4 Ações nas estruturas em situação de incêndio

4.1 Introdução

Dentre as ações que causam esforços nas estruturas à temperatura ambiente, incluem-se: a ação eólica (ventos), a ação sísmica (carga dinâmica), a ação térmica e a ação gravitacional (peso próprio, cargas acidentais). A ação sísmica tem sempre o caráter excepcional; já a ação térmica pode ser considerada uma ação normal ou excepcional, dependendo da freqüência do evento (Figura 4.1).

Em alguns países, a ação térmica devido ao incêndio é mais susceptível após a ação sísmica, uma vez que rupturas de tubulações elétricas e de gás são freqüentemente causadas por deslocamentos súbitos da estrutura devido a abalos sísmicos. Por outro lado, em países como Brasil, a probabilidade de ocorrência da ação sísmica é tão baixa, que a freqüência do incêndio é, relativamente, maior.

O incêndio "acidental"[36] é uma ação transitória com probabilidade de ocorrência muito baixa durante o período de vida útil da estrutura, porém, de efeito catastrófico (NBR 8681:2003); portanto, a ação térmica de incêndios "acidentais" é uma ação excepcional.

Enquanto ação excepcional, o incêndio deve ser considerado em projeto por não haver outros meios eficientes, quer por concepção ou arranjo estrutural, para evitar o sinistro.

Nas situações excepcionais, as estruturas devem atender à necessidade de certos tipos de uso sem restrições durante um curto período de tempo e sofrer uma interrupção de seu uso ou até mesmo a destruição. Considerar a ação excepcional em projeto envolve, tão somente, estabelecer objetivos estratégicos e necessários para a segurança nas ações especiais de resgate e para a restrição da catástrofe (FUSCO, 1993).

O objetivo da segurança contra incêndio é proteger a vida humana durante o sinistro e, portanto, a estrutura deve suportar os efeitos da ação térmica durante a fuga dos ocupantes e

---

[36] As estruturas são projetadas para resistir a incêndios não-intencionais; incêndios propositais provocados por ações criminosas ou terroristas não são excepcionais e, portanto, não são cobertos por projetos que levam em conta a combinação última excepcional de ações.

as ações de combate ao incêndio em segurança.

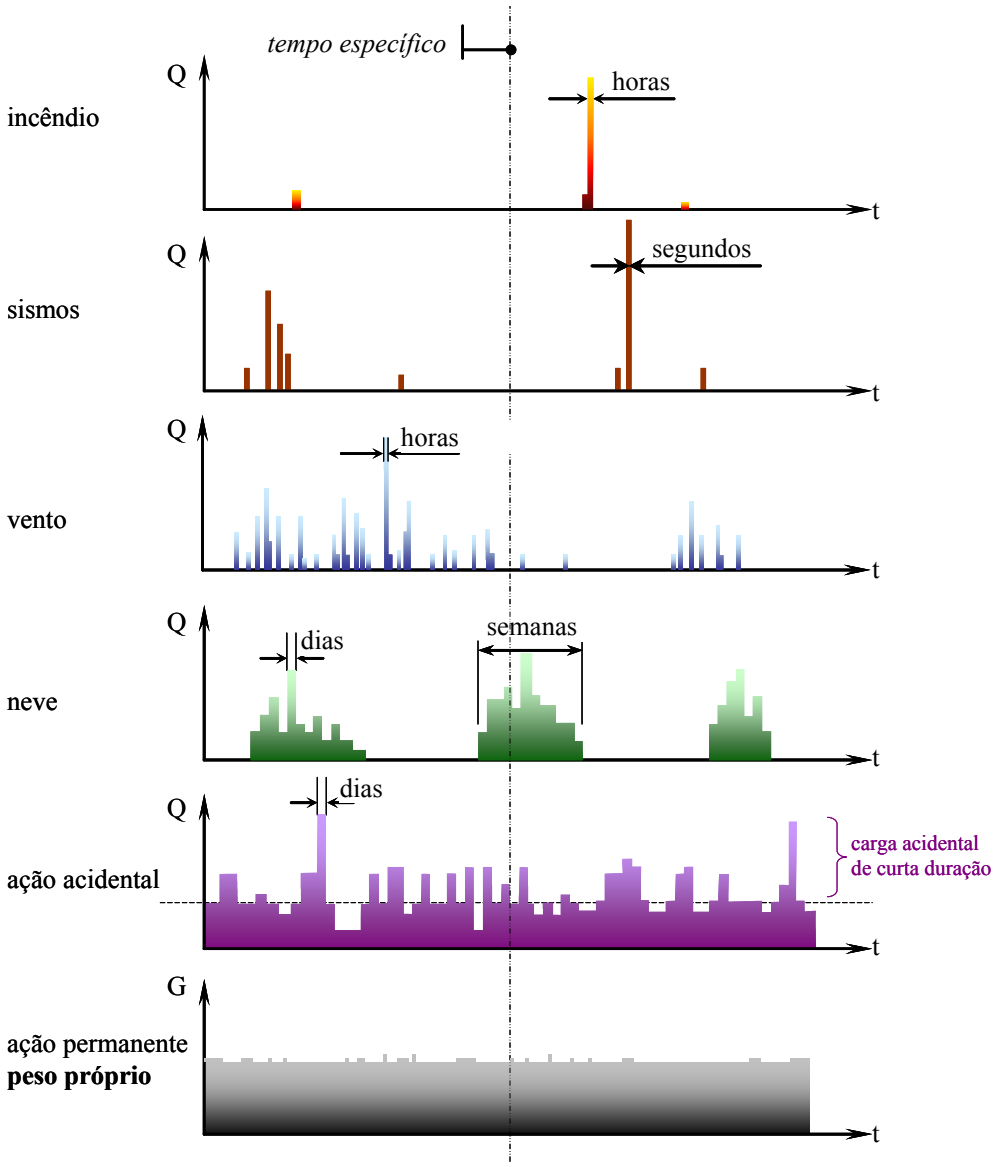

Figura 4.1: Esquematização da freqüência das ações incidentes sobre uma estrutura durante sua vida útil.

Após a ocorrência da ação excepcional, não se espera que a estrutura possa ter a sua ocupação usual antes que se realizem as operações de reabilitação estrutural, manutenção ou, até mesmo, sua substituição (FUSCO, 1993). Assim, deformações excessivas e colapso de partes da estrutura podem ser permitidos durante o incêndio, desde que não coloquem em risco a vida; nesse contexto, a proteção ao patrimônio e ao meio-ambiente são, *a priori*, objetivos secundários da segurança estrutural.

A filosofia de projeto das normas brasileiras baseia-se no conceito de estados limites. A

verificação da estabilidade estrutural em situação de incêndio é feita apenas nos ELU (Estados Limites Últimos) para a combinação excepcional de ações (NBR 6118:2003; NBR 8681:2003; NBR 15200:2004).

Os ELU são aqueles associados ao colapso estrutural ou a ruínas estruturais caracterizadas pela perda de equilíbrio, ruptura por deformação excessiva, formação de mecanismos, ruptura ou perda de estabilidade. Pela simples ocorrência, tais eventos determinam a paralisação parcial ou total do uso da construção (NBR 8681:2003).

Nos ELU, a segurança estrutural é verificada comparando-se o valor de cálculo dos efeitos das ações ao valor de cálculo da capacidade resistente. Para quaisquer combinações de ações, a segurança estrutural é satisfatória quando a eq. (4.1) é satisfeita.

$$S_d \leq R_d \tag{4.1}$$

onde: S_d = valor de cálculo dos efeitos das ações;

R_d = valor de cálculo da capacidade resistente do elemento estrutural, para o estado limite último.

Os efeitos das ações são os esforços solicitantes traduzidos pelo esforço normal atuante (N_{Sd}), pelo momento atuante (M_{Sd}), etc.; por outro lado, a capacidade resistente é traduzida pelo esforço normal resistente (N_{Rd}), pelo momento resistente (M_{Rd}), etc.

4.2 Ações mecânicas

As ações mecânicas incidentes na situação excepcional compreendem as ações permanentes, as ações excepcionais de origem térmica e as ações variáveis que não possam ser desprezadas da ocorrência simultânea; suas influências conduzem a uma única combinação de ações na qual as ações variáveis normais são as ações de acompanhamento (FUSCO, 1993).

As ações permanentes[37] compreendem a ação gravitacional incidente sobre a massa das

[37] As ações permanentes são aquelas que ocorrem com valores praticamente constantes ao longo de toda a vida útil da construção e também aquelas que crescem ao longo do tempo, tendendo a um valor limite (NBR 6118:2003).

estruturas, i.e., o peso próprio das estruturas, dos elementos construtivos sem caráter estrutural e dos equipamentos fixos; os empuxos devido ao peso próprio do solo não-removível; os efeitos de deformações devido à protensão; enfim, todas as ações cuja variabilidade no tempo é desprezável e, portanto, estarão presentes durante a situação excepcional do incêndio.

As ações variáveis compreendem as ações acidentais das construções, i.e., as ações que atuam nas construções em função de seu uso (pessoas, mobiliário, veículos, materiais diversos, etc.), as ações hidrostáticas, enfim, todas as ações cuja variabilidade no tempo é grande[38], mas que podem estar presentes durante um evento excepcional (NBR 8681:2003).

Exemplos de ações variáveis especiais na situação de incêndio são aquelas decorrentes do impacto causado pelo colapso de um elemento estrutural ou equipamentos pesados; nesse caso, a ação do impacto incide sobre elementos frios adjacentes ao compartimento de incêndio do edifício.

Após o colapso localizado, os efeitos do impacto são ações variáveis adicionais que ocorrem apenas durante o incêndio, sobre os elementos frios de pavimentos adjacentes inferiores ao compartimento de incêndio. Essas ações podem ser levadas em conta se a estabilidade global do edifício for comprometida por um colapso localizado (EN 1991-1-2:2002), por ex., uma laje de piso suportar o impacto da queda de uma viga ou da laje do pavimento superior durante o sinistro.

Dentre as demais ações variáveis, a NBR 8681:2003 e o EN 1991-1-2:2002 permitem desprezar a ação eólica ocorrendo simultaneamente na presença da ação excepcional do incêndio (Figura 4.2).

Ações excepcionais de origem térmica compreendem as ações mecânicas qualificadas de ações indiretas, i.e., esforços adicionais "despertados" pelo impedimento às deformações térmicas em estruturas isostáticas e hiperestáticas, às dilatações térmicas de elementos adjacentes e às dilatações térmicas que afetam outros elementos fora do compartimento de incêndio[39], e pelas tensões internas devido a gradientes térmicos desenvolvidos ao longo de seções transversais (EN 1991-1-2:2002), mesmo em estruturas isostáticas.

---

[38] As ações variáveis são aquelas cuja probabilidade de ocorrência é de 25% a 35%, no sentido desfavorável, durante a vida útil de 50 anos (NBR 6118:2003).

[39] Por ex., deslocamento do topo de pilares devido à dilatação térmica de lajes e vigas ou de cabos suspensos (EN 1991-1-2:2002).

Os valores característicos das ações permanentes decorrentes da ação gravitacional (peso próprio da estrutura, paredes, painéis permanentes e revestimentos), e das ações acidentais decorrentes da ocupação do compartimento (mobiliário, pessoas, materiais móveis) são definidos pela NBR 6120:1980.

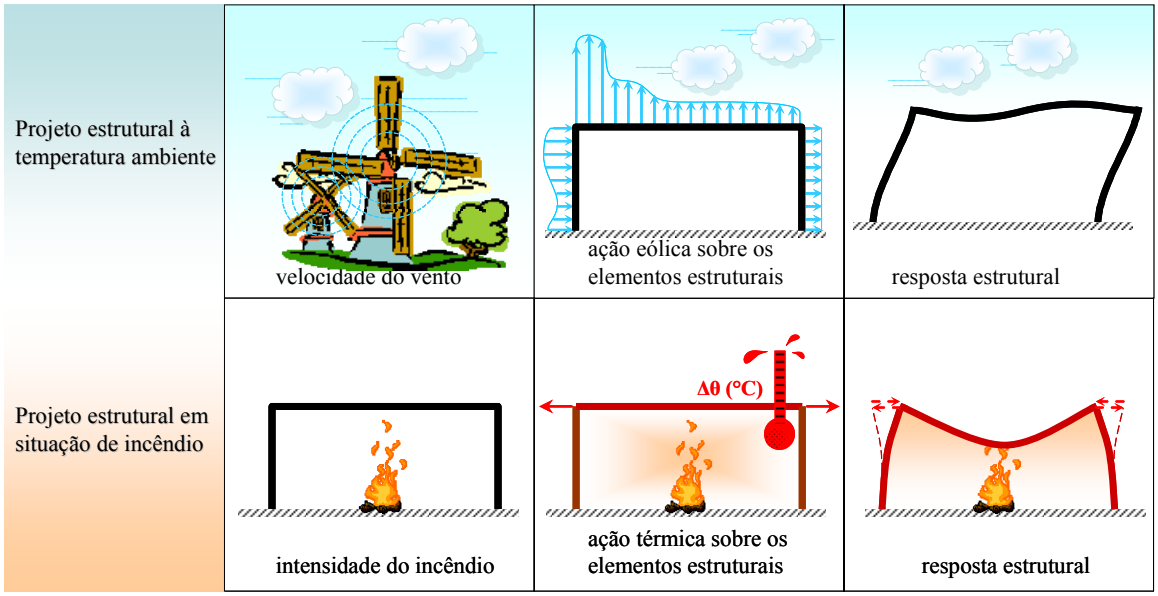

Figura 4.2: Resposta estrutural à ação eólica e à ação térmica devido ao incêndio.

4.2.1 Combinação última excepcional de ações

A NBR 8681:2003 fornece a eq. (4.2) para o cálculo das combinações últimas excepcionais.

$$F_d = \sum_{i=1}^{m} \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + \gamma_q \cdot \sum_{j=1}^{n} \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k} \tag{4.2}$$

onde: F_d = valor de cálculo das combinações últimas excepcionais;

$F_{Gi,k}$ = valor característico das ações permanentes;

$F_{Q,exc}$ = valor da ação excepcional considerada;

$F_{Qj,k}$ = valor característico das ações variáveis para a situação excepcional considerada;

γ_{gi} = coeficiente de ponderação das ações permanentes para a situação excepcional considerada (Tabela 4.1);

γ_q = coeficiente de ponderação das ações variáveis para a situação excepcional

considerada (Tabela 4.1);

$\psi_{0j,ef}$ = fator de combinação efetivo de cada uma das demais variáveis "$F_{Qj,k}$" que podem agir simultaneamente com a ação principal $F_{Q,exc}$, durante a situação excepcional (Tabela 4.2).

Tabela 4.1: Coeficientes de ponderação das ações para combinações últimas (NBR 8681:2003).

Tipo de estrutura	**γ_g** ações permanentes diretas agrupadas				**γ_q** ações variáveis consideradas conjuntamente	
	situação normal		**situação excepcional**		**normal**	**excepcional**
	favorável	**desfavorável**	**favorável**	**desfavorável**		
Edificações tipo 1*	1,0	1,35 ou 1,2‡	1,0 ou 0‡	1,15 ou 0‡	1,5 ou 1,2‡‡	1,0 ou 0‡‡
Edificações tipo 2**	1,0	1,40 ou 1,2‡	1,0 ou 0‡	1,20 ou 0‡	1,4 ou 1,2‡‡	

Nota: * As cargas acidentais superam 5 kN/m².
** As cargas acidentais não superam 5 kN/m².
‡ Recalques de apoio e retração.
‡‡ Variação térmica à temperatura ambiente.

Tabela 4.2: Fatores de combinação ($\psi 0$) e de redução ($\psi 2$) para as ações variáveis em edifícios (NBR 8681:2003).

Condição do local	ψ_0	ψ_2*	$0{,}7 \cdot \psi_2$
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).	0,5	0,3	0,21
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).	0,7	0,4	0,28
Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens.	0,8	0,6	0,42
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral.	0,6	0	0
Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,3	—

Nota: * Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, $\psi_2 = 0$.

Em situação de incêndio, a ação excepcional "$\mathbf{F_{Q,exc}}$" é a ação térmica que induz a redução das propriedades mecânicas dos materiais e o aparecimento de esforços adicionais nas estruturas, devido às restrições às deformações térmicas.

Na situação excepcional, o fator de combinação efetivo de cada uma das demais variáveis ($\psi_{0j,ef}$) é assumido igual o valor dos fatores de redução correspondentes à combinação quase-permanente (ψ_{2j}). O produto $\psi_{2j} \cdot F_{qj,k}$ é o valor reduzido de combinação de cada uma das demais ações variáveis (NBR 8681:2003; Figura 4.3).

Particularmente, para a situação de incêndio, o fator da combinação quase-permanente é multiplicado por 0,7 (Tabela 4.2; NBR 8681:2003; NBR 15200:2004), i.e., $\psi_{0j,ef} = 0{,}7 \cdot \psi_{2j}$

(eq. 4.3); trata-se da parcela quase-permanente da ação acidental para a situação de incêndio.

$$F_{d,fi} = \sum_{i=1}^{m} \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + \gamma_q \cdot \sum_{j=1}^{n} 0{,}7 \cdot \psi_{2j} \cdot F_{Qj,k} \tag{4.3}$$

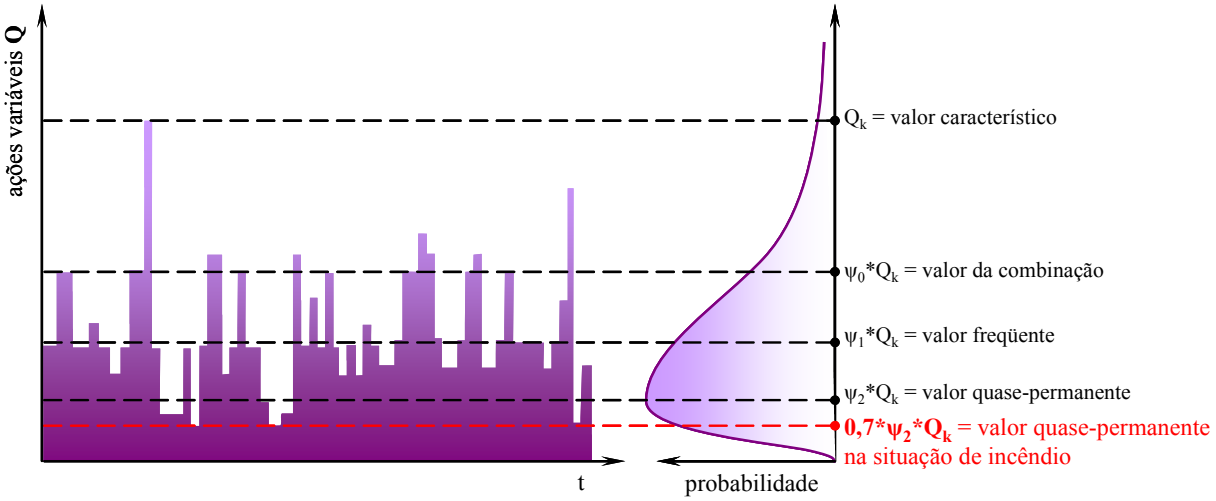

Figura 4.3: Valores efetivos da ação variável na combinação de ações.

Com o aumento da temperatura do concreto armado, a resistência e a rigidez do elemento estrutural aquecido são reduzidas e os esforços adicionais decorrentes da dilatação e gradientes térmicos tendem, *a priori*, a aumentar e, *a posteriori*, a reduzir quando somados às solicitações de origem gravitacional; por outro lado, a capacidade de rotulação plástica e de acomodação do elemento ao sistema estrutural aumenta simultaneamente à redução das propriedades mecânicas do elemento.

A NBR 15200:2004 permite desprezar os efeitos dos esforços adicionais de origem térmica no projeto. Desprezar ou não os efeitos das ações indiretas excepcionais é uma decisão que depende das dimensões do elemento singular associadas ao arranjo estrutural, por ex., uma extensa laje de piso sem juntas de dilatação, grandes vãos contínuos; nesses casos, é preciso calcular esses esforços empregando-se, eventualmente, métodos gerais ou experimentais de cálculo.

O efeito da dilatação térmica e a movimentação horizontal de grandes pavimentos sobre seus apoios deveriam ser levados em conta, mesmo quando os métodos tabulares ou simplificados forem usados.

Quando as ações indiretas de origem térmica podem ser desprezadas, a ação térmica é

traduzida apenas pela redução da resistência dos materiais e da capacidade de suporte dos elementos no projeto estrutural. Nesse caso, a eq. (4.3) poderá ser substituída pela eq. (4.4) para o cálculo das combinações últimas excepcionais.

$$F_{d,fi} = \gamma_g \cdot F_{Gk} + \gamma_q \cdot \sum_{j=2}^{n} 0{,}7 \cdot \psi_{2j} \cdot F_{qj,k} \tag{4.4}$$

onde: $F_{d,fi}$ = valor de cálculo das combinações últimas excepcionais para a situação de incêndio;

F_{Gk} = valor característico da soma das ações permanentes;

$F_{qj,k}$ = valor característico das ações variáveis "j" para a situação excepcional de incêndio;

γ_g = coeficiente de ponderação das ações permanentes para a situação excepcional de incêndio (Tabela 4.1);

ψ_{2j} = fator de combinação efetivo de cada uma das variáveis "$F_{qj,k}$" que podem agir simultaneamente com as demais ações durante a situação excepcional de incêndio (Tabela 4.2).

4.2.1.1 Fator de combinação efetivo de cada uma das ações variáveis (ψ_{2j})

Uma combinação de ações é caracterizada pela combinação de vários eventos aleatórios em função do tempo, para os quais existem diversos modelos estatísticos. Para avaliar a confiabilidade estrutural, sobrepõem-se os valores reduzidos desses eventos a fim de evitar valores exageradamente conservadores (Figura 4.1).

Usualmente, as ações são variáveis aleatórias sujeitas a uma distribuição normal para as cargas permanentes, e a uma distribuição de Gumbel para cargas variáveis. Contudo, a combinação mais desfavorável de ações depende não somente da distribuição de probabilidade, mas também, do estado limite considerado e da estrutura analisada, i.e., cada caso é um caso!

Por questões de simplicidade, cada ação variável secundária ($F_{Qj,k}$) é considerada independente das demais ações que atuam simultaneamente sobre a estrutura.

Vide o exemplo didático de Calgaro (2002), para ilustrar o cálculo aproximado do fator de combinação (ψ_0) de uma ação variável em uma viga isostática solicitada por duas ações

(Figura 4.4), “q” (carregamento distribuído uniforme) e “Q” (carga concentrada), similares a duas variáveis aleatórias X e Y independentes, de mesmo sinal (por ex., ambas são “positivas”) e sujeitas a uma distribuição normal, com as respectivas funções de densidade de probabilidade p(X) e p(Y).

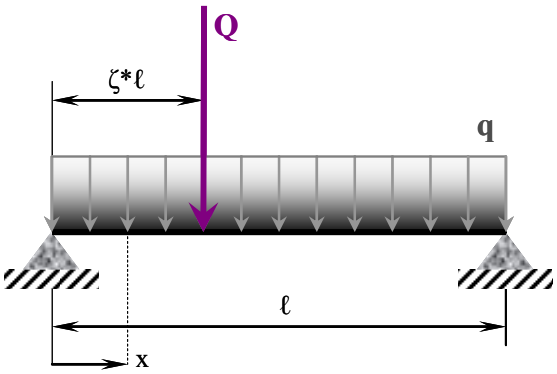

Figura 4.4: Viga isostática solicitada a uma ação concentrada variável “Q” e a uma ação permanente distribuída uniforme “q”.

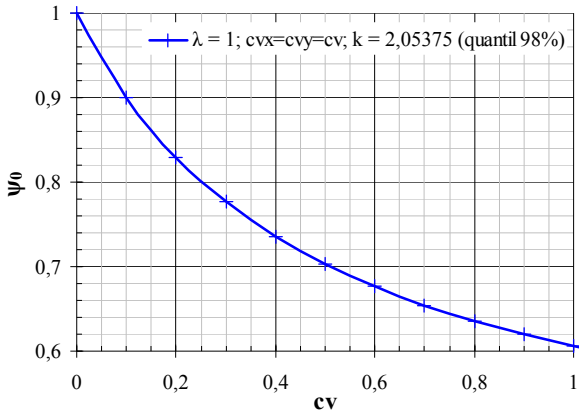

Figura 4.5: Fator de combinação (ψ_0) da ação variável “Q” em função do coeficiente de variação das ações para a viga isostática.

Embora as ações acidentais sejam representadas pela distribuição de probabilidade de Gumbel, própria para valores máximos, sempre é possível construir uma distribuição normal equivalente e impor caudas de máximos equivalentes.

Assumindo-se que os efeitos das ações sobre a estrutura são funções lineares dessas ações, o carregamento resultante é definido por $Z = a \cdot X + b \cdot Y$, onde os coeficientes “a” e “b” representam as influências de X e Y na ação “Z” sob o risco de atingir o estado limite.

O momento solicitante no ponto genérico de abscissa “x” é calculado por:

$$M(x) = \left(\frac{\ell \cdot x - x^2}{2}\right) \cdot q + \cdot x \cdot (1 - \zeta) \cdot Q$$
$$0 \le x \le \zeta \cdot \ell \qquad (4.5)$$
$$0 \le \zeta \le 1$$

Admitindo, como usual, que as variáveis aleatórias X e Y e a soma $Z = X + Y$ têm valor característico X_k, Y_k e Z_k, correspondente ao mesmo quantil “k”, têm-se as eqs. (4.6) e (4.7).

$$X_k = \mu_X + k \cdot \sigma_X$$
$$Y_k = \mu_Y + k \cdot \sigma_Y \tag{4.6}$$

onde: X_k = valor característico "k" da variável aleatória X;

Y_k = valor característico "k" da variável aleatória Y;

μ_X = média da variável X;

μ_Y = média da variável Y;

σ_X = desvio-padrão da variável X;

σ_Y = desvio-padrão da variável Y;

k = índice dos valores característicos das variáveis aleatórias X e Y, igual a 2,05375 para o quantil de 98%.

$$Z_k = \mu_X + \mu_Y + k \cdot \sqrt{\sigma_X{}^2 + \sigma_Y{}^2} \neq \mu_X + k \cdot \sigma_X + \mu_Y + k \cdot \sigma_Y \tag{4.7}$$

onde: $\mu_Z = \mu_X + \mu_Y$;

$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_X{}^2 + \sigma_Y{}^2}$.

Então a $\mathrm{Prob}(X > X_k) = \mathrm{Prob}(Y > Y_k) = \mathrm{Prob}(Z > Z_k) = \Phi(-k) = 1 - \Phi(k)$, onde $\Phi(k)$ é a função de distribuição normal reduzida; para o quantil de 98%, k = 2,05375. De fato, $Z_k < X_k + Y_k$, pois (Tabela 4.3):

Tabela 4.3: Desvio-padrão das variáveis aleatórias X e Y e a soma $Z = X + Y$.

σ_X	σ_Y	$\sigma_X + \sigma_Y$	$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_X{}^2 + \sigma_Y{}^2}$
1	1	2	$\sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2} < 2$
2	2	4	$\sqrt{2^2 + 2^2} = 2 \cdot \sqrt{2} < 4$

Portanto, é necessário definir uma equação para calcular Z_k em função de X_k e Y_k, a qual pode ser a eq. (4.8) ou a eq. (4.9). Substituindo a eq. (4.8) na eq. (4.9), pode-se calcular o fator de combinação (ψ_0) da variável aleatória Y em função do desvio-padrão (eq. 4.10) ou do coeficiente de variação (eq. 4.11).

$$Z_k = \mu_X + k \cdot \sigma_X + \mu_Y + k \cdot \sigma_Y - k \cdot \left[\left(\sigma_X + \sigma_Y \right) - \sqrt{\sigma_X^{\ 2} + \sigma_Y^{\ 2}} \right] \tag{4.8}$$

$$Z_k = X_k + \psi_0 \cdot Y_k = \mu_X + k \cdot \sigma_X + \psi_0 \cdot \left(\mu_Y + k \cdot \sigma_Y \right) \tag{4.9}$$

$$\mu_X + k \cdot \sigma_X + \mu_Y + k \cdot \sigma_Y - k \cdot \left[\left(\sigma_X + \sigma_Y \right) - \sqrt{\sigma_X^{\ 2} + \sigma_Y^{\ 2}} \right] = \mu_X + k \cdot \sigma_X + \psi_0 \cdot \left(\mu_Y + k \cdot \sigma_Y \right) \tag{4.10}$$

$$\mu_Y + k \cdot \sigma_Y + k \cdot \left[\sqrt{\sigma_X^{\ 2} + \sigma_Y^{\ 2}} - \left(\sigma_X + \sigma_Y \right) \right] = \psi_0 \cdot \left(\mu_Y + k \cdot \sigma_Y \right)$$

$$\therefore \psi_0 = \frac{\mu_Y + k \cdot \left[\sqrt{\sigma_X^{\ 2} + \sigma_Y^{\ 2}} - \sigma_X \right]}{\mu_Y + k \cdot \sigma_Y}$$

onde: ψ_0 = Fator de combinação da ação variável Y.

$$\psi_0 = \frac{\mu_Y + k \cdot \left[\sqrt{\sigma_X^{\ 2} + \sigma_Y^{\ 2}} - \sigma_X \right]}{\mu_Y + k \cdot \sigma_Y} = \frac{\dfrac{\mu_Y + k \cdot \left[\sqrt{\sigma_X^{\ 2} + \sigma_Y^{\ 2}} - \sigma_X \right]}{\mu_Y}}{\dfrac{\mu_Y + k \cdot \sigma_Y}{\mu_Y}} \tag{4.11}$$

$$\psi_0 = \frac{1 + k \cdot \left[\sqrt{\dfrac{\sigma_X^{\ 2} + \sigma_Y^{\ 2}}{\mu_Y^{\ 2}}} - \dfrac{\sigma_X}{\mu_Y} \right]}{1 + k \cdot \dfrac{\sigma_Y}{\mu_Y}} = \frac{1 + k \cdot \left[\sqrt{\dfrac{\sigma_X^{\ 2}}{\mu_Y^{\ 2}} + \dfrac{\sigma_Y^{\ 2}}{\mu_Y^{\ 2}}} - \dfrac{\sigma_X}{\mu_Y} \right]}{1 + k \cdot \dfrac{\sigma_Y}{\mu_Y}}$$

$$\psi_0 = \frac{1 + k \cdot \left[\sqrt{\lambda^2 \cdot \dfrac{\sigma_X^{\ 2}}{\mu_X^{\ 2}} + \dfrac{\sigma_Y^{\ 2}}{\mu_Y^{\ 2}}} - \lambda \cdot \dfrac{\sigma_X}{\mu_X} \right]}{1 + k \cdot \dfrac{\sigma_Y}{\mu_Y}}$$

$$\therefore \psi_0 = \frac{1 + k \cdot \left[\sqrt{\lambda^2 \cdot cv_X^{\ 2} + cv_Y^{\ 2}} - \lambda \cdot cv_X \right]}{1 + k \cdot cv_Y}$$

onde: $\lambda = \dfrac{\mu_X}{\mu_y}$;

$cv_X = \dfrac{\sigma_X}{\mu_X}$ = coeficiente de variação da variável aleatória X;

$$cv_Y = \frac{\sigma_Y}{\mu_Y}$$ = coeficiente de variação da variável aleatória Y.

A eq. (4.12) é um caso particular da eq. (4.11), quando $\lambda = 1$ (i.e., $\mu_X = \mu_Y$) e $cv_X = cv_Y = cv$. Para esse caso, a Figura 4.5 ilustra o fator ψ_0 de combinação da ação variável Y em função do coeficiente de variação (cv) de X e Y para k = 2,05375 (quantil de 98%).

$$\psi_0 = \frac{1 + k \cdot cv \cdot \left(\sqrt{2} - 1\right)}{1 + k \cdot cv} \tag{4.12}$$

Uma extensiva análise paramétrica estatística realizada pelo CEN (2001) *apud* Holický & Schleich (2005) mostrou que o maior nível de confiabilidade uniforme e satisfatória da combinação excepcional para a situação de incêndio é conseguido quando $\psi_{2j} = 0{,}3$. Valores de $\psi_{2j} < 0{,}3$ conduzem a uma confiabilidade baixa e insatisfatória, *a priori*, para os elementos estruturais de aço (HOLICKÝ & SCHLEICH, 2005).

Holický & Schleich (2005) ressaltam que são necessários estudos adicionais de calibração para especificar os valores confiáveis de ψ_{2j} para as estruturas de concreto e de madeira, mas pontuam que o uso de $\psi_{2j} < 0{,}3$ deveria ser analisado com mais cuidado.

4.2.2 Combinação última normal de ações

A NBR 8681:2003 fornece a eq. (4.13), para o cálculo das combinações últimas normais.

$$F_d = \sum_{i=1}^{m} \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_{\varepsilon g} \cdot F_{\varepsilon g,k} + \gamma_q \cdot \left(F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^{n} \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k} \right) + \gamma_{\varepsilon q} \cdot \psi_{0\varepsilon} \cdot F_{\varepsilon q,k} \tag{4.13}$$

onde: F_d = valor de cálculo das combinações últimas normais;

$F_{Q1,k}$ = valor característico da ação variável considerada como ação principal para a combinação;

$F_{Qj,k}$ = valor característico das ações variáveis para a combinação;

$F_{\varepsilon g,k}$ = valor característico das ações indiretas permanentes devido à retração;

$F_{\varepsilon q,k}$ = valor característico das ações indiretas variáveis devido à temperatura, na situação normal de uso;

$\gamma_{\varepsilon g}$ = coeficiente de ponderação das ações permanentes devido à retração para a situação normal igual a 1,2 (NBR 6118:2003);

$\gamma_{\varepsilon q}$ = coeficiente de ponderação das ações variáveis devido à variação térmica para a situação normal igual a 1,2 (NBR 6118:2003);

$\psi_{0j,ef}$ = fator de combinação para cada uma das demais variáveis "$F_{Qj,k}$" que podem agir simultaneamente com a ação principal $F_{Q1,k}$ (Tabela 4.2)

Para as situações em que as cargas permanentes são devidas apenas à ação gravitacional e há apenas a ação variável principal, a eq. (4.13) é substituída pela eq. (4.14).

$$F_d = \gamma_g \cdot F_{Gk} + \gamma_q \cdot F_{Q1,k} \tag{4.14}$$

onde: γ_g = coeficiente de ponderação das ações permanentes para a situação excepcional considerada (Tabela 4.1);

γ_q = coeficiente de ponderação para as ações das ações variáveis para a situação excepcional considerada (Tabela 4.1).

4.2.3 Relação entre as combinações últimas excepcionais e normais de ações

Pode-se estabelecer uma relação entre as combinações últimas excepcionais (eq. 4.3) e normais (eq. 4.13), por meio de um fator de redução para as ações excepcionais em situação de incêndio:

$$\eta_{fi} = \frac{F_{d,fi}}{F_d} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + \gamma_q \cdot \sum_{j=1}^{n} 0{,}7 \cdot \psi_{2j} \cdot F_{Qj,k}}{\sum_{i=1}^{m} \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_{\varepsilon g} \cdot F_{\varepsilon g,k} + \gamma_q \cdot \left(F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^{n} \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k} \right) + \gamma_{\varepsilon q} \cdot \psi_{0\varepsilon} \cdot F_{\varepsilon q,k}} \tag{4.15}$$

onde: η_{fi} = fator de redução do valor de cálculo da combinação última normal para obter a combinação última excepcional em situação de incêndio[40] [adimensional];

[40] Os coeficientes de ponderação das ações permanentes e variáveis do numerador pertencem à combinação excepcional, enquanto os do denominador, pertencem à combinação normal de ações.

Para as estruturas apenas sob a ação gravitacional, cujas cargas permanentes possuem o mesmo coeficiente de ponderação (γ_g) e cujas cargas variáveis são constituídas de apenas cargas acidentais, também com o mesmo coeficiente de ponderação (γ_q), a eq. 4.15 é simplificada:

$$\eta_{fi} = \frac{F_{d,fi}}{F_d} = \frac{\gamma_g \cdot F_{Gk} + \gamma_q \cdot 0{,}7 \cdot \psi_{2j} \cdot F_{Q1,k}}{\gamma_g \cdot F_{Gk} + \gamma_q \cdot F_{Q1,k}} = \frac{1{,}2 + 0{,}7 \cdot \psi_{2j} \cdot \xi}{1{,}4 + 1{,}4 \cdot \xi} \tag{4.16}$$

$$\xi = \frac{F_{Q1,k}}{F_{Gk}}$$

onde: ξ = relação entre os valores característicos da ação variável e das ações permanentes [adimensional].

O valor de cálculo das ações para a situação excepcional é menor do que para a situação normal de uso. A possibilidade da presença de todas as ações simultâneas durante um evento excepcional é muito baixa, justificando o valor do fator de redução $\eta_{fi} < 0{,}9$ (Figura 4.6).

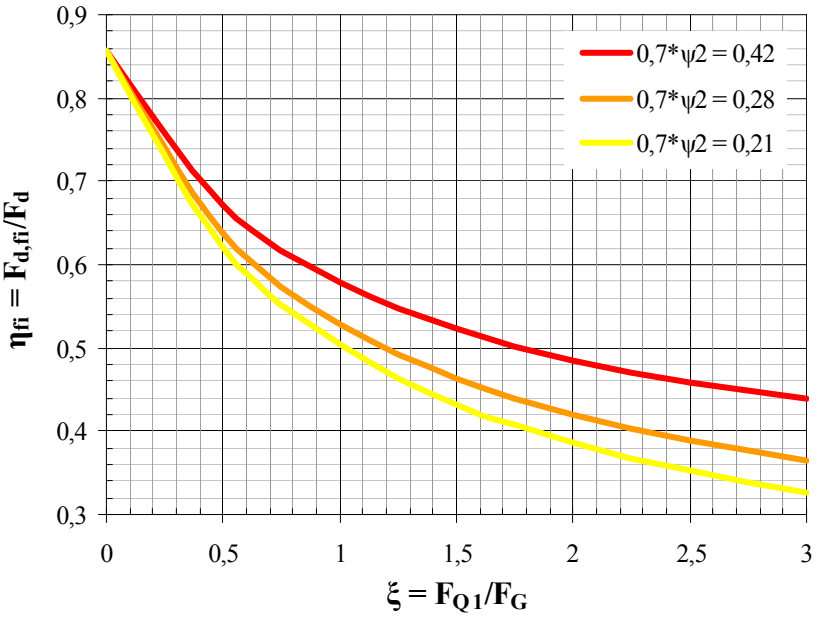

Figura 4.6: Variação do fator de redução η_{fi} com a ação variável principal relativa ξ.

ξ significa o nível de carregamento acidental; quanto maior a ação variável principal, em relação à permanente, menor será o valor de cálculo da ação total na estrutura em situação de incêndio (Figura 4.6).

Em geral, a eq. (4.16) e Figura 4.6 prestam-se apenas às lajes, onde a ação dos ventos é desprezada no cálculo das combinações últimas normais de ações. Para as estruturas correntes, pode-se adotar, à favor da segurança, η_{fi} = 0,7 (EN 1992-1-2:2004, NBR 15200:2004). Nem sempre tal simplificação é econômica!

Costa (2002), Costa & Silva (2002) e Costa & Silva (2005b) verificaram a tendência do η_{fi} < 0,7 para as lajes de concreto armado de um edifício comercial, projetado conforme as NBR 6118:2003 e NBR 8681:2003. As lajes são os elementos mais leves de um edifício e apresentam os maiores níveis de carregamento acidental, i.e., $\xi \geq 0{,}5$ (Figura 4.6).

A simplificação é oportuna para sistemas estruturais complexos calculados por métodos manuais ou semi-manuais, onde η_{fi} = 0,7 é uma estimativa segura e justificável por evitar, sobremaneira, a repetição de inúmeros cálculos dos efeitos[41] das ações sobre as estruturas para a situação de incêndio (FRANSSEN & ZAHARIA, 2005).

Em vigas e pilares componentes de pórticos do edifício, a ação dos ventos está presente nas combinações últimas normais de ações, sendo necessário usar a equação geral da combinação normal de ações no denominador.

Em estruturas muito simples e fáceis de calcular, os efeitos das ações na situação de incêndio podem ser determinados pelo valor preciso da combinação última excepcional reduzida (eq. 4.4) ou completa (eq. 4.3) quando há mais de uma ação variável simultânea que não possa ser desprezada nas combinações últimas excepcionais da situação de incêndio.

Em estruturas complexas, o cálculo dos efeitos das ações tem sido, atualmente, realizado por meio de *softwares* específicos, que permitem facilmente analisar os efeitos de diferentes combinações de ações no projeto estrutural.

A segurança estrutural para a situação de incêndio é definida pela desigualdade:

$$S_{d,fi} \leq R_{d,fi} \tag{4.17}$$

onde: $S_{d,fi}$ = valor de cálculo dos efeitos das ações mecânicas em situação de incêndio (eq. 4.18);

$R_{d,fi}$ = valor de cálculo da capacidade resistente do elemento estrutural em situação de

[41] Esforços resistentes, tais como: os esforços normais e de cisalhamento, momentos fletores e torçores.

incêndio (eq. 4.19).

O coeficientes de ponderação γ_g e γ_q e o fator de combinação ψ_{2j} da variável principal e das ações variáveis "j" (eq. 4.18), que não podem ser desprezadas, são próprios da combinação excepcional de ações aplicáveis à situação de incêndio.

$$S_{d,fi} = S\left(\gamma_g \cdot F_{Gk} + \gamma_q \cdot \sum_{2}^{n} 0{,}7 \cdot \psi_{2j} \cdot F_{Qjk}\right) \tag{4.18}$$

$$R_{d,fi} = R\left(f_{cd,\theta}, f_{yd,\theta}, f_{pyd,\theta}, b, h, \phi\right) \tag{4.19}$$

onde: $f_{cd,\theta}$, $f_{yd,\theta}$ e $f_{pyd,\theta}$ = valores de cálculo da resistência dos materiais concreto, aço de armaduras passiva e ativa, respectivamente, à temperatura elevada θ;

b, h, ø = dimensões da seção transversal do concreto e das armaduras, para o cálculo da capacidade resistente.

$R_{d,fi}$ é variável em função da temperatura. No início do aquecimento, $R_{d,fi} > R_d$ porque os coeficientes de ponderação da resistência dos materiais para a situação de incêndio são menores que aqueles para a situação normal. A medida que a temperatura se eleva com o decorrer do tempo, $R_{d,fi}$ se reduz. O TRF (tempo de resistência ao fogo) da estrutura é estabelecido quando $R_{d,fi} = S_{d,fi}$ (Figura 4.7).

O TRF é o tempo máximo de resistência, a partir do qual, a estrutura deixa de assegurar a sua resistência ao fogo, segundo o critério de estabilidade estrutural. Existem outros critérios de resistência ao fogo relativos à outras funções dos elementos construtivos para os quais o TRF pode ser estabelecido (Cap. 6, Figura 6.1; Cap. 8, item 8.3.4.2).

O fator η_{fi} (eqs. 4.15 ou 4.16) não representa o nível de carregamento da estrutura, nem informa se a capacidade da estrutura está totalmente esgotada, por ex., $S_{d,fi} = R_{d,fi}$ ou $S_{d,fi} < R_{d,fi}$.

O nível de carregamento compara o efeito das ações em situação de incêndio à resistência da estrutura em situação normal (eq. 4.20).

$$\mu_{fi} = \frac{S_{d,fi}}{R_d} \tag{4.20}$$

onde: μ_{fi} = nível do carregamento aplicado para a situação de incêndio [adimensional];

R_d = valor de cálculo da resistência da estrutura para a situação normal.

Devido à correlação entre ambos (eq. 4.21), μ_{fi} e η_{fi} podem ser confundidos se a estrutura for solicitada à capacidade resistente máxima na situação normal, pois $S_d = R_d$ e, portanto, $\mu_{fi} = \eta_{fi}$. Tal condição tem sido adotada na construção de métodos práticos de cálculo de elementos de concreto (EN 1992-1-2:2004; NBR 15200:2004; vide Cap. 9, item 9.3), para facilitar o dimensionamento em situação de incêndio, sem a necessidade de cálculo da capacidade resistente à temperatura elevada.

$$\mu_{fi} = \frac{S_{d,fi}}{R_d} = \frac{\eta_{fi} \cdot S_d}{R_d} \tag{4.21}$$

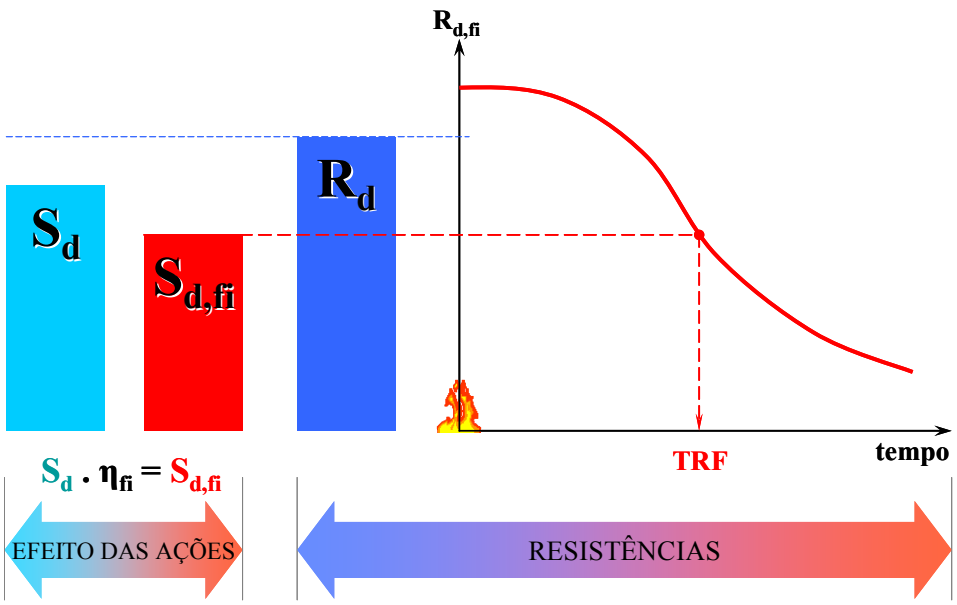

Figura 4.7: Nível de carregamento em situação de incêndio.

4.3 Resistência dos materiais

A resistência de um material é a sua aptidão de suportar tensões. Em geral, admite-se que a medida dessa aptidão seja a própria resistência (NBR 8681:2003).

Tanto à temperatura ambiente, como a temperaturas elevadas, a resistência é determinada pela máxima tensão aplicável a um corpo-de-prova do material, sem o aparecimento de fenômenos peculiares ao comportamento do próprio material demonstrados por ruptura ou deformação excessiva.

A resistência dos materiais é representada por valores característicos, correspondentes ao quantil de 5% de probabilidade de não serem atingidos pelas amostras de um dado lote.

À temperatura ambiente, o valor de cálculo da resistência usado no dimensionamento da estrutura é dado por:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \tag{4.22}$$

onde: f_d = valor de cálculo da resistência do material para a situação normal ou de serviço;

f_k = valor característico da resistência do material;

γ_m = coeficiente de ponderação da resistência do material (Tabela 4.4).

Tabela 4.4: Coeficientes de ponderação das resistências no ELU (NBR 6118:2003; NBR 15200:2004).

Materiais	Coeficientes de ponderação γ_m	Combinações últimas	
		Normais	Excepcionais
concreto	γ_c	1,4	1,2
aço	γ_s	1,15	1,0

À temperatura elevada, a resistência dos materiais e o módulo de elasticidade são modificados pela ação do calor. Para os materiais estruturais usados na Construção Civil, os efeitos da ação térmica são considerados por meio dos fatores de redução da resistência, para ambos os valores característico (eq. 4.23) e de cálculo (eq. 4.24), e do módulo de elasticidade (eq. 4.25), em função da temperatura.

$$f_{k,\theta} = \kappa_{m,\theta} \cdot f_k \tag{4.23}$$

onde: $f_{k,\theta}$ = valor característico da resistência do material à temperatura elevada θ;

$\kappa_{m,\theta}$ = fator de redução da resistência do material em função da temperatura elevada θ

[adimensional].

$$f_{d,\theta} = \kappa_{m,\theta} \cdot f_d = \kappa_{m,\theta} \cdot \frac{f_k}{\gamma_m} \tag{4.24}$$

onde: $f_{d,\theta}$ = valor de cálculo da resistência do material à temperatura elevada θ;

f_d = valor de cálculo da resistência do material para a situação excepcional.

Observa-se que os valores dos coeficientes de ponderação da resistência dos materiais (γ_m) para a situação excepcional são menores que aqueles para a situação normal (Tabela 4.4); portanto, os valores de cálculo da resistência do material (f_d) para a situação excepcional são virtualmente maiores que aqueles para a situação normal.

$$E_{m,\theta} = \kappa_{mE,\theta} \cdot E_m \tag{4.25}$$

onde: $E_{m,\theta}$ = módulo de elasticidade do material à temperatura elevada θ;

$\kappa_{mE,\theta}$ = fator de redução do módulo de elasticidade do material em função da temperatura elevada θ [adimensional];

E_m = módulo de elasticidade do material à temperatura ambiente.