9 Proposta de dimensionamento de elementos de concreto armado à flexão simples em situação de incêndio

9.1 Introdução

Com base nos resultados obtidos pela modelagem computacional, a **autora desta tese** propõe um método simplificado de cálculo para o projeto de elementos de concreto armado, de seções usuais da Construção Civil do Brasil, sujeitos à flexão simples – lajes maciças, lajes nervuradas e vigas – projetados à temperatura ambiente conforme as normas NBR 6118:2003 e NBR 8681:2003.

Trata-se de um método gráfico construído a partir da saída de resultados do *software* Super Tempcalc®. As tabelas que deram origem aos ábacos são apresentadas no Anexo B, para facilitar interpolações e a introdução do método de dimensionamento em programas de cálculo para dimensionamento de lajes e vigas de concreto armado.

Para a situação de incêndio, as diretrizes de projeto dos elementos basearam-se na NBR 8681:2003 (cálculo das ações para a situação de incêndio) e na NBR 15200:2004 (cálculo das propriedades mecânicas dos materiais estruturais à temperatura elevada). Os valores mínimos da resistência dos materiais são: $f_{ck} \geq 20$ MPa, para o concreto, e $f_{yk} \geq 500$ MPa para o aço.

O método permite calcular a capacidade resistente de seções armadas, fornecendo dados para considerar a redistribuição de esforços de elementos hiperestáticos, facultativa ao projetista.

A resistência requerida ao fogo que os elementos devem ter baseia-se nas diretrizes da NBR 14432:2001 e da IT 08:04.

A Figura 9.2 apresenta uma síntese dos procedimentos de cálculo para uso do método aqui proposto. O Apêndice D fornece exemplos de aplicação com base em um projeto de um edifício residencial.

9.2 Ações e segurança

A estabilidade estrutural é considerada satisfatória quando a condição de segurança é verificada:

$$S_{d,fi} \leq R_{d,fi} \tag{9.1}$$

onde: $S_{d,fi}$ = valor de cálculo dos esforços atuantes, determinado a partir da combinação última excepcional das ações;

$R_{d,fi}$ = valor de cálculo do correspondente esforço resistente ($M_{Rd,fi}$), no qual se inclui um redutor de resistência devido ao aquecimento dos materiais concreto e aço.

Para elementos sujeitos à flexão simples, analisados isoladamente, considera-se apenas o momento fletor da seção mais solicitada, a ser verificado em situação de incêndio. Assim, a eq. (9.1) é substituída pela eq. (9.2).

$$M_{Sd,fi} \leq M_{R\,d,fi} \tag{9.2}$$

onde: $M_{Sd,fi}$ = valor de cálculo do momento fletor atuante em situação de incêndio;

$M_{Rd,fi}$ = valor de cálculo do momento fletor resistente em situação de incêndio.

A combinação de ações em situação de incêndio (eq. 9.3) é calculada considerando-se que o incêndio é uma ação excepcional. Para estruturas <u>sujeitas apenas à ação gravitacional</u>, as ações permanentes e variáveis podem ser reduzidas ao carregamento permanente (peso próprio) e à sobrecarga (ações acidentais).

$$F_{d,fi} = \gamma_g \cdot F_{gk} + \gamma_q \cdot \psi_{0j,ef} \,.\, F_{qk} \tag{9.3}$$

onde: $F_{d,fi}$ = valor de cálculo da ação total para a situação de incêndio;

F_{gk} = valor característico das ações permanentes;

F_{Qk} = valor característico da ação variável;

γ_g = coeficiente de ponderação para ações permanentes para a situação de incêndio (Cap. 4, Tabela 4.1);

γ_q = coeficiente de ponderação das ações variáveis para a situação de incêndio (Cap. 4, Tabela 4.1);

$\psi_{0j,ef} = 0{,}7 \cdot \psi_2$ = fator de combinação referente à parcela quase permanente das ação variável para a situação de incêndio (Tabela 9.1).

O estabelecimento do valor mínimo do fator de redução referente à ação variável para a situação de incêndio (Tabela 9.1), $0{,}7 \cdot \psi_2 \geq 0{,}3$, baseia-se nos estudos estatísticos de Holický & Schleich (2005) para a combinação de ações em edifícios de aço em situação de incêndio. Esse estudo considerou a probabilidade de incêndio e ruína de compartimentos de incêndio de área de piso A ≤ 1000 m² de um edifício comercial, incluindo-se a influência da variabilidade do coeficiente de redução da resistência do aço ($\kappa_{s,\theta}$) em função da temperatura elevada (cf. Cap. 4, item 4.2.1).

Tabela 9.1: Fatores de redução para combinação excepcional das ações em situação de incêndio.

Condição do local	$0{,}7 \cdot \psi_2 \geq 0{,}3$
Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas (edifícios residenciais, de acesso restrito).	**0,3***
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas (edifícios comerciais, de escritórios e de acesso público).	**0,3***
Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens (NBR 8681:2003).	0,42

Nota: * Proposta desta tese (cf. Cap. 4, item 4.2.1).

Esse limite poderia ser estendido às estruturas de outros materiais, uma vez o valor $0{,}7 \cdot \psi_2 \geq 0{,}3$ continuou a prover o maior nível de confiabilidade mesmo após aumentar a variabilidade da resistência do material à temperatura elevada (HOLICKÝ & SCHLEICH, 2005).

Para elementos sem carga de vento, pode-se estimar o valor de cálculo do momento fletor atuante em situação de incêndio por meio do fator η_{fi} (eq. 9.4). O fator η_{fi} é obtido dividindo-se o valor de cálculo da combinação de ações normais pelo valor de cálculo da combinação de ações para a situação de incêndio, empregando-se os coeficientes de ponderação das ações consideradas valores da NBR 8681:2003.

$$\frac{F_{d,fi}}{F_d} = \frac{1{,}2 \cdot F_{gk} + 0{,}7 \cdot \psi_2 . F_{Qk}}{1{,}4 \cdot F_{gk} + 1{,}4 . F_{Qk}} = \eta_{fi} \tag{9.4}$$

onde: $\eta_{fi} = \dfrac{F_{d,fi}}{F_d} = \dfrac{M_{Sd,fi}}{M_{Sd}}$ = coeficiente redutor do valor da ação em situação de incêndio;

F_d = valor de cálculo da ação total para a situação normal;

M_{Sd} = valor de cálculo do momento fletor solicitante em situação normal.

A eq. (9.4) é adequada a elementos isostáticos inseridos em pórticos de edifícios, por ex., vigas, bem como a elementos hiperestáticos sem carga de vento, por ex., lajes.

Na presença de outras ações, por ex., carga de vento na combinação normal de ações, deve-se usar a equação completa para o cálculo da ação total no denominador da eq. (9.4).

Uma extensiva análise experimental e numérica de 41 elementos hiperestáticos demonstrou que, quando bem dimensionadas à situação normal de projeto, eles apresentam capacidade rotacional maior que aquela imposta aos apoios pelo gradiente térmico desenvolvido na altura das seções de momento negativo durante o incêndio (ANDERBERG, 1978; FIP-CEB Bulletins N° 145 (1982), N° 174 (1987) e N° 208 (1991)).

Alguns cuidados devem ser tomados a rigor, para evitar a ruptura antecipada de alguma seção do elemento, devido à ancoragem insuficiente ou à baixa capacidade de deformação do aço das armaduras negativas. Aços de elevada resistência e baixa ductilidade não são adequados à plastificação das seções dos apoios e à efetiva redistribuição de esforços.

Ao considerar a redistribuição de esforços num vão de estrutura contínua, o valor de cálculo do momento solicitante máximo em situação de incêndio ($M_{Sd,fi}$) deve ser adequado ao momento resistente da seção ($M_{Rd,fi}$) no vão, de tal forma que os momentos resistentes $M_{Rd1,fi}$ e $M_{Rd2,fi}$ nos apoios estabeleçam o equilíbrio (Figura 9.1).

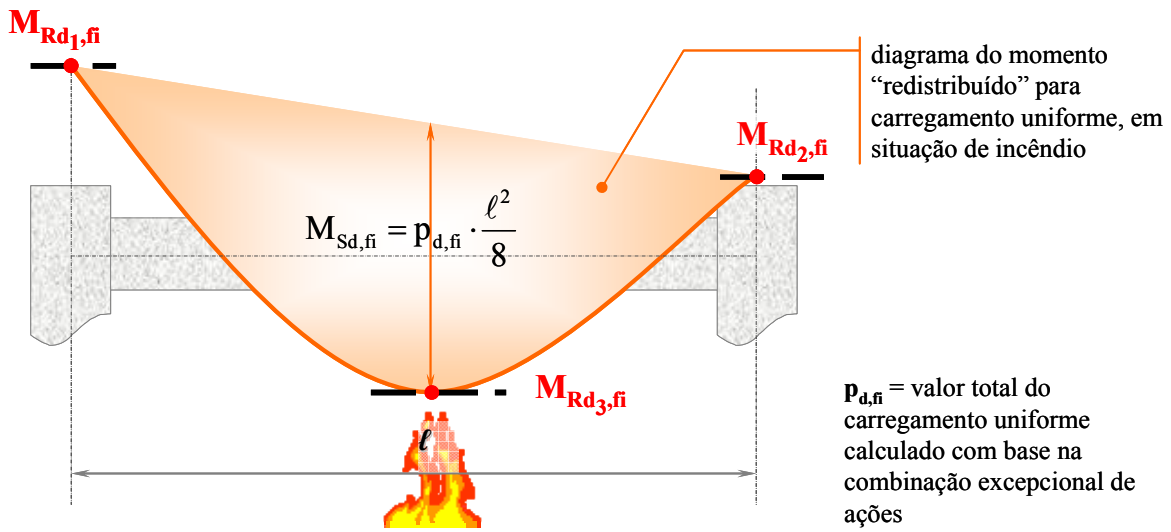

Figura 9.1: Redistribuição de momentos para carregamento distribuído uniforme em lajes ou vigas contínuas.

O valor máximo admissível do momento fletor solicitante deve ser calculado pela equação completa da combinação excepcional de ações.

O comprimento de ancoragem mínimo das armaduras para a situação de incêndio deveria ser checado para o diagrama de momentos redistribuídos (eq. 9.5). Os coeficientes de redução de resistência dos materiais do Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) fornecem um comprimento de ancoragem menor, $\ell_{b,fi} \approx 0{,}92 \cdot \ell_b$, independente da temperatura da armadura.

$$\underbrace{\frac{\ell_{b,fi} \cdot \gamma_s}{\gamma_c}}_{\text{situação excepcional}} = \underbrace{\frac{\ell_b \cdot \gamma_s}{\gamma_c}}_{\text{situação normal}} \tag{9.5}$$

$$\frac{\ell_{b,fi} \cdot 1}{1{,}2} = \frac{\ell_b \cdot 1{,}15}{1{,}4}$$

$$\ell_{b,fi} = \frac{69}{70} \cdot \ell_b \therefore \ell_{b,fi} \approx \ell_b$$

onde: $\ell_{b,fi}$ = comprimento de ancoragem necessário para a situação de incêndio [m];

ℓ_b = comprimento de ancoragem real, calculado para a situação normal [m].

9.3 Método expedito de dimensionamento de estruturas de concreto armado sujeitas à flexão simples

O *Super Tempcalc*® v.5 fornece os valores de cálculo do momento fletor resistente à temperatura ambiente (M_{Rd}), em situação de incêndio ($M_{Rd,fi}$) e a relação $\mu_{fi} = \frac{M_{Rd,fi}}{M_{Rd}}$.

O valor de cálculo do momento fletor resistente em situação de incêndio é função do campo de temperaturas nas seções transversais dos elementos.

O campo de temperaturas depende do tempo de aquecimento e, portanto, o valor de cálculo do momento fletor resistente depende do tempo de aquecimento. Logo, a relação $\mu_{fi} = \frac{M_{Rd,fi}}{M_{Rd}}$ também é função do tempo de aquecimento.

O tempo de resistência ao fogo (TRF) da seção transversal de concreto armado é o tempo em que o momento fletor resistente se iguala ao momento fletor solicitante (eq. 9.6). Dessa forma, a relação $\mu_{fi} = \frac{M_{Rd,fi}}{M_{Rd}}$ pode ser interpretada como sendo a relação entre o momento fletor solicitante em situação de incêndio e o momento fletor resistente em situação normal (eq. 9.7).

$$M_{Sd,fi} = M_{Rd,fi} \tag{9.6}$$

$$\mu_{fi} = \frac{M_{Rd,fi}\,(t = TRF)}{M_{Rd}} = \frac{M_{Sd,fi}}{M_{Rd}} \tag{9.7}$$

onde: $M_{Sd,fi}$ = valor de cálculo do momento fletor solicitante em situação de incêndio.

O coeficiente redutor μ_{fi} pode ser calculado com base no valor de cálculo dos momentos solicitante e resistente para a situação normal (Cap. 4, eq. 4.21):

$$\mu_{fi} = \frac{\eta_{fi} \cdot M_{Sd}}{M_{Rd}} \tag{9.8}$$

Os gráficos μ_{fi} x t (min) foram traduzidos em ábacos que permitem avaliar o TRF da seção armada em função dos dados de projeto à temperatura ambiente (eq. 9.7 ou eq. 9.8).

Os ábacos do Apêndice C prestam-se ao cálculo de seções de momento positivo e negativo, em função da taxa de armadura da seção, levando-se em conta os cobrimentos mínimos recomendados pela NBR 6118:2003 em função da classe de agressividade ambiental.

Os procedimentos para a determinação do TRF das seções de concreto armado são (Figura 9.2):

1° escolher um perfil da seção armada para aquele arranjo de armaduras (Apêndice C);
definir o tipo de ocupação por meio do fator de redução (ψ_2) referente à ação variável para as combinações de ações (Tabela 9.1);

2° calcular as combinações normal e excepcional de ações em função do fator de redução referente à ação variável;

3° determinar a relação $\mu_{fi} = \frac{M_{Rd,fi}}{M_{Rd}}$ (eq. 9.7 ou eq. 9.8);

4° determinar o valor de TRF para a seção armada selecionada (Apêndice C);
comparar o TRF da estrutura com o TRRF em função das características da edificação (NBR 14432:2001).

A segurança estrutural é atendida quando TRF ≥ TRRF. Alternativamente, pode-se determinar o valor de TRF de forma bem prática e a favor da segurança, admitindo-se a condição-limite $M_{Sd} = M_{Rd}$ no projeto para a situação normal, i.e., $\mu_{fi} = \eta_{fi}$ (Cap. 4, eq. 4.21). Tal simplificação pode ser muito conservadora para as vigas de pórticos.

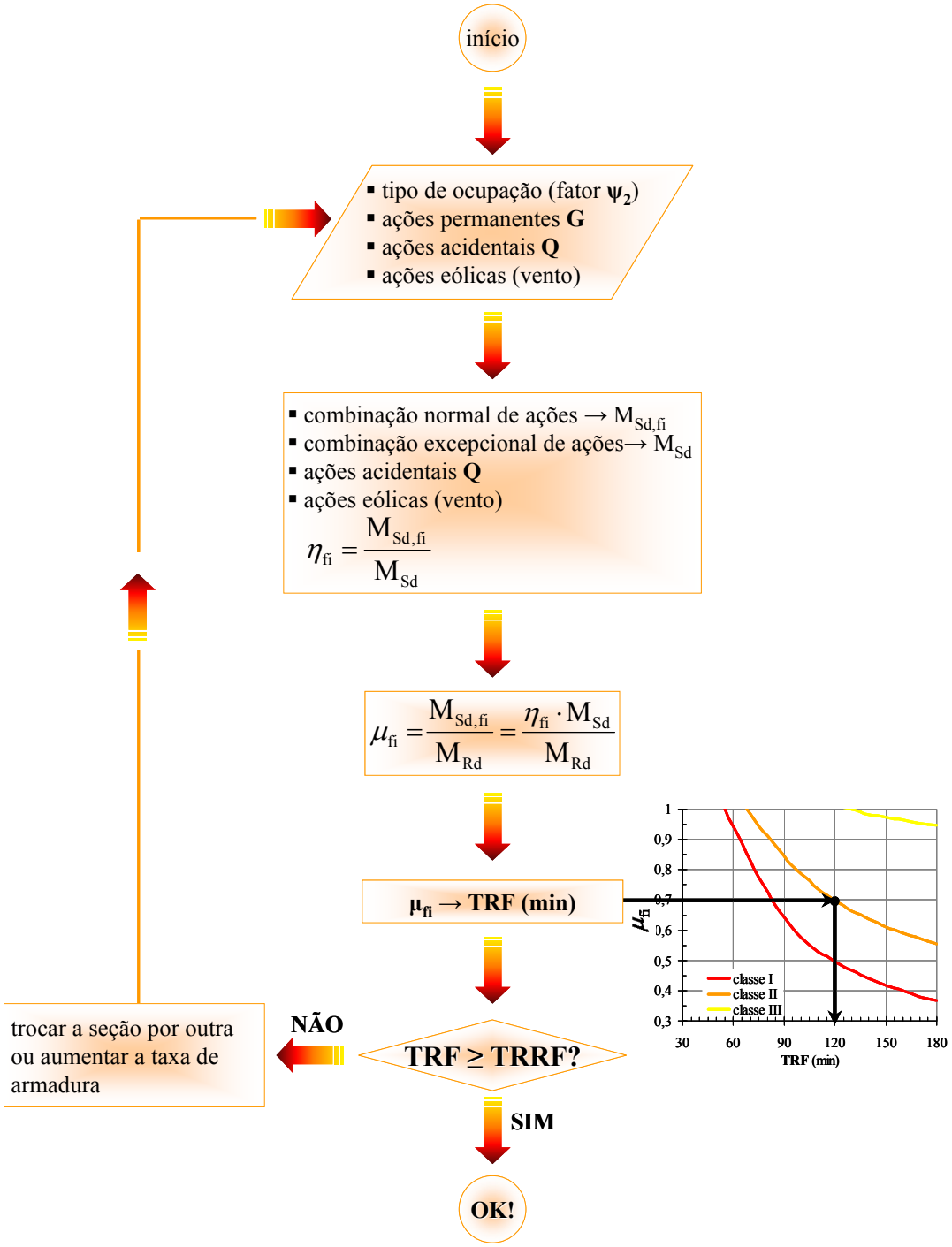

Figura 9.2: Procedimentos para determinar o tempo de resistência ao fogo (TRF) de seções armadas, com o auxílio dos gráficos para o dimensionamento.