da NBR 5628 (ABNT, 2001a), com especificação de um limitado número de “incêndios de projeto”. Essas curvas representariam, de maneira mais realística, a evolução de temperatura com o tempo que acontece em um incêndio real, servindo como alternativa à padronização atual. Modelos probabilísticos são disponibilizados pelo *Joint Committee on Structural Safety* (2001).

É válido observar que existem, atualmente, diversos programas computacionais específicos para a simulação de um incêndio real com boa precisão. O *Fire Dynamic Simulation* (FDS) e o *SmartFire* são exemplos desses programas de simulação computacional.

Intensidade de carregamento

A avaliação em laboratório de elementos estruturais isolados em escala natural (paredes, lajes, vigas e pilares), em situação de incêndio, tem por finalidade a determinação da capacidade desse elemento estrutural, carregado, permanecer durante um tempo determinado exercendo as funções para as quais foi projetado. Esse conceito, já comentado

neste artigo, aplica-se também a materiais isolados e é conhecido como “resistência ao fogo”. Neste caso, são válidas algumas observações em relação à intensidade de carga aplicada durante o ensaio, uma vez que a resistência ao fogo para um elemento estrutural é significativamente influenciada pela magnitude desse carregamento (Figura 4).

Na Figura 4 apresenta-se a evolução da resistência ao fogo, em minutos, em função da intensidade de carregamento aplicado para pilares tubulares de aço preenchidos com concreto. Observa-se, neste caso, que a intensidade do carregamento é inversamente proporcional à resistência ao fogo do

elemento estrutural, para qualquer tipo de concreto de preenchimento (LEITE JUNIOR *et al.*, 2010; SANTANA; MORENO JUNIOR, 2011). Foi comprovada, portanto, a influência da intensidade do carregamento nas propriedades mecânicas de alguns materiais quando aquecidos. Exemplo desse comportamento diferenciado, em função da intensidade de carga, é a evolução do decréscimo da resistência do concreto com a temperatura (KHOURY, 1992). Esse decréscimo, quando avaliado em corpos de prova aquecidos sob carga é substancialmente alterado quando comparado com os mesmos corpos de prova aquecidos sem carga alguma (Figura 5).

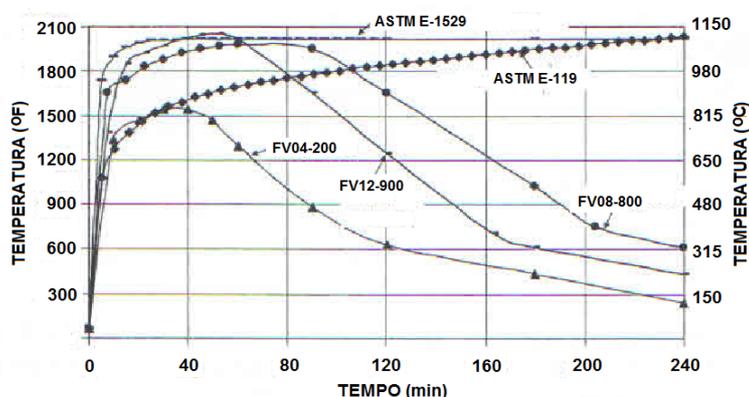


Figura 3 - Curvas de “incêndio de projeto”

Fonte: adaptado de Kodur e Fike (2008).

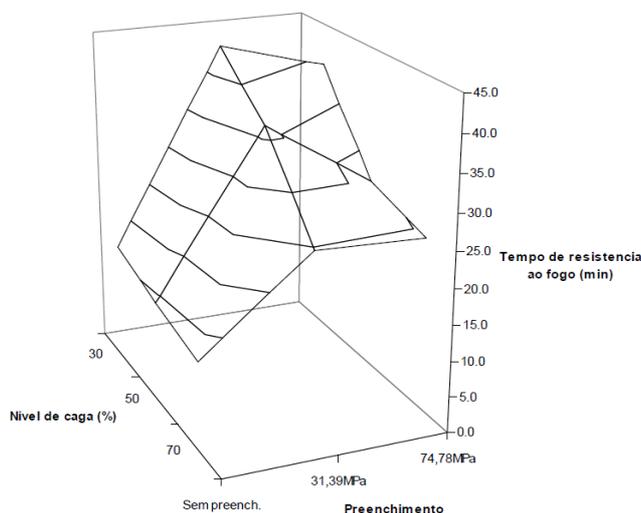


Figura 4 - Tempo de resistência ao fogo em função da intensidade de carregamento

Fonte: Santana e Moreno Junior. (2011).

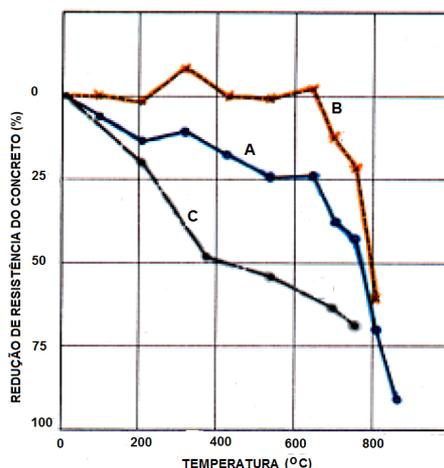


Figura 5 - Influência do histórico de carregamento na redução da resistência à compressão do concreto
Fonte: Khoury (1992).

Khoury (1992) realizou um estudo sobre a influência do efeito de carga e do aquecimento na resistência do concreto. Nesse estudo, conforme apresentado na Figura 5, observou-se que o concreto aquecido sob carga e ensaiado a quente (A) conserva uma fração maior da resistência do que o mesmo concreto aquecido sem carga e ensaiado depois de ter sido resfriado (C). O concreto aquecido sem carga porém ensaiado a quente apresentou valores intermediários em relação aos outros dois procedimentos de ensaio (B). O ensaio correspondente ao caso (A) foi realizado com carregamento igual a 40% da tensão do concreto em temperatura ambiente. O ensaio realizado para o caso (C) foi feito após a idade de 7 dias, conservada a temperatura de 21 °C.

No caso específico do concreto, a influência da intensidade do carregamento em sua resistência à compressão, em situação de incêndio, é considerada na maioria das normas técnicas internacionais (Figura 6). Nacionalmente, essa inclusão deve ser discutida em futuras revisões das normas técnicas brasileiras.

Quanto à verificação da estabilidade do elemento estrutural durante o ensaio de resistência ao fogo e, conseqüentemente, da intensidade do carregamento a ser aplicado, observa-se que a maioria das normas técnicas recomenda a aplicação de carregamentos tidos como de serviço. No entanto, carregamentos de serviço podem não refletir convenientemente os níveis de carga que acontecem em uma estrutura durante um incêndio.

Recentes estudos demonstraram que o nível de carregamento durante um incêndio real pode ser bem mais reduzido (ELLINGWOOD, 2005).

O incêndio é um evento de ocorrência rara, e nem todos os carregamentos, em suas totais

intensidades, atuarão na estrutura ao mesmo tempo. Além disso, a maioria das ações é variável com o tempo e a análise torna-se bastante complexa se a estrutura, ou elemento estrutural, for sujeita a mais de uma variável no tempo.

Neste contexto, a primeira hipótese a ser considerada é que duas ações independentes dificilmente atingirão suas amplitudes máximas no mesmo instante. O modelo mais simples para realizar essa análise baseia-se na regra de Turkstra (1972). Ainda dentro desse contexto um processo mais exato baseia-se no modelo de Ferry Borges-Castanheta (1971), que é gerado por uma sequência de variáveis aleatórias igualmente distribuídas e independentes, cada uma atuando ao longo de um intervalo de tempo de duração determinística (NEVES; CRUZ, 2001).

A norma ASCE-07 2005 especifica um carregamento de $1,2 g + 0,5 q$, que corresponde a um nível de carregamento equivalente a 40% daquele adotado para o dimensionamento da estrutura em temperatura ambiente.

Como sugestão, para uma futura revisão da norma brasileira NBR 5628 (ABNT, 2001a), seria viável a especificação da carga equivalente àquela das combinações excepcionais, a mesma utilizada no projeto do mesmo elemento estrutural em situação de incêndio, conforme NBR 8681 (ABNT, 2001c) (Equação 1).

$$1,2 g + \psi 2 q \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

“g” são os carregamentos permanentes;

“q” os variáveis; e

$\psi 2$ um coeficiente de redução para as ações variáveis diretas.

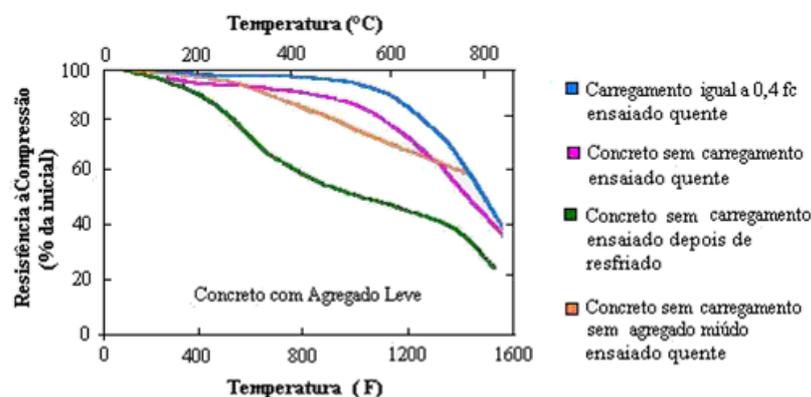


Figura 6 - Influência da intensidade de carga na resistência à compressão do concreto

Fonte: ACI-TMS 216.1 (AMERICAN..., 2007).

Critérios limites de resistência ao fogo

Um elemento estrutural em uma edificação pode ser projetado não só para manter-se distante do colapso estrutural durante um incêndio, mas também para exercer a função de conter chamas ou de isolar ambientes, impedindo que o fogo propague-se de um ambiente a outro da edificação. As lajes podem ser colocadas como elementos desse tipo.

Em laboratório, sob a ação do “incêndio-padrão”, o interesse é medir os tempos, a contar do início do ensaio, em que o elemento estrutural considerado perde cada uma dessas funções: resistência mecânica, estanqueidade ou de isolamento. O menor dos tempos medidos é tomado como sua “resistência ao fogo”.

A resistência ao fogo do elemento estrutural, obtida em laboratório, é aferida por intermédio de valores limites normalizados de esgotamento para cada uma das funções projetadas para o elemento na edificação. O esgotamento da função isolante está ligado a uma temperatura máxima limite, tanto nos códigos normativos internacionais quanto no nacional. Neste caso, submete-se uma face do elemento ao programa térmico padrão e observam-se as elevações de temperatura na face não exposta. Essa temperatura não deve ultrapassar valores preestabelecidos.

Em elementos projetados para exercer a função de estanqueidade não se deve permitir que as chamas ou os gases quentes atravessem esses elementos e atinjam outros ambientes da edificação. O esgotamento dessa função está ligado a um limite de abertura de eventuais fissuras no elemento e/ou à ignição de corpo de prova colocado próximo a uma dessas fissuras (chumaço de algodão).

A NBR 5628 (ABNT, 2001a), por sua vez, não verifica a estanqueidade em função dos limites de abertura das fissuras; somente em relação à ignição do chumaço de algodão. Portanto, em futura revisão da NBR 5628 (ABNT, 2001a) talvez seja conveniente a discussão de eventual inclusão dessa verificação. Pela ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999) tal verificação é bem simples, com a inserção de pequenas cunhas padronizadas nas fissuras, de maneira a compararem-se suas aberturas com valores limites normalizados.

Outro aspecto que deve ser avaliado em futura revisão da NBR 5628 (ABNT, 2001a) é a exigência, atualmente inexistente, de um limite mínimo para a pressão interna do forno durante o ensaio para a avaliação da estanqueidade. Essa pressão, teoricamente, facilitaria a expulsão dos gases quentes pelas fissuras e, conseqüentemente, a ignição do chumaço de algodão. A ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999) estabelece essa exigência.

Quanto à verificação em laboratório da estabilidade, vários são os critérios usualmente empregados para caracterizar o esgotamento dessa função resistente. Tanto nacional quanto internacionalmente, esses critérios baseiam-se em limites de temperatura e/ou de deslocamento do elemento estrutural em avaliação.

No caso da temperatura limite (ou temperatura crítica), o critério baseia-se no fato de que alguns materiais, a partir de determinado valor de temperatura, perdem grande parte de sua resistência. Como exemplo, para efeito de padronização, pode-se adotar o valor de 600 oC para o aço em análise experimentais dessa natureza.

Entretanto, a resistência do elemento também depende do nível de carregamento aplicado durante os ensaios em altas temperaturas e, da

mesma forma, o conceito de temperatura crítica só tem sentido se aplicado a elementos estruturais com distribuição uniforme em dado volume (rara situação prática); e, finalmente, pode-se afirmar que o que leva ao colapso são os campos térmicos críticos, que, por sua vez, são difíceis de ser padronizados para ensaios experimentais. Assim, conclui-se que definir uma temperatura crítica para dado material não é tarefa simples. Entretanto, a ASTM E119 (AMERICAN..., 2000) permite esse critério na avaliação da resistência ao fogo de elementos estruturais. A ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999) e a NBR 5628 (ABNT, 2001a) não fazem menção explícita a esse critério. Na literatura internacional, percebe-se a aplicação desse critério da ASTM E119 (AMERICAN..., 2000) para elementos estruturais avaliados sem carregamento. Neste caso, vale observar que esses ensaios devem ser vistos somente como ferramenta de calibração de modelos numéricos em análises térmicas. Avaliar a resistência ao fogo de um elemento estrutural descarregado pode não ter sentido algum. Sendo assim, a função de estabilidade dos elementos estruturais em situação de incêndio seria avaliada somente em função de algum deslocamento vertical limite ou de alguma taxa limite de deslocamento. Valores limites estão mais relacionados à segurança dos usuários e à proteção dos equipamentos de ensaio do que a algum valor de deslocamento estabelecido em função do comportamento limite último, ou em serviço, do elemento estrutural ou do material de que é fabricado, em situação de incêndio.

Torna-se usual, então, o estabelecimento de valores limites como os da ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999), que recomenda para elementos fletidos:

(a) limite para o deslocamento vertical (flecha) no meio do vão em “mm” (Equação 2):

$$u = L^2/400d \quad \text{Eq. 2}$$

(b) limite para a taxa de deslocamento com o tempo em “mm/min” (Equação 3):

$$du/dt = L^2/9000.d \quad \text{Eq. 3}$$

Na Equação 2 “L” é tomado como a distância entre os eixos dos apoios do elemento fletido, e “d” é sua altura útil.

Vale, neste caso, a exigência de que a condição da taxa limite de deslocamento só seja considerada quando o deslocamento vertical máximo ultrapassar o valor de L/30.

Para elementos axialmente comprimidos a mesma ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999) estabelece:

(a) como limite de deformação axial, em “mm” (Equação 4):

$$\delta = h/100 \quad \text{Eq. 4}$$

(b) como taxa limite de deformação axial, em “mm/min” (Equação 5):

$$d\delta/dt = 3h/1000 \quad \text{Eq. 5}$$

Na Equação 4 “h” é a altura do elemento avaliado.

Vale observar, no entanto, que a NBR 5628 (ABNT, 2001a) faz menção somente ao limite de L/30 para elementos fletidos e não impõe qualquer limitação às deformações de elementos axialmente comprimidos. A ASTM E119 (AMERICAN..., 2000) não especifica, para caracterizar o esgotamento da estabilidade do elemento ensaiado, nenhum deslocamento vertical limite e nenhuma taxa limite de deslocamento.

Dimensões mínimas dos elementos estruturais para a avaliação da resistência ao fogo

Em relação às dimensões mínimas dos elementos estruturais, as normas nacionais e internacionais apresentam recomendações semelhantes. As maiores diferenças ocorrem com relação aos valores mínimos das paredes e lajes. A Tabela 1 resume essas especificações.

Um aspecto de interesse em relação a esses valores mínimos sugeridos diz respeito à discussão se eles devem referir-se ao trecho mínimo aquecido dos elementos ou a valores relacionados aos vãos mínimos de ensaio. Uma avaliação dos trabalhos internacionais disponíveis na literatura leva à constatação de que esses valores quase sempre são tomados como vãos mínimos, com trechos aquecidos menores do que os valores mínimos normalizados. Com isso, quase sempre os apoios dos elementos estruturais ensaiados ficam do lado de fora dos fornos (Figura 7). Uma discussão apurada sobre esses valores mínimos deve ser feita em futura revisão da NBR 5628 (ABNT, 2001a).

Instrumentação

A análise em laboratório do comportamento de elementos estruturais em situação de incêndio implica o registro das alterações físicas, mecânicas e térmicas que acontecem nesses elementos quando carregados e submetidos ao programa térmico padrão. Essas alterações são avaliadas para a obtenção de parâmetros específicos, como deslocamentos, deformações específicas e temperaturas ao longo do ensaio.

Em situação ambiente existe uma infinidade de instrumentos (equipamentos) de medida disponíveis no mercado que podem ser empregados na leitura e registro dessas informações. Entretanto, quando se trabalha com as mesmas leituras em situação tão adversa como o ambiente de simulação de incêndio, as dificuldades multiplicam-se.

A seguir, cada parâmetro de medição é apresentado e discutido em relação aos pontos padronizados de interesse para essas medidas e em relação aos equipamentos usuais existentes no mercado para leitura dessas informações. Essa análise crítica vem ao encontro dos objetivos deste manuscrito, uma vez que limitações tecnológicas e

financeiras em relação a equipamentos de laboratório devem também ser um ponto de discussão em futura revisão da NBR 5628 (ABNT, 2001a).

Medição da temperatura

Os termopares são sensores de maior uso em laboratório para medição de temperatura. Eles cobrem uma faixa bastante extensa de temperatura, que vai de -200 a 2.300 °C aproximadamente, com uma boa precisão e repetibilidade aceitável. Eles são compostos de dois condutores metálicos distintos, que podem ser puros ou homogêneos e podem ser de haste, de placa ou fios termopares (Figura 8).

Tabela 1 - Dimensões mínimas para os elementos estruturais segundo as normas existentes

	PAREDES	LAJES	VIGAS	PILARES
NBR 5628	2,5 x 2,5 m ²	2,5 x 4,0 m ²	4,0 m (*)	3,0 m
ASTM E119	9 m ² e 2,7 m	16 m ² e 3,7 m	3,7 m	2,7 m
ISO 834	9 m ² e 2,7 m	12 m ² e 4,0 m	4,0 m	3,0 m

Nota: (*) Notar que a recomendação da NBR 5628 (ABNT, 2001) para vigas é feita em relação a um limite máximo para o vão. Nas outras normas técnicas avaliadas esse valor é limitado em seu mínimo.

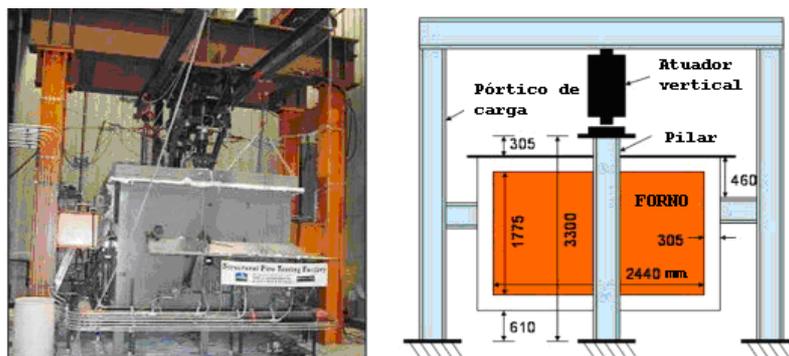


Figura 7 - Esquema de ensaio de pilar com extremidades fora do forno

Fonte: Kodur e Fike (2008).

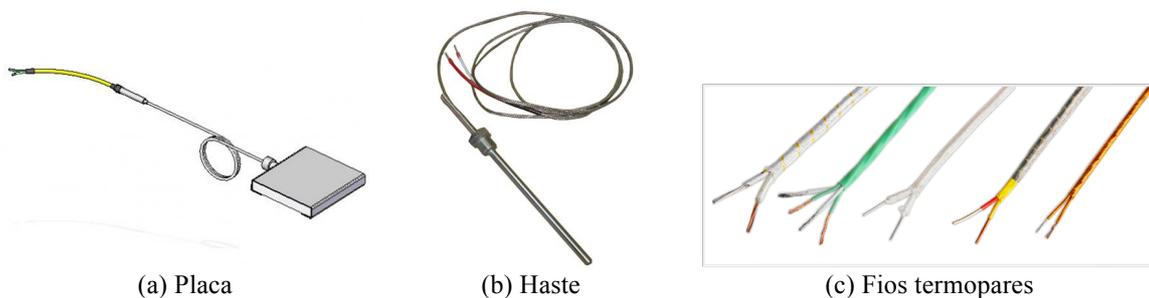


Figura 8 - Tipos de termopares

Os termopares convencionais são classificados segundo o ambiente adequado de utilização e segundo a temperatura máxima de leitura. São designados por uma letra (B, E, J, K, N, R, S e T), sendo o “tipo K” o mais usado em ensaios de elementos estruturais em situação de incêndio. O termopar do “tipo K” é recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes e não devem ser utilizados em atmosferas sulfurosas. Sua capacidade de leitura gira em torno de temperaturas até 1.300 °C.

A medição da temperatura em ensaios de avaliação da resistência ao fogo de elementos estruturais é regida por recomendações específicas de posicionamento dos termopares no interior do forno e no elemento estrutural sob avaliação.

Deformações e deslocamentos são inerentes ao elemento que está sob avaliação. Entretanto, a evolução da temperatura ao longo do tempo de duração do ensaio diz respeito tanto ao elemento quanto ao ambiente de simulação (forno) do teste. “Termopares de controle” são aqueles empregados na medição da evolução da temperatura no forno e “termopares de apoio” são os termopares para registro da temperatura no elemento durante o ensaio.

O registro da temperatura no forno tem a finalidade de validação do ensaio. Uma vez que existe uma recomendação normalizada em relação à evolução da temperatura com o tempo, essa evolução deve ser verificada, ou controlada, em pontos específicos do interior do forno (Figura 9). O termopar de controle do forno é posicionado no interior do forno, numa região próxima do elemento estrutural ensaiado.

O registro das temperaturas no elemento em teste tem a finalidade de acompanhar a evolução

térmica desse elemento. Esse acompanhamento, conduzido pelos “termopares de apoio”, é feito, geralmente, com fios termopares fixados em pontos localizados na superfície, ou mesmo internos, do elemento estrutural em avaliação (Figura 10).

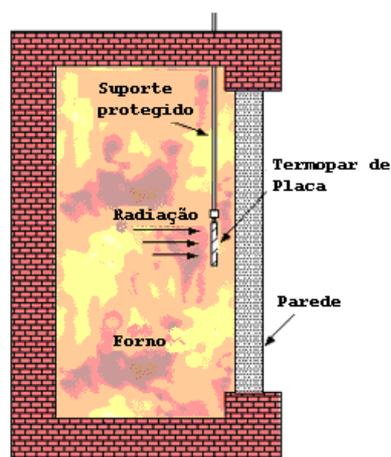
Termopares de controle

No registro da temperatura do forno, termopares de haste ou de placa são utilizados. Entretanto, deve-se considerar em futura revisão da NBR 5628 (ABNT, 2001a) a exigência de termopares de placa no controle da temperatura do ambiente ao redor do elemento em teste (incêndio-padrão). A justificativa é que esses termopares são bem mais sensíveis à radiação do que os termopares de haste e, portanto, mais representativos do fenômeno de aquecimento via chama (fornos a gás). As normas técnicas nacionais e internacionais sugerem um número mínimo de termopares de controle em função do tipo de elemento a ser ensaiado, bem como estabelecem a distância, tomada a partir das faces aquecidas do elemento em questão, até o ponto de controle, onde o termopar de haste ou de placa será posicionado.

Em relação ao distanciamento da face do elemento até o ponto de controle existem algumas diferenças significativas no valor recomendado pelas normas nacionais e internacionais. A ASTM E119 (AMERICAN..., 2000), como exemplo, sugere que esse valor seja de aproximadamente 15 cm para o ensaio de paredes e de 30 cm para o ensaio de outros elementos. A norma ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999) estabelece que essa distância deva ficar entre 5 cm e 15 cm. A NBR 5628 (AMERICAN..., 2001a) adota o valor de 10 cm.



(a)



(b)

Figura 9 - Termopares de controle de (a) haste e de (b) placa

Fonte: Pinto (2005).

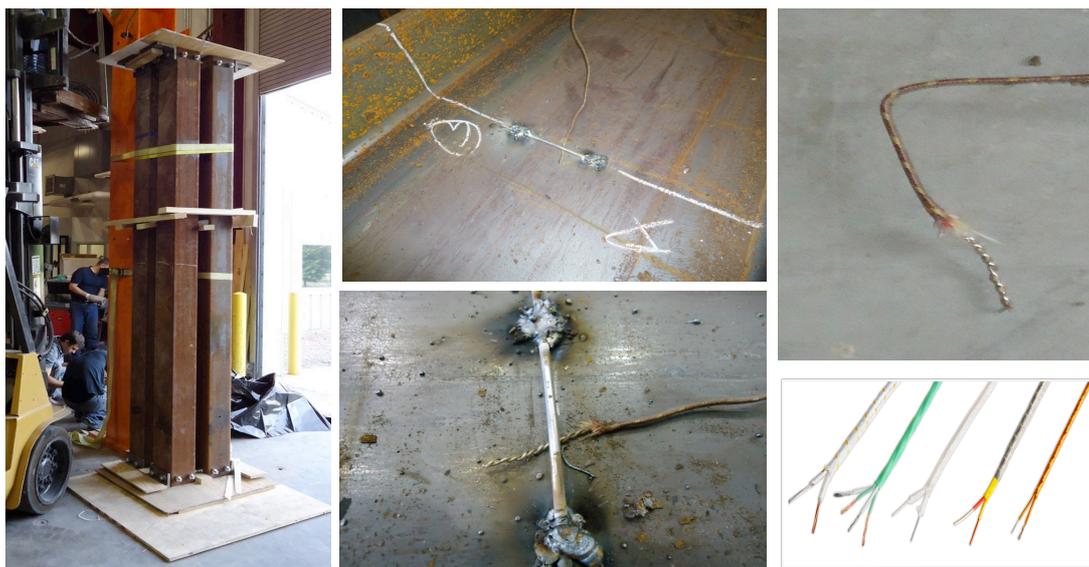


Figura 10 - Termopares de registro de temperatura no elemento ensaiado

Essas diferenças devem ser discutidas em futuras revisões da NBR 5628 (ABNT, 2001a). As diferenças de temperatura num raio de 30 cm das faces do elemento ensaiado são consideráveis nos primeiros 30 a 45 min de duração do incêndio. Dessa forma, posicionar o ponto de controle do “incêndio-padrão” a 5 cm ou 30 cm da face do elemento pode resultar em diferenças significativas no valor da resistência ao fogo do elemento para tempos de resistência inferiores a 60 min.

Do mesmo modo, vale observar que existem fenômenos de grande probabilidade de ocorrência nos 30 min iniciais de um incêndio-padrão e cuja intensidade é tanto maior quanto maior for a taxa de elevação de temperatura com o tempo. O lascamento explosivo do concreto (conhecido como *spalling*) é um desses fenômenos. Assim, posicionar um ponto de controle do incêndio-padrão a 5 cm da face do elemento de concreto a ser ensaiado é garantir uma taxa de elevação de temperatura bem maior do que aquela obtida com esse posicionamento a 30 cm.

Portanto, em futuras revisões da NBR 5628 (ABNT, 2001a) talvez seja conveniente manter o valor de 10 cm para o distanciamento entre os pontos de controle do incêndio-padrão e a face do elemento ensaiado. Entretanto, convém incluir uma folga, para mais ou para menos, a exemplo do que a ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999) estabelece.

Com respeito ao número mínimo de termopares de controle, a ASTM E119 (AMERICAN..., 2000) estabelece um mínimo de 9 para lajes, paredes ou vigas e 8 para pilares. A NBR 5628 (ABNT, 2001a) recomenda 1 termopar para cada 1,5 m² de

parede ou de laje, 3 termopares por face exposta de pilar e, no mínimo, 6 termopares para as vigas, sendo esses termopares distribuídos nas faces laterais do elemento.

A finalidade desses termopares é garantir a necessária distribuição uniforme de temperatura no interior do forno em regiões próximas ao elemento em teste. Esses valores citados anteriormente devem ser discutidos e estabelecidos em função dessa necessidade. A existência de elementos com geometria não usual (lajes nervuradas, lajes com fôrma de aço incorporada, vigas mistas, etc.) pode gerar dúvidas com relação a um melhor posicionamento dos termopares de controle. Em futuras revisões da NBR 5628 (ABNT, 2001a) o número mínimo de termopares de controle e o respectivo posicionamento de cada um deles devem ser mais bem avaliados. Talvez a inclusão de esquemas de posicionamento em função da geometria da seção transversal do elemento a ser ensaiado possa ser um dos itens de discussão dessa futura revisão.

Outro aspecto em relação ao controle da elevação da temperatura em função do tempo no ensaio dos elementos estruturais são as diferenças admissíveis entre os valores da evolução da temperatura padronizados e os efetivamente obtidos durante o tempo de ensaio. Essa tolerância é expressa nas normas técnicas nacionais e internacionais em função das diferenças entre as áreas sob as curvas representativas dessas evoluções.

Segundo a ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999), tem-se:

- (a) 15% para tempos entre 5 min e 10 min;

- (b) $15-5(t-10)\%$ para tempos entre 10 min e 30 min;
- (c) $5-0,083(t-30)\%$ para tempos entre 30 min e 60 min; e
- (d) 2,5% para tempos maiores que 60 min.

A mesma ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999) ainda exige que a temperatura medida em qualquer dos termopares de controle, a partir de um tempo igual a 10 min, não seja diferente da correspondente temperatura medida na curva do “incêndio-padrão” de mais ou de menos de 100 °C.

Segundo a ASTM E119 (AMERICAN..., 2000), tem-se:

- (a) 10% até o tempo de 1 h;
- (b) 7,5% entre os tempos de 1 h e 2 h; e
- (c) 5% para tempos superiores a 2 h.

A norma técnica brasileira NBR 5628 (ABNT, 2001a) apresenta as seguintes recomendações:

- (a) 15% durante os 10 primeiros minutos;
- (b) 10% durante os 30 primeiros minutos; e
- (c) 5% após os primeiros 30 minutos.

Exige, adicionalmente, que a média das temperaturas medidas nos termopares de controle não se diferencie do correspondente valor na curva padrão de 100 °C (para mais ou para menos) para tempos superiores a 10 min.

Vale ressaltar que em futuras revisões da NBR 5628 (ABNT, 2001a) a recomendação descrita no parágrafo anterior deve ser revista. A diferença em questão não pode ser tomada com relação à média dos termopares de controle, e sim deve ser tomada individualmente, como ocorre na ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999). A finalidade desse procedimento é a verificação da uniformidade do aquecimento no interior do forno, onde qualquer diferença substancial significaria um aquecimento desigual e, portanto, não adequado aos objetivos do ensaio.

É usual, também, nas normas técnicas nacionais e internacionais a padronização dos procedimentos relativos ao controle da temperatura nas faces não aquecidas de paredes ou de lajes. Esse controle diz respeito à verificação da função de isolamento e tem a finalidade adicional de proteção dos equipamentos e das pessoas envolvidas no teste.

No caso da verificação da função de isolamento, a ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999), a ASTM E119 (AMERICAN..., 2000) e a NBR 5628 (ABNT, 2001a) têm recomendações semelhantes nesse quesito de controle externo da temperatura durante o ensaio, considerando pelo menos cinco

pontos de medição dispostos de maneira uniforme na superfície do elemento que não está em contato com o fogo. Nessa situação, o isolamento proporcionado é satisfatório se o aumento de temperatura na face não exposta não ultrapassar, em média, 140 °C ou 180 °C em qualquer dos pontos instrumentados.

Termopares de apoio

No caso do registro das temperaturas nos elementos estruturais em avaliação, seja em pontos das faces ou nos pontos internos do elemento, nada é especificado nas normas técnicas nacionais e internacionais com respeito ao posicionamento e quantidade desses pontos de medida. Essa decisão fica a cargo dos pesquisadores envolvidos no teste. Entretanto, com o intuito de um melhor aproveitamento dos inúmeros ensaios que podem ser realizados em território nacional, no que concerne ao ajuste de eventuais modelos numéricos para análises térmicas, talvez em futura revisão da NBR 5628 (ABNT, 2001a) esse aspecto possa ser mais bem discutido e, se for consenso entre o meio técnico e o científico, é interessante que alguns pontos de registro das temperaturas no elemento em ensaio possam ser sugeridos. Essa atitude representaria pouco acréscimo no custo dos ensaios e enorme contribuição ao meio técnico/científico nacional.

Medições de deslocamentos

Na avaliação da resistência ao fogo de um elemento estrutural em laboratório, a obtenção dos valores dos deslocamentos é necessária, pois estes são indicativos, geralmente, do instante de esgotamento da resistência do elemento. Da mesma forma, um rápido incremento nos valores de deslocamentos pode ser um critério de segurança importante em ensaios onde os riscos envolvidos são bastante elevados.

O monitoramento dos deslocamentos dos elementos estruturais em situação de incêndio não é tão simples quanto esse mesmo monitoramento em situação ambiente. Transdutores de deslocamentos resistentes a altas temperaturas não são encontrados tão facilmente no mercado, e sua fabricação ainda tem custos extremamente elevados.

Uma alternativa para esse quadro consiste no posicionamento dos transdutores de deslocamento na face não aquecida do elemento em teste e, indiretamente, executar essas leituras de deslocamentos. No caso de lajes, onde o aquecimento acontece na face inferior do elemento, os transdutores podem ser posicionados diretamente na face superior, não aquecida. No

caso de pilares, o monitoramento pode ser feito pela extremidade superior do elemento, que, na maioria dos testes executados, fica para fora do forno (Figura 8).

Existem outras formas de obtenção desses valores de deslocamentos com equipamentos ópticos, que ficam posicionados fora do forno e que, através das janelas laterais de observação do forno, realizam essas medições. Entretanto, esse método ainda foi pouco estudado e quase nada existe a esse respeito disponível na literatura técnica internacional.

Medições de deformações específicas

A avaliação do comportamento de um elemento estrutural sob carregamento depende de sua resposta aos carregamentos. Essa resposta, logicamente, é traduzida por intermédio de leituras de deslocamentos e deformações específicas.

Assim como descrito para os deslocamentos, a obtenção dos valores das deformações específicas em ambientes com temperaturas elevadas tem ainda muitas restrições. Em situação ambiente, strain gages são usualmente empregados para a medida das deformações específicas nos elementos avaliados em laboratório. Entretanto, não existem strain gages aptos a trabalhar em temperaturas elevadas como aquelas observadas no chamado “incêndio-padrão”. Atualmente, o limite de trabalho dos strain gages para altas temperaturas é da ordem de 800 °C, mas esses instrumentos têm custos extremamente elevados.

Outro fato que deve ser evidenciado é que a temperatura limite de trabalho dos extensômetros atuais (800 °C) corresponde a um tempo de apenas 20 min na curva do “incêndio-padrão”.

As deformações específicas de interesse no elemento estrutural durante um ensaio de resistência ao fogo geralmente acontecem para tempos bem superiores a 20 min iniciais do ensaio.

Consequentemente, o monitoramento restrito das deformações específicas em elementos estruturais usuais, aliado ao custo elevado, torna a utilização de *strain gages nos ensaios de avaliação da resistência ao fogo* quase inviável. Esse é um dos grandes desafios da indústria de instrumentação, ou seja, o desafio de fabricar extensômetros que possam ser empregados em temperaturas elevadas (da ordem de 1.200 °C) e a um custo acessível.

Propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos materiais

Muitas são as propriedades físicas, térmicas e mecânicas dos materiais que influenciam direta ou indiretamente no comportamento dos elementos estruturais expostos ao fogo quando estes elementos são construídos com esses materiais.

A maioria das normas técnicas nacionais e internacionais somente exige o registro de poucas dessas propriedades nos relatórios de ensaios de resistência ao fogo em laboratório. Uma das propriedades físicas dos materiais estruturais cuja devida importância não é considerada na NBR 5628 (ABNT, 2001a) é o teor de umidade. Atualmente, existe na NBR 5628 (ABNT, 2001a) apenas um parágrafo sugerindo que a amostra tenha teor de umidade próximo daquele previsto para as condições normais de uso. Entretanto, na maioria das vezes, as amostras são ensaiadas aos 28 dias de idade, com teor de umidade bem diferente daquele equivalente às condições normais de uso.

No caso de elementos estruturais de concreto e de madeira, o teor de umidade é um dos parâmetros mais influentes no comportamento resistente ao fogo. O fenômeno do lascamento explosivo é diretamente influenciado por essa propriedade física do material concreto. Não registrar o valor dessa propriedade nos ensaios, ou mesmo não padronizar esse valor para o ensaio, pode resultar em comportamentos imprevistos durante o ensaio, os quais dificilmente serão convenientemente explicados ou reproduzidos. Convém observar que tanto na ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999) como na ASTM E119 (AMERICAN..., 2000) existe a mesma recomendação adotada pela NBR 5628 (ABNT, 2001a) em relação ao teor de umidade, ou seja, que este deve ser similar ao que seria encontrado em situação de uso do elemento por ensaiar. Entretanto, essas mesmas normas técnicas internacionais especificam procedimentos alternativos para a obtenção desse teor de umidade recomendado para o ensaio. Talvez, em futuras revisões da NBR 5628 (ABNT, 2001a) esse assunto deva ser incluído na pauta de discussões.

Um ponto positivo em relação ao registro de muitas das propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos materiais nos relatórios de ensaio nacionais seria o necessário impulso ao desenvolvimento de métodos numéricos nacionais de simulação. Nas simulações numéricas, os resultados de caracterização física, mecânica e térmica dos materiais são primordiais. Além disso, os custos de um ensaio em laboratório para a

determinação da resistência ao fogo são infinitamente superiores aos custos de obtenção da maioria das propriedades físicas, mecânicas e térmicas para a calibração de modelos numéricos termoestruturais. Em tempos de pleno avanço nacional dessa linha de pesquisa, fazer constar em texto normativo a exigência de informações a respeito dessas propriedades nos relatórios de ensaio pode alavancar o desenvolvimento dessa área de pesquisa nacional. Trata-se, portanto, de mais um assunto que em futuras revisões da NBR 5628 (ABNT, 2001a) deve ser incluído na pauta de discussões.

Intervalo de aquisição de dados

Outra das exigências normativas que merece ser discutida diz respeito ao intervalo de aquisição de medições de temperatura, deslocamentos e deformações específicas, ao longo do tempo de duração do ensaio. Um registro mais refinado dos resultados de ensaio, principalmente na primeira hora de duração, pode auxiliar na interpretação dos resultados com melhor eficiência. Da mesma forma, quanto mais informações existem a respeito da resposta do elemento estrutural testado em relação a sua resistência ao fogo, melhor o ajuste de eventuais modelos numéricos termoestruturais. Atualmente, na maioria das normas técnicas nacionais e internacionais, esses intervalos de medição estão padronizados para tempos que variam de 5 min a 10 min. Tendo em vista a atual automatização na aquisição de dados, não existe sentido na padronização de intervalos de medição tão elevados. Intervalos de tempo bem inferiores podem ser empregados em qualquer laboratório de pesquisa nacional ou internacional, uma vez que essa redução não acarretaria, em primeira instância, acréscimos nos custos de ensaio. Discussões a esse respeito em futura revisão da NBR 5628 (ABNT, 2001a) seriam convenientes. Como sugestão, propõem-se intervalos de tempo de 1 min, para os primeiros 30 min de duração do ensaio; de 5 min, dos 30 aos 120 min de duração; e 10 min, a partir de 120 min de duração do ensaio.

Considerações finais

Neste trabalho foram reunidos e discutidos parâmetros que norteiam procedimentos metodológicos para a avaliação em laboratório de elementos estruturais em escala natural, com carga, e em situação de incêndio. Parâmetros de interesse como dimensões mínimas dos elementos para o ensaio, taxas de elevação de temperatura com o tempo, infraestrutura para o ensaio e instrumentação dos elementos estruturais, entre

outros, foram avaliados à luz de normalização nacional e internacional vigente.

Algumas sugestões para discussão em futura revisão da NBR 5628 (ABNT, 2001a), ao final desta avaliação, podem ser assim resumidas:

- (a) inclusão de curvas de “incêndio de projeto” como alternativas ao “incêndio-padrão”;
- (b) especificação da intensidade de carregamento dos elementos estruturais nos ensaios de resistência ao fogo, como aquela correspondente à combinação excepcional de ações;
- (c) especificação de critérios limites de resistência ao fogo quanto à perda de estabilidade estrutural: implementação dos critérios existentes para elementos fletidos e inclusão de critérios para elementos axialmente comprimidos;
- (d) avaliação das dimensões mínimas de paredes, lajes, vigas e pilares em ensaios para a avaliação da resistência ao fogo: implementação de comprimentos mínimos para o ensaio de vigas e lajes em duas direções;
- (e) instrumentação: implementação de novos esquemas de posicionamento dos pontos de controle da temperatura ao redor do elemento ensaiado (incêndio-padrão) e implementação de sugestões quanto ao posicionamento dos pontos de interesse para o registro da evolução da temperatura no elemento durante o tempo de duração do ensaio;
- (f) implementação de medidas efetivas de controle da uniformidade da temperatura ao redor do elemento ensaiado;
- (g) implementação de limites para a pressão no interior do forno em ensaios de avaliação da estanqueidade;
- (h) implementação de limites para a abertura das fissuras nos elementos (paredes e lajes) em ensaios de avaliação da estanqueidade;
- (i) implementação de registro de propriedades físicas, térmicas e mecânicas em todo relatório de ensaio de resistência ao fogo, principalmente o valor do teor de umidade; e
- (j) implementação de intervalos de medição menores do que os atuais 5 min ou 10 min.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI-TMS 216.1**: standard method for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies. Farmington Hills, MI, 2007.
- AMERICAN SOCIETY OF TEST MATERIALS. **ASTM E119**: standard methods of fire test of

- building construction and materials: fire and flammability standards, test method. West Conshohocken, PA, 2000.
- AMERICAN SOCIETY OF TEST MATERIALS. **ASTM E1529**: standard methods for determining effects of large hydrocarbon pool fires on structural members and assemblies. West Conshohocken, PA, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10636**: paredes divisórias sem função estrutural: determinação da resistência ao fogo: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações: procedimento. Rio de Janeiro, 2001b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais: determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: ações e segurança nas estrutura: procedimento. Rio de Janeiro, 2001c.
- BEYLER, C. *et al.* **Fire Resistance Testing For Performance Based Fire Design of Buildings**: final report. Quincy, MA: The Fire Protection Research Foundation, Batterymarch Park, 2007.
- CAZELI, R. *et al.* Análise Numérica de Vigas “I” de Aço em Situação de Incêndio, Sujeitas à Flambagem Lateral: contribuição para a validação de uma proposta de revisão do Eurocode 3: parte 1.2. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, São Paulo, 2001. **Anais...** São Paulo, 2001.
- ELLINGWOOD, R. B. Load Combination Requirements for Fire-resistant Structural Design. **Journal of Fire Protected Engineering**, v. 15, n. 1, p. 43-61, fev. 2005.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1363-1**: fire resistance tests: general requirements. Brussels, 2012.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1365-1**: fire resistance tests for loadbearing elements: part 1: walls. Brussels, 2012
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1365-2**: fire resistance tests for loadbearing elements: part 2: floors and roofs. Brussels, 2000.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834**: fire resistance tests: elements of building construction: part 1. General requirements. Geneva, 1999.
- JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY. **JCSS**: probabilistic model code part 2: load models: fire. 2001.
- KHOURY, G. A. Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: a reassessment. **Magazine of Concrete Research**, v. 44, n. 161, p. 291-309, 1992.
- KODUR, V. K. R.; FIKE, R. Guidelines for Improving the Standard Fire Resistance Test Specifications. **Journal of ASTM International, West Conshohocken**, v. 6, n. 7, 2008.
- LEITE JUNIOR, G. S. *et al.* Fire Resistance of Axially Loaded Slender Concrete Filled Steel Tubular Columns. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURES IN FIRE, 6., Lancaster, Pennsylvania. **Proceedings...** Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publication, Inc., 2010. v. 1, p. 433-440.
- NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 251**: standard methods of tests of fire resistance of building construction and materials. Batterymarch Park, Quincy, MA, 2006.
- NEVES, L. A. C.; CRUZ, P. J. S. **Introdução à Análise Probabilística Simplificada da Segurança Estrutural**. Azurém, Portugal: Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2001. n. 12.
- PINTO, E. M. **Determinação de Um Modelo de Taxa de Carbonização Transversal a Grã Para o Eucalyptus itriodora e Eucalyptus grandis**. 2005. Tese (Doutora em Arquitetura e Urbanismo) –Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- SANTANNA, M. S.; MORENO JR, A. L. Pilares Mistos Esbeltos em Aço Preenchidos Com Concreto, de Seção Quadrada, em Situação de Incêndio. In: CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO SOBRE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO, Natal, 2011. **Anais...** Natal, 2011. v. 1, p. 1-10.
- SEITO, A. I. *et al.* **A Segurança Contra Incêndios no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 470 p.
- SILVA, V. P. Estruturas de Aço em Situação de Incêndio: determinação da temperatura nos elementos estruturais de aço com proteção térmica: uma proposta de revisão da NBR 14323:1999. In: Jornadas Sul-Smericanas de Engenharia Estrutural, 30., Brasília, DF, 2002. **Anais...** Brasília, DF, 2002.

SILVA, V. P. Dimensionamento de Pilares de Concreto Armado em Situação de Incêndio: uma alternativa ao método tabular da NBR 15200:2004. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, p. 277-303, 2011.

SILVA, V. P.; VELARDE, J. S. S. Sobre o Dimensionamento de Pilares de Aço em Situação de Incêndio: revisão da NBR 14323. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 6, p. 44-64, 2010.

TURKSTRA, C. J. **Theory of Structural Design Decisions**: study n° 2. Waterloo, Canada: University of Waterloo, 1972.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), pelo financiamento do projeto temático que gerou este trabalho.

Revista Ambiente Construído
Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br