

Bruno Polycarpo Palmerim Dias

Universidade Estácio de Sá (UNESA/Praça XI)

Miguel Henrique de Oliveira Costa

Universidade Estácio de Sá (UNESA/Praça XI)

RESUMO

As fatalidades decorrentes de colapsos prematuros de edificações em situação de incêndio revelam a necessidade de garantir que os elementos estruturais resistam a um tempo mínimo que permita a saída das pessoas e o acesso do Corpo de Bombeiros para as operações de combate e salvamento, denominado Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF). Neste contexto, foi apresentado o método simplificado de dimensionamento em situação de incêndio aplicado a pilares de aço submetidos a compressão simples. Complementarmente, adotou-se um perfil de pilar interno de uma edificação hipotética como exemplo de dimensionamento, seguindo os requisitos da ABNT NBR 8800:2008 (em temperatura ambiente), bem como da NT 2-19 do CBMERJ e da ABNT NBR 14323:2013 (em situação de incêndio). Na verificação realizada, constatou-se que a temperatura do pilar no TRRF (30 minutos) superava a temperatura crítica, sendo necessária sua proteção. Apresentou-se duas soluções, sendo uma proteção do tipo contorno por tinta intumescente, onde foi necessária a cobertura de 0,35 mm para proteger o elemento estrutural no TRRF; e uma proteção do tipo caixa por placa rígida de lã mineral de 20 mm, que conferiu ao pilar um tempo de resistência ao fogo de quase 90 minutos.

Palavras-chave: dimensionamento; aço; incêndio.

INTRODUÇÃO

Ao contrário dos elementos de concreto armado, os elementos estruturais de aço, em virtude de suas propriedades geométricas (FRANSSEN; REAL, 2010), comumente não atendem aos tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) previstos na Nota Técnica (NT) 2-19 do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio (CBMERJ), sendo necessária sua proteção por materiais de revestimento contra fogo a fim de que seja evitado o colapso estrutural prematuro em situação de incêndio. Para tanto, há várias técnicas e materiais que podem ser empregados, exigindo um correto dimensionamento.

Além das exigências da NT 2-19 do CBMERJ, a NBR 14323: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimento estabelece requisitos para o dimensionamento de elementos estruturais de aço em situação de incêndio, tanto dos perfis quanto das ligações. Ademais, é fundamental conhecer a espessura necessária para o material de proteção escolhido, em função do fator de massividade e do TRRF, através das cartas de cobertura disponibilizadas pelo fabricante

ou compiladas em catálogos como o *ASFP Yellow Book: Fire Protection for Structural Steel in Buildings*.

Desta forma, adotando como exemplo um pilar interno, será dimensionada a espessura dos materiais de revestimento contra fogo para a situação incêndio. Para tanto, serão adotados conceitos da ABNT NBR 14323:2013 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio e da ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Os colapsos prematuros de estruturas em situação de incêndio, como os ocorridos no Edifício Plasco em 2017 (Figura 1) e no Edifício Wilton Paes de Almeida (Figura 2), revelam a necessidade de que os elementos estruturais das edificações resistam a um tempo mínimo a fim de que sejam asseguradas a saída das pessoas e o acesso do Corpo de Bombeiros para as operações de combate e salvamento (CBMERJ, 2019).

Figura 1: Edifício Plasco (Irã, 2017) – 30 bombeiros mortos



Fonte: NBC (2020)

Figura 2: Edifício Wilton Paes de Almeida (São Paulo, 2018) – 07 ocupantes mortos



Fonte: Estadão (2020).

A escolha dos pilares se deu em razão das falhas nesses elementos estruturais serem a principal causa do desabamento de edifícios (informação verbal)¹. Tal assertiva, é corroborada por laudos periciais, como, por exemplo, do Edifício Palace II, que desabou no ano de 1998 no Rio de Janeiro (FOLHA DE SÃO PAULO, 2021).

Neste contexto, o atual Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico do Estado do Rio de Janeiro (COSCIP), aprovado através do Decreto Estadual nº 42/2018, estabelece

¹ Informação fornecida durante a capacitação em Inspeção e patologia de estruturas de concreto armado realizada no SENGE-RJ em março de 2019.

uma série de exigências preventivas para as edificações, dentre elas, a proteção contra incêndio e pânico dos elementos estruturais (RIO DE JANEIRO, 2018).

O objetivo geral do presente trabalho é apresentar o método simplificado de dimensionamento em situação de incêndio aplicado a pilares de aço submetidos a compressão simples, conferindo ao elemento estrutural a proteção necessária no TRRF previsto na Nota Técnica 2-19 do CBMERJ.

Para tanto, será necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- (i) apresentar o processo de transferência de calor em ambientes compartimentados;
- (ii) apresentar o comportamento dos elementos estruturais sob altas temperaturas, com especial enfoque aos elementos de aço;
- (iii) apresentar os conceitos de carga de incêndio, resistência ao fogo, tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) e incêndio-padrão;
- (iv) apresentar o conceito de fator de massividade;
- (v) apresentar as principais técnicas (tipo de material e forma de aplicação) para proteção de estruturas de aço contra incêndio;
- (vi) apresentar algumas cartas de cobertura de materiais de revestimento;
- (vii) apresentar os diferentes tipos de pilares quanto à solicitação;
- (viii) descrever o método simplificado de dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio;
- (ix) apresentar um exemplo de edificação, definindo as ações e condições de contorno de um pilar submetido à compressão simples;
- (x) definir um perfil para o pilar submetido à compressão simples e realizar o dimensionamento à temperatura ambiente;
- (xi) verificar se o pilar atinge/supera a temperatura crítica no TRRF;
- (xi) dimensionar as espessuras dos materiais de revestimento contra fogo selecionados, se necessário.

METODOLOGIA

A presente pesquisa investigará, inicialmente, (i) os principais conceitos relacionados à elevação da temperatura em elementos estruturais de aço em situação de incêndio e (ii) os respectivos métodos de proteção, através de uma revisão bibliográfica.

Dando prosseguimento, através de um exemplo, um pilar de aço submetido à compressão simples será dimensionado à temperatura ambiente conforme ABNT NBR 8800:2008. Adotando o preconizado na NT 2-19 do CBMERJ, serão definidos o TRRF do pilar bem como a temperatura crítica do aço e, através da ABNT NBR 14323:2013, será calculada temperatura do aço no TRRF.

Por fim, caso a temperatura do aço no TRRF definido atinja/exceda a temperatura crítica do aço (CBCA, 2020), serão dimensionadas as espessuras dos materiais de revestimento contra fogo do elemento estrutural utilizando o referencial das cartas de cobertura.

REFERENCIAL TEÓRICO

Processo de transferência de calor em incêndios

Há três processos de transferência de calor num ambiente compartimentado em situação de incêndio: a condução, a irradiação e a convecção, sendo esta última a mais relevante, em virtude dos gases quentes não se dissiparem no ambiente, diferente do que ocorre em ambientes abertos. Em um ambiente compartimentado, a fumaça do incêndio se movimenta de forma radial e ascendente. Ao entrar em contato com a laje de teto, passa a

movimentar-se lateralmente, até encontrar as vedações, onde começa a aumentar sua concentração, formando uma zona quente na porção superior e uma fria, na inferior, como apresentado na Figura 3 (DeHaan, 2007).

Figura 3: Propagação da fumaça em ambientes compartimentados

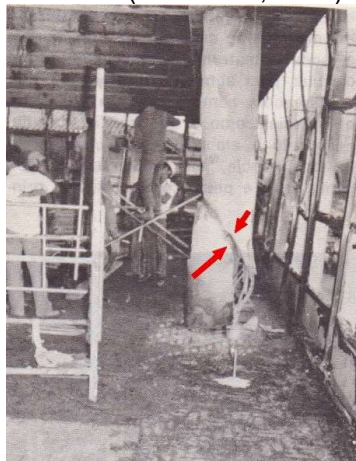


Fonte: CBCA (2020).

Comportamento dos elementos estruturais sob altas temperaturas

Em virtude das maiores temperaturas presentes na camada superior do ambiente compartimentado, são justamente as porções de elementos estruturais mais altas que sofrerão mais intensamente com os efeitos do calor. As deformações provocadas pelo aumento da temperatura, provocam tensões nos elementos estruturais, podendo levar à abertura de trincas e, até mesmo, à sua ruptura, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4: Deformação da viga levando à ruptura por cisalhamento de pilar – Incêndio do Edifício do Grande Avenida (São Paulo, 1981)



Fonte: Zona de Risco (2020).

Para agravar a situação, a ação do calor nas estruturas provoca a perda de resistência à tração do aço bem como a redução de seu módulo de elasticidade, como pode ser verificado Figura 5 (ABNT, 2013).

Figura 5: Redução da resistência à tração do aço e do módulo de elasticidade em função aumento da temperatura

Temperatura do aço θ_a °C	Fator de redução da resistência ao escoamento ^a $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade ^a $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
800	0,110	0,090
900	0,060	0,068
1 000	0,040	0,045
1 100	0,020	0,023
1 200	0,000	0,000

^a Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.

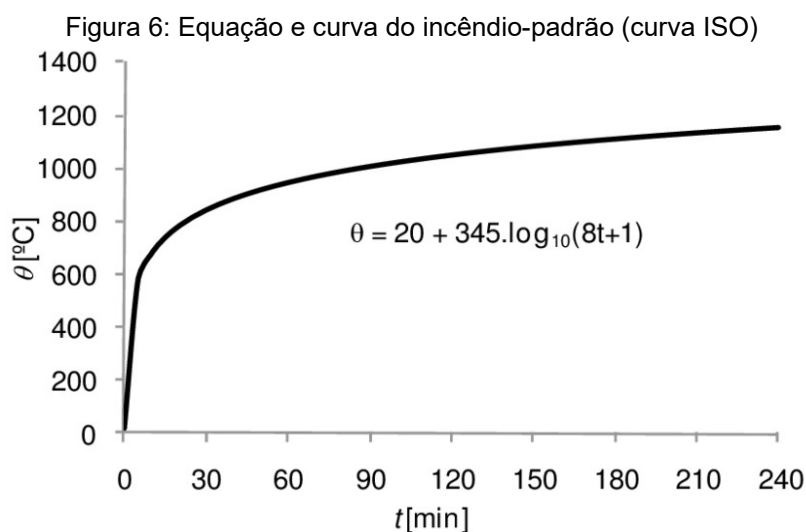
Fonte: ABNT NBR 14323:1999.

Elevação de temperatura do aço

O aumento da temperatura nas seções de aço depende (i) da temperatura dos gases do ambiente, (ii) do índice de massividade e (iii) do revestimento contra fogo aplicado ao aço (FRANSSEN; REAL, 2010). Cada um desses elementos será analisado a seguir.

Elevação da temperatura de gases no ambiente

Há diversos modelos para estimar a temperatura dos gases num ambiente compartimentado. A opção mencionada na NT 2-19 do CBMERJ é a curva do incêndio-padrão (CBMERJ, 2019). Esta curva (Figura 6), também denominada curva ISO, representa a temperatura no ambiente em função da variável tempo e é considerada uma curva nominal, por ser apenas um referencial normativo e não representar um incêndio real (FRANSSEN; REAL, 2010).



Fonte: Klein Junior e Silva (2010)

Revestimento contra fogo

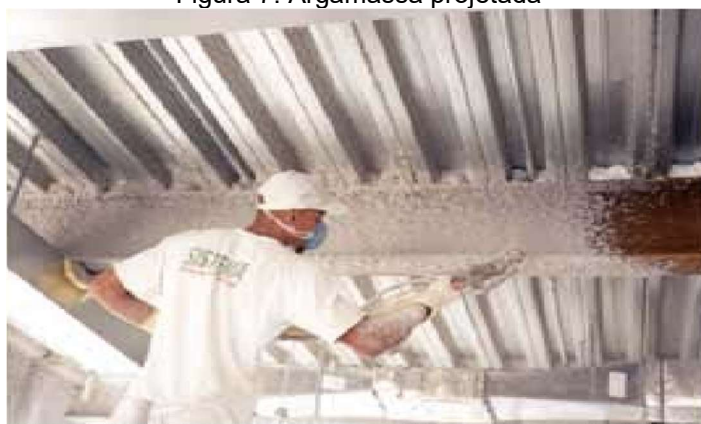
A proteção das estruturas em situação de incêndio se dá por material de revestimento contra fogo. Trata-se de material que retarda a elevação da temperatura do elemento estrutural quando em situação de incêndio (ABNT, 2013).

Os revestimentos podem ser classificados quanto à forma e quanto ao tipo de material (FRANSSEN; REAL, 2010). Quando contornam o perímetro da seção transversal do elemento, são chamados de tipo contorno. Por outro lado, quando envolvem como caixa a seção, são denominados tipo caixa (ABNT, 2013).

Quanto ao tipo, os materiais de revestimento ao fogo podem ser agrupados em (i) materiais projetados, (ii) materiais rígidos ou semirrígidos e (iii) as tintas intumescentes e (iv) o próprio concreto (CBCA, 2020).

Os materiais projetados possuem base de gesso ou cimentícia, sendo sua aplicação realizada em campo na condição seca - fibras projetadas ou úmida (Figura 7).

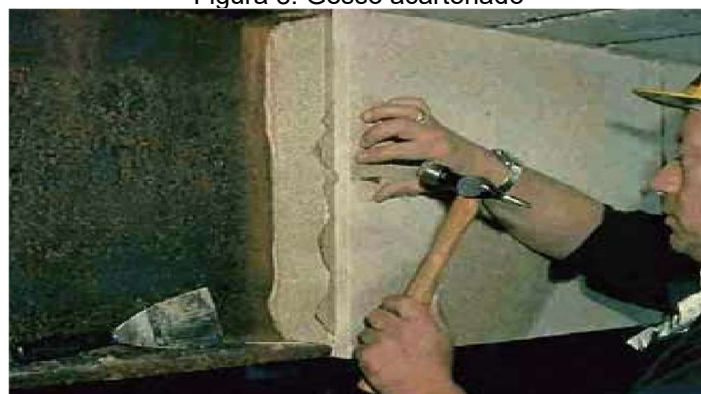
Figura 7: Argamassa projetada



Fonte: CBCA (2020)

Já os materiais rígidos ou semirrígidos incluem as fibras cerâmicas, a lã de rocha basáltica, o silicato de cálcio, o gesso (Figura 8) e a vermiculita, aplicados através de fôrmas tanto tipo caixa quanto tipo contorno.

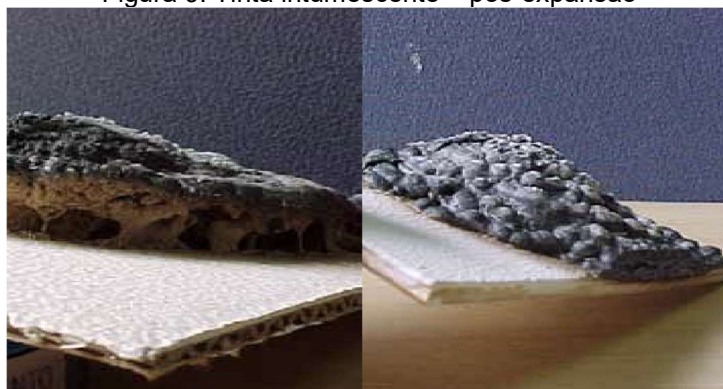
Figura 8: Gesso acartonado



Fonte: CBCA (2020)

As tintas intumescentes são aplicadas tipo contorno nos elementos e possuem a capacidade de reagir sob altas temperaturas, liberando vapores que promovem a expansão do material (Figura 9).

Figura 9: Tinta intumescente – pós-expansão



Fonte: CBCA (2020)

Índice de massividade


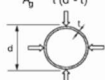







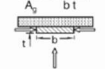
A rápida propagação de temperatura nas seções transversais de aço (se comparado ao concreto) geralmente é atribuída à sua elevada condutibilidade térmica. Entretanto, o fator que realmente governa a taxa de aumento da temperatura do aço está associado à espessura relativa das seções, e se chama índice (ou fator) de massividade (FRANSSEN; REAL, 2010).

O fator de massividade de um elemento é a razão entre a área superficial exposta ao fogo e o volume do elemento. Para elementos prismáticos, é a razão entre o perímetro exposto ao incêndio (u) e a área bruta da seção transversal do elemento estrutural (A_g) (FRANSSEN; REAL, 2010).

A


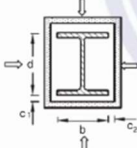
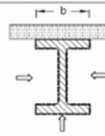
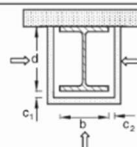
Figura 10 e a Figura 11 apresentam os fatores de massividade para alguns elementos sem e com revestimento, respectivamente.

Figura 10: Fator de Massividade – elementos sem revestimento

<p>Seção aberta exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma circular exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{d}{t(d-t)}$ 
<p>Seção aberta exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{\text{perímetro exposto ao incêndio}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma retangular (ou seção-caixão soldada de espessura uniforme) exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+d}{t(b+d-2t)}$ 
<p>Mesa de seção I ou H exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+2t_f}{b t_f}$ 	<p>Seção-caixão soldada exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+d)}{\text{área da seção transversal}}$ 
<p>Cantoneira exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2}{t}$ 	<p>Seção I ou H com reforço em caixão exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+d)}{\text{área da seção transversal}}$ 
<p>Chapa exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+t)}{b t}$ 	<p>Chapa exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+2t}{b t}$ 

Fonte: ABNT NBR 14323 (1999).

Figura 11: Fator de Massividade – elementos com revestimento

Situação	Descrição	Fator de massividade (u_m/A_g)
	Seção com revestimento tipo contorno, de espessura uniforme, exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço}}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com revestimento tipo caixa ^a , de espessura uniforme, exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{2(b+d)}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com revestimento tipo contorno de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço} - b}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com revestimento tipo caixa ^a de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados	$\frac{2d+b}{\text{área da seção da peça de aço}}$

^a Válido apenas para c_1 e c_2 inferiores ou iguais a $d/4$.

Fonte: ABNT NBR 14323 (1999).

Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)

A resistência ao fogo de um elemento estrutural é a propriedade de um material manter três condições enquanto submetido ao fogo: resistência mecânica, estanqueidade e isolamento térmico. O TRRF nada mais é que o tempo no qual o elemento estrutural deve

manter sua resistência ao fogo enquanto submetido a um aumento teórico de temperatura pela curva de incêndio-padrão (CBMERJ, 2019).

O Anexo A da NT2-19 do CBMERJ apresenta os valores de TRRF para cada ocupação / uso, como pode ser verificado na Figura 12.

Figura 12: Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo

Grupo	Ocupação/Uso	Divisão	Profundidade do Subsolo (hs)		Altura da edificação (h)							
			Classe S ₂ hs>10m	Classe S ₁ hs≤10m	Classe P ₁ h≤6m	Classe P ₂ 6m<h≤12m	Classe P ₃ 12m<h≤23m	Classe P ₄ 23m<h≤30m	Classe P ₅ 30m<h≤60m	Classe P ₆ 60m<h≤120m	Classe P ₇ 120<h≤150 m	Classe P ₈ 150m<h≤250 m
A	Residencial	A-2, A-3 e A-6	90	60	30	30	60	90	120	120	150	180
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120	150	180	180
C	Comercial varejista	C-1	90	60	60 (30)	60	60	90	120	150	150	180
		C-2 e C-3	90	60	60	60	60	90	120	150	150	180
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60	30	60 (30)	60	90	120	120	150	180
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60	30	30	60	90	120	120	150	180
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6, F-8 e F-10	90	60	60 (30)	60	60	90	120	150	180	-
		F-3, F-4 e F-7	90	60	ver item 5.3.3	30	60	60	90	120	-	-
		F-9	90	60	30	60	60	90	120	-	-	-
		G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120	120	150	180
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 Abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60	120	120	150
		H-1 e H-4	90	60	30	60	60	90	120	150	180	180
H	Serviços de saúde e institucionais	H-2, H-3 e H5	90	60	30	60	60	90	120	150	180	180
		I-1	90 (60)	60 (30)	30	30	30	60	120	-	-	-
I	Industrial	I-2	120	90	30	30	60 (30)	90	120	-	-	-
		I-3	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120	-	-	-
		J-1	60	30	ver item 5.3.4	30	30	60	60	-	-	-
J	Depósitos	J-2	90	60 (30)	60	60	60	60	60	-	-	-
		J-3	90	60 (30)	60	60	60	120 (90)	120	-	-	-
		J-4	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120	-	-	-
		L	Explosivos	L-1, L-2 e L-3	120	120	120	-	-	-	-	-
M	Especial	M-1	150	150	150	-	-	-	-	-	-	-
		M-2	-	-	120	120	-	-	-	-	-	-
		M-5	120	90	60	60	90	120	-	-	-	-
		M-3	120	90	90	90	120	120	120	120	150	-

OBSERVAÇÕES:

1. Para os casos não enquadrados na Tabela A, deverá ser solicitado Parecer Técnico junto ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro.
2. Para a classificação detalhada das ocupações (Ocupação/Uso) consultar o Anexo A da NT 1-04 - Classificação das edificações quanto à ocupação e ao risco de incêndio.
3. Os tempos entre parênteses podem ser usados nas edificações nas quais cada pavimento tenha área menor ou igual a 900 m², desde que haja compartimentação vertical entre os pavimentos.
4. O TRRF dos subsolos não podem ser inferiores ao TRRF dos pavimentos situados acima do solo (ver item 6.9).
5. Para edificações em madeira, verificar item 6.12.
6. Para indústria ou depósito com inflamáveis, considerar I-3 e J-4, respectivamente.

Fonte: CBMERJ (2019 apud SILVA, 2004).

Temperatura crítica

A temperatura crítica, também chamada de temperatura de colapso, ocorre quando o valor de projeto das ações em situação de incêndio se iguala à resistência de projeto do elemento estrutural em situação de incêndio num determinado intervalo de tempo (FRANSSSEN; REAL, 2010).

De acordo com CBMERJ (2019), o valor da temperatura crítica será tomado como um valor máximo de 550° C para os aços utilizados em perfis cujo Estado Limite Último (ELU) não seja o de instabilidade local elástica ou calculado conforme a ABNT NBR 14323.

Cartas de cobertura

As cartas de cobertura são documentos que especificam a espessura de cada material de revestimento contra fogo em função do fator de massividade e do TRRF (CBMERJ, 2019). Geralmente, as cartas de cobertura são fornecidas pelos fabricantes de revestimentos contra fogo ou então obtidas através de catálogos, como o “Yellow Book” (Association for Specialist Fire Protection, 2002).

A Figura 13 apresenta um exemplo de carta de cobertura, onde fica evidente que (i) quanto maior for o valor do fator de massividade (F), maior será a espessura requerida do revestimento e (ii) quanto maior o TRRF (período de resistência ao fogo), também deverá ser maior a espessura da proteção.

Figura 13: Carta de cobertura da tinta intumescente (Nullifire S-605) para vigas e pilares de aço com 4 faces expostas ao incêndio, segundo ASFP (2004).

F (m ⁻¹)	Espessura requerida (mm) para o período de resistência ao fogo (min)			
	30	60	90	120
20	0,35	0,80	1,30	1,30
30	0,35	0,80	1,30	1,60
40	0,35	0,80	1,35	1,85
50	0,35	0,80	1,40	2,10
60	0,35	0,80	1,45	2,35
70	0,35	0,80	1,55	2,65
80	0,35	0,80	1,60	2,90
90	0,35	0,80	1,65	3,15
100	0,35	0,85	1,80	3,60
110	0,35	0,90	1,90	4,20
120	0,35	0,95	1,95	4,60
130	0,35	1,00	2,05	4,75
140	0,45	1,05	2,10	4,90
150	0,50	1,25	2,15	5,05
160	0,55	1,40	2,25	5,20
170	0,65	1,45	2,30	5,35
180	0,70	1,55	2,35	5,50
190	0,75	1,60	2,40	5,60
200	0,80	1,65	2,65	6,25
210	0,80	1,75	3,15	
220	0,85	1,80	3,70	
230	0,85	1,90	4,20	
240	0,90	1,95	4,70	
250	0,90	2,05	5,20	
260	0,95	2,10	5,70	
270	0,95	2,20	6,25	
280	1,00	2,25		
290	1,00	2,35		
300	1,05	2,40		
310	1,15	2,50		
320	1,20	2,70		

Deve ser considerado 0,1 mm para a tinta de fundo e tinta de acabamento

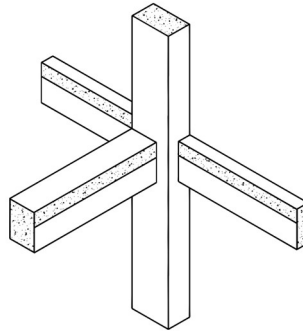
Fonte: Guimarães (2007).

Classificação dos pilares quanto à solicitação inicial

Segundo Scadelai e Pinheiro (2005), os pilares podem ser classificados, quanto à solicitação inicial, em pilares de canto, pilares de borda e pilares internos.

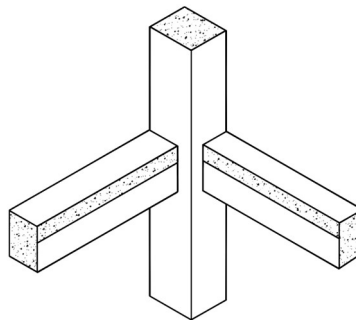
Os pilares de borda (Figura 14) são aqueles submetidos à flexão composta normal, i. e., admite-se excentricidade em uma direção. Já nos pilares de canto (Figura 15), as excentricidades iniciais ocorrem na direção das bordas, ou seja, são submetidos à flexão oblíqua. Por fim, apresentamos os pilares internos (Figura 16), que serão objeto do presente estudo por apresentarem excentricidades iniciais desprezíveis, onde se pode admitir a compressão simples.

Figura 14: Pilar de borda



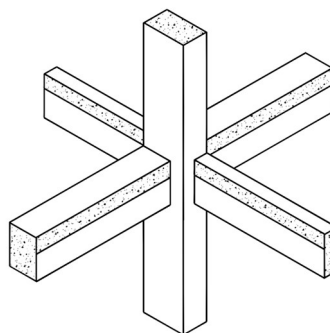
Fonte: Scadelai e Pinheiro (2005)

Figura 15: Pilar de canto



Fonte: Scadelai e Pinheiro (2005)

Figura 16: Pilar interno



Fonte: Scadelai e Pinheiro (2005)

DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL PELO MÉTODO SIMPLIFICADO

A ABNT NBR 14323 divide os métodos de dimensionamento estrutural em simplificado e avançados. Em breve descrição (por não se tratar do objeto do presente estudo), os métodos avançados são aqueles que promovem uma análise realística da estrutura e do cenário do incêndio, podendo ser aplicados para elementos estruturais singulares com qualquer tipo de seção transversal, levando a uma aproximação confiável do comportamento dos componentes da estrutura em situação de incêndio através de modelos para o (i) desenvolvimento e distribuição da temperatura (análise térmica) e/ou (ii) o comportamento mecânico dos elementos estruturais (análise estrutural) (ABNT, 2013).

Já o método simplificado, segundo Martins (2000) é de fácil utilização e comumente leva a resultados conservativos podendo ser aplicado à maior parte dos elementos estruturais de aço constituídos por perfis laminados, perfis soldados e às ligações.

Neste método, as seguintes simplificações são adotadas:

- somente os efeitos das deformações térmicas resultantes dos gradientes térmicos ao longo da altura da seção transversal das barras precisam ser considerados (os efeitos das expansões térmicas podem ser desprezados);
- no caso de vigas em perfil I com laje de concreto sobreposta, o gradiente térmico pode ser obtido considerando-se que a mesa superior tem um aquecimento independente da mesa inferior, cada uma dessas mesas considerada com seu próprio fator de massividade, e que a temperatura ao longo da altura da alma varia linearmente entre as temperaturas das duas mesas;
- em elementos estruturais com proteção tipo caixa, o gradiente térmico pode ser desprezado;
- pode-se efetuar a análise estrutural (determinação dos esforços solicitantes) tomando o módulo de elasticidade do aço constante e igual ao seu valor em temperatura elevada em todos os elementos afetados pelo incêndio. (MARTINS, 2000).

Basicamente, o método consiste na verificação se a temperatura atingida pelo elemento estrutural no tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) ultrapassa sua temperatura crítica. Caso seja ultrapassado, será necessária proteger o elemento estrutural (MARTINS, 2000).

Neste sentido, passamos a apresentar o método de cálculo da temperatura crítica das barras comprimidas em situação de incêndio e, em seguida, o cálculo da elevação da temperatura no aço.

Barras comprimidas em situação de incêndio

De acordo com a ABNT NBR 14323:2013, a resistência de cálculo de uma barra axialmente comprimida em situação de incêndio é igual a:

$$N_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} \frac{\rho_{fi} k_{y,\theta} A_g f_y}{k_a} \quad (1)$$

Onde, ρ_{fi} é um fator de redução da resistência à compressão em situação de incêndio, obtido através da ABNT NBR 8800, mas aplicando sempre a curva c (independentemente do tipo de seção transversal, do modo de instabilidade e do eixo em relação ao qual esta instabilidade ocorre) e o índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio ($\bar{\lambda}_\theta$) dado por:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,\theta}} / k_{E,\theta} \quad (2)$$

Por sua vez, o fator de correção k_a tem os seguintes valores:

$$k_a = 1,0 + \lambda_\theta \quad (0 \leq \lambda_\theta \leq 0,2) \quad (3)$$

$$k_a = 1,2 \quad (\lambda_\theta > 0,2) \quad (4)$$

Entretanto, para a aplicação do método simplificado de cálculo, deve-se garantir que os elementos componentes da seção transversal das barras axialmente comprimidas não sofram flambagem local considerando a aplicação dos fatores de redução em temperatura elevada do limite de escoamento e do módulo de elasticidade do aço.

Tendo esse cálculo sido superado e recordando do conceito apresentado por Franssen e Real (2010), temos que a temperatura crítica de uma barra comprimida é a temperatura na qual a resistência de cálculo ($N_{fi,Rd}$) e a solicitação de cálculo em situação de incêndio ($N_{fi,Sd}$), se igualam num determinado intervalo de tempo (MARTINS, 2000), ou seja:

$$N_{fi,Sd} = N_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} \frac{\rho_{fi} k_{y,\theta} A_g f_y}{k_a} \quad (5)$$

Elevação da temperatura no aço

Segundo a ABNT NBR 14323 (2013), para uma distribuição uniforme da temperatura na seção transversal, a elevação da temperatura de um elemento estrutural de aço sem revestimento contra fogo pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\Delta\theta_{a,t} = K_{sh} \frac{u/Ag}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad (6)$$

Onde:

K_{sh} é um fator de correção para o efeito de sombreamento que pode ser tomado como 1;

u/Ag é o fator de massividade [m⁻¹];

ρ_a é a massa específica do aço = 7.850 kg/m³;

c_a é o calor específico do aço = 600 J/kg.°C;

φ é o valor do fluxo de calor por unidade de área [W/m²];

Δt é o intervalo de tempo [s].

Para determinar φ , temos:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (7)$$

Com:

$$\varphi_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (8)$$

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (9)$$

Onde:

φ_c é o componente do fluxo de calor devido à convecção [W/m²];

φ_r é o componente do fluxo de calor devido à radiação [W/m²];

α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, igual a 25 W/m².°C;

θ_g é a temperatura dos gases [°C];

θ_a é a temperatura na superfície do aço [°C];

ε_{res} é a emissividade resultante, podendo ser tomada igual a 0,5.

EXEMPLO

O presente capítulo tem por objetivo apresentar um exemplo de proteção contra incêndio de um pilar submetido à compressão simples. Para tanto, iremos propor uma edificação hipotética com as seguintes características:

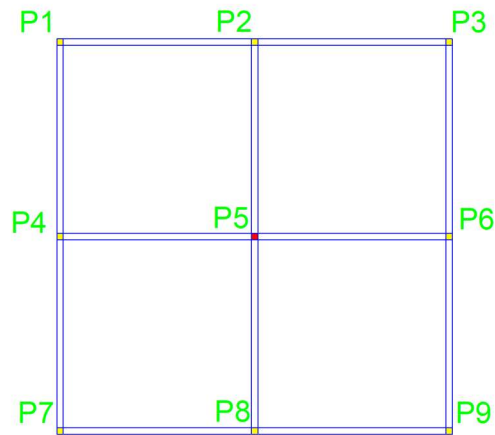
(i) Ocupação: serviços profissionais

(ii) Pé-direito: 3 metros

(iii) Pavimentos-tipo: 02

Além disso, os pilares do pavimento-tipo serão concebidos conforme Figura 17.

Figura 17: Concepção dos pilares



Fonte: Autor

Desconsiderando os esforços horizontais produzidos pelo vento, temos que o pilar o P5 (pilar interno) está submetido à compressão simples. Desta forma e de maneira ilustrativa, definimos ações permanentes e variáveis as quais o elemento estrutural estará submetido, bem como suas condições de contorno:

- (i) Ação permanente: 1000 kN
- (ii) Ação variável: 1000 kN
- (iii) A ligação da viga que une os pilares é rígida
- (iv) O pilar é rotulado na base

Como apresentado na metodologia, inicialmente será realizado o dimensionamento do pilar P5 à temperatura ambiente, seguindo os requisitos da ABNT NBR 8800:2008.

Cálculo à temperatura ambiente (ABNT NBR 8800)

Como ensina Rebello (2005), o dimensionamento de peças comprimidas é feito por tentativa, i. e., não é realizado um dimensionamento propriamente dito, mas sim uma verificação.

O aço escolhido foi o ASTM A36 enquanto o perfil adotado foi o CS 300x122, cujas propriedades geométricas e mecânicas estão apresentadas na Figura 18 e na Figura 19, respectivamente.

Figura 18: Propriedades geométricas

DESIGNAÇÃO	Massa Linear [Kg/m]	Área A [cm ²]	DIMENSÕES						EIXO X - X				EIXO Y - Y				Propried. torção		Esbeltez local			$f_y=25kN/cm^2$ λ_r [cm]	$f_y=30kN/cm^2$ λ_r [cm]
			d [mm]	t _w [mm]	h [mm]	t _f [mm]	b _f [mm]	I _x [cm ⁴]	W _x [cm ³]	r _x [cm]	Z _x [cm ³]	I _y [cm ⁴]	W _y [cm ³]	r _y [cm]	Z _y [cm ³]	I _t [cm ⁴]	C _w [cm ⁶]	h/t _w [-]	b _f /2t _f [-]	r _t [cm]			
300 x 122	122,4	155,9	300	16	262	19,0	300	24936	1662	12,65	1876	8559	571	7,41	872	176	1687791	16	7,9	8,18	231	193	

Fonte: USP (2021)

Figura 19: Propriedades mecânicas

Limite de Escoamento (LE)	250 MPa
Limite de Ruptura (LR)	400 - 550 MPa
Alongamento	23%

Allgayer (2017).

Fonte:

a) Verificação do índice de esbeltez:

Como a condição de contorno do pilar indica uma base engastada e um topo rotulado, temos que os índices de esbeltez nas duas direções, de acordo com a ABNT NBR 8800, são calculados através das equações abaixo:

$$\lambda_x = \frac{l_f}{r_x} = \frac{0,7 \cdot l}{r_x} = \frac{0,7 \cdot 300}{12,65} = 16,61 \quad (10)$$

$$\lambda_y = \frac{l_f}{r_y} = \frac{0,7 \cdot l}{r_y} = \frac{0,7 \cdot 300}{7,41} = 28,34 \quad (11)$$

Desta forma, verifica-se que os índices de esbeltez atendem aos limites da norma, pois são inferiores a 200 em ambas as direções.

b) Cálculo da força normal resistente de projeto:

De acordo com a NBR 8880:2008, a força normal resistente de projeto (N_{Rd}), associada aos estados-limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, deve ser calculada através da equação abaixo:

$$N_{Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A \cdot f_y}{\gamma_a} \quad (12)$$

Onde: A é a área bruta da seção transversal da barra

$$Q = 1 \text{ (na ausência de instabilidade local)} \quad (13)$$

$$\gamma_a = 1,1 \quad (14)$$

$$\chi = 0,658^{\lambda_o^2} \text{ (para } \lambda_o \leq 1,5) \quad (15)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_o^2} \text{ (para } \lambda_o > 1,5) \quad (16)$$

A NBR 8800:2008 nos fornece a seguinte equação para cálculo do λ_o (índice de esbeltez reduzido):

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{Q \cdot A \cdot f_y}{N_e}} \quad (17)$$

Por sua vez, como pelo anexo E da norma:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{kl^2} \quad (18)$$

Temos que:

$$\begin{aligned} \lambda_o &= \frac{l_f/r}{\sqrt{\pi^2 \cdot E/f_y}} \\ \lambda_o &= \frac{0,7 \cdot 300/7,41}{\sqrt{\pi^2 \cdot 20000/25}} \\ \lambda_o &= 0,32 \end{aligned} \quad (19)$$

Em seguida, calcula-se o valor de χ em função do λ_o . Como $\lambda_o \leq 1,5$:

$$\begin{aligned} \chi &= 0,658^{\lambda_o^2} \\ \chi &= 0,658^{0,32^2} \\ \chi &= 0,958 \end{aligned} \quad (20)$$

Tal resultado também poderia ser fornecido através da Figura 20.

Figura 20: Valor de χ em função do índice de esbeltez reduzido

λ_0	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_0
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,997	0,0
0,1	0,996	0,995	0,994	0,993	0,992	0,991	0,989	0,988	0,987	0,985	0,1
0,2	0,983	0,982	0,980	0,978	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968	0,965	0,2
0,3	0,963	0,961	0,958	0,955	0,953	0,950	0,947	0,944	0,941	0,938	0,3
0,4	0,935	0,932	0,929	0,926	0,922	0,919	0,915	0,912	0,908	0,904	0,4
0,5	0,901	0,897	0,893	0,889	0,885	0,881	0,877	0,873	0,869	0,864	0,5
0,6	0,860	0,856	0,851	0,847	0,842	0,838	0,833	0,829	0,824	0,819	0,6
0,7	0,815	0,810	0,805	0,800	0,795	0,790	0,785	0,780	0,775	0,770	0,7
0,8	0,765	0,760	0,755	0,750	0,744	0,739	0,734	0,728	0,723	0,718	0,8
0,9	0,712	0,707	0,702	0,696	0,691	0,685	0,680	0,674	0,669	0,664	0,9
1,0	0,658	0,652	0,647	0,641	0,636	0,630	0,625	0,619	0,614	0,608	1,0
1,1	0,603	0,597	0,592	0,586	0,580	0,575	0,569	0,564	0,558	0,553	1,1
1,2	0,547	0,542	0,536	0,531	0,525	0,520	0,515	0,509	0,504	0,498	1,2
1,3	0,493	0,488	0,482	0,477	0,472	0,466	0,461	0,456	0,451	0,445	1,3
1,4	0,440	0,435	0,430	0,425	0,420	0,415	0,410	0,405	0,400	0,395	1,4
1,5	0,390	0,385	0,380	0,375	0,370	0,365	0,360	0,356	0,351	0,347	1,5
1,6	0,343	0,338	0,334	0,330	0,326	0,322	0,318	0,314	0,311	0,307	1,6
1,7	0,303	0,300	0,296	0,293	0,290	0,286	0,283	0,280	0,277	0,274	1,7
1,8	0,271	0,268	0,265	0,262	0,259	0,256	0,253	0,251	0,248	0,246	1,8
1,9	0,243	0,240	0,238	0,235	0,233	0,231	0,228	0,226	0,224	0,221	1,9
2,0	0,219	0,217	0,215	0,213	0,211	0,209	0,207	0,205	0,203	0,201	2,0
2,1	0,199	0,197	0,195	0,193	0,192	0,190	0,188	0,186	0,185	0,183	2,1
2,2	0,181	0,180	0,178	0,176	0,175	0,173	0,172	0,170	0,169	0,167	2,2
2,3	0,166	0,164	0,163	0,162	0,160	0,159	0,157	0,156	0,155	0,154	2,3
2,4	0,152	0,151	0,150	0,149	0,147	0,146	0,145	0,144	0,143	0,141	2,4
2,5	0,140	0,139	0,138	0,137	0,136	0,135	0,134	0,133	0,132	0,131	2,5
2,6	0,130	0,129	0,128	0,127	0,126	0,125	0,124	0,123	0,122	0,121	2,6
2,7	0,120	0,119	0,119	0,118	0,117	0,116	0,115	0,114	0,113	0,113	2,7
2,8	0,112	0,111	0,110	0,110	0,109	0,108	0,107	0,106	0,106	0,105	2,8
2,9	0,104	0,104	0,103	0,102	0,101	0,101	0,100	0,099	0,099	0,098	2,9
3,0	0,097	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0

Fonte: Silva et al (2021)

Dando prosseguimento, verificamos se o perfil do aço escolhido está sujeito a instabilidade local, calculando o b/t e o $(b/t)_{lim}$ como apresentado na Figura 21.

Figura 21: Valores b/t para evitar a instabilidade local

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	<ul style="list-style-type: none"> Mesas ou almas de seções tubulares retangulares. Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas 		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	<ul style="list-style-type: none"> Almas de seções I, H ou U Mesas ou almas de seção-caixão Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1 		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travessamento		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	<ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U laminadas Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas 		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	Mesas de seções I, H, T ou U soldadas*		$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}}$
	6	Almas de seções T		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: NBR 8880 (2008)

Logo:

$$(b/t)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 42,14 \quad (21)$$

$$b/t = \frac{262}{16} = 16,38 \quad (22)$$

Como $b/t \leq (b/t)_{lim}$, temos que o perfil não está sujeito à instabilidade local. Portanto, temos que $Q=1$.

Desta forma, finalmente obtemos todos os parâmetros para cálculo de N_{Rd} .

$$N_{Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A \cdot f_y}{\gamma_a}$$
$$N_{Rd} = \frac{0,958 \cdot 1 \cdot 155,9 \cdot 25}{1,1}$$
$$N_{Rd} = 3394,37 \text{ kN} \quad (23)$$

c) Cálculo da força normal solicitante de projeto:

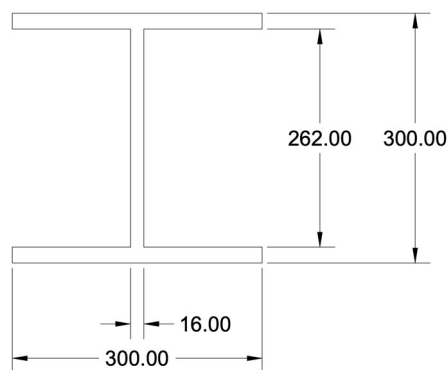
De acordo com a NBR 8880:2008, a força normal solicitante de projeto (N_{Sd}) é calculada através da equação abaixo:

$$N_{Sd} = g \cdot \gamma_g + q \cdot \gamma_q$$
$$N_{Sd} = 1000 \cdot 1,4 + 1000 \cdot 1,4$$
$$N_{Sd} = 1.400 + 1.400$$
$$N_{Sd} = 2.800 \text{ kN} \quad (24)$$

d) Verificação se o perfil do pilar escolhido foi aprovado

Confrontando a força normal solicitante de projeto com a força normal resistente de projeto, verificamos que a força resistente é maior, i.e., $N_{Rd} > N_{Sd}$. Sendo assim, como os índices de esbeltez em ambas as direções são inferiores a 200, temos que o perfil selecionado do aço ASTM A36 atende à norma (Figura 22).

Figura 22: Geometria do perfil selecionado



Fonte: Autor

Verificação em situação de incêndio sem proteção

A verificação em situação de incêndio seguirá os requisitos da NT 2-19 do CBMERJ e da ABNT NBR 14323 e compreenderá (i) o cálculo do TRRF da edificação, (ii) o cálculo

do índice de massividade, (iii) o cálculo da temperatura do pilar no TRRF, (iv) a determinação da temperatura crítica e (v) a verificação se temperatura do elemento estrutural no TRRF atinge / excede a temperatura crítica.

a) Cálculo do TRRF

De acordo com a tabela apresentada no subcapítulo 0, obtida da NT 2-19 do CBMERJ, temos que o TRRF da ocupação do exemplo é de 30 min (Figura 23).

Figura 23: TRRF

Grupo	Ocupação/Use	Divisão	Profundidade do Subsolo (hs)		Altura da edificação (h)							
			Classe S ₂ hs>10m	Classe S ₁ hs≤10m	Classe P ₁ h >6m	Classe P ₂ 6m<h≤12m	Classe P ₃ 12m<h≤23m	Classe P ₄ 23m<h≤30m	Classe P ₅ 30m<h≤ 80m	Classe P ₆ 80m<h≤120m	Classe P ₇ 120<h≤150 m	Classe P ₈ 150m<h≤250 m
A	Residencial	A-2, A-3 e A-6	90	60	30	30	60	90	120	120	150	180
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120	150	180	180
C	Comercial varejista	C-1	90	60	60 (30)	60	60	90	120	150	150	180
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	C-2 e C-3	90	60	60	60	60	90	120	150	150	180
E	Educação e cultura física	D-1 a D-3	90	60	30	60 (30)	60	90	120	120	150	180
F	Locais de reunião de público	E-1 a E-6	90	60	30	30	60	90	120	120	150	180
G	Serviços automotivos	F-1, F-2, F-5, F-6, F-8 e F-10	90	60	60 (30)	60	60	90	120	150	180	-
		F-3, F-4 e F-7	90	60	ver item 5.3.3		30	60	60	90	120	-
		F-9	90	60	30	60	60	90	120	-	-	-
H	Serviços de saúde e institucionais	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120	120	150	180
		G-1 e G-2 Abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60	120	120	150
I	Industrial	H-1 e H-4	90	60	30	60	60	90	120	150	180	180
		H-2, H-3 e H5	90	60	30	60	60	90	120	150	180	180
		I-1	90 (60)	60 (30)	30	30	30	60	120	-	-	-
J	Depósitos	I-2	120	90	30	30	60 (30)	90	120	-	-	-
		I-3	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120	-	-	-
		J-1	60	30	ver item 5.3.4		30	30	60	-	-	-
		J-2	90	60 (30)	60	60	60	60	60	-	-	-
L	Explosivos	J-3	90	60 (30)	60	60	60	120 (90)	120	-	-	-
		J-4	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120	-	-	-
		L-1, L-2 e L-3	120	120	120					-	-	-
M	Especial	M-1	150	150	150					-	-	-
		M-2	-	-	120	120	-	-	-	-	-	-
		M-5	120	90	60	60	90	120	120	-	-	-
		M-3	120	90	90	90	120	120	120	120	150	-

OBSERVAÇÕES:

1. Para os casos não enquadrados na Tabela A, deverá ser solicitado Parecer Técnico junto ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro.
2. Para a classificação detalhada das ocupações (Ocupação/Use) consultar o Anexo A da NT 1-04 - Classificação das edificações quanto à ocupação e ao risco de incêndio.
3. Os tempos entre parênteses podem ser usados nas edificações nas quais cada pavimento tenha área menor ou igual a 900 m², desde que haja compartimentação vertical entre os pavimentos.
4. O TRRF dos subsolos não podem ser inferiores ao TRRF dos pavimentos situados acima do solo (ver item 6.9).
5. Para edificações em madeira, verificar item 6.12.
6. Para indústria ou depósito com inflamáveis, considerar I-3 e J-4, respectivamente.

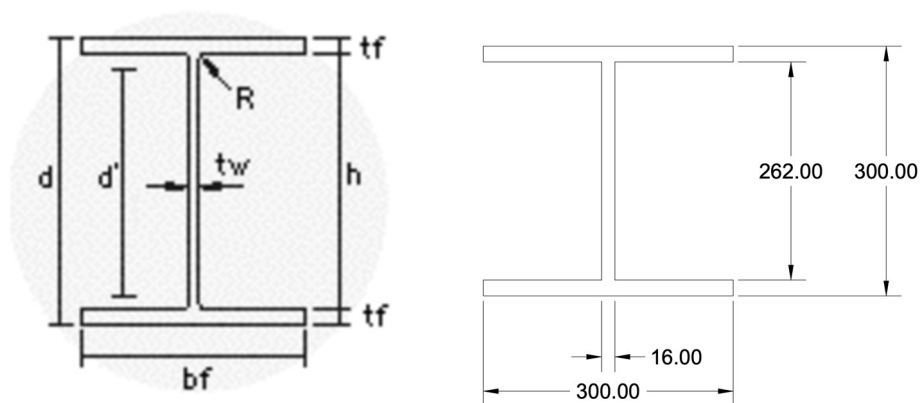
Fonte: CBMERJ (2018)

b) Cálculo do índice de massividade

O índice de massividade (u/Ag) de seção I sem revestimento exposta ao fogo por todos os lados, como apresentado na

Figura 10, é igual a u/Ag. Iniciamos o cálculo determinando o valor de u (perímetro exposto ao fogo), conforme Figura 24.

Figura 24: Cálculo de u aplicado ao caso concreto



Fonte: Divicom (2021)

$$u = 2b_f + 2h + 2(b_f - t_w) + 4t_f$$

$$u = 2(300) + 2(262) + 2(300-16) + 4(19) = 1768 \text{ mm} = 176,8 \text{ cm} \quad (25)$$

Logo, o fator de massividade do elemento não protegido é igual a:

$$u / Ag = 176,8 / 155,9 = 1,134 \text{ cm}^{-1} = 113,4 \text{ m}^{-1} \quad (26)$$

c) Cálculo da temperatura do pilar no TRRF

Inicialmente, adotou-se o intervalo de tempo até a chegada ao TRRF (Δt) igual a 180 s, seguindo a restrição prevista por Martins (2000) e abaixo demonstrada.

$$\Delta t \leq \frac{25000}{u / Ag [m^{-1}]}$$

$$\Delta t \leq \frac{25000}{113,4}$$

$$\Delta t \leq 220,46 \text{ s} \quad (27)$$

Sendo assim, empregando as equações apresentadas no subcapítulo 0 para cálculo da elevação da temperatura do aço e a marcha de cálculo proposta por Martins (2000), calculamos a evolução da temperatura até as temperaturas no TRRF (30 min) do gás ($\theta_{g\text{TRRF}}$) e do aço ($\theta_{a\text{TRRF}}$), como apresentado na Tabela 1, sendo iguais, respectivamente, a 841,80°C e a 835,92°C.

Tabela 1: Elevação de temperatura no gás e no aço

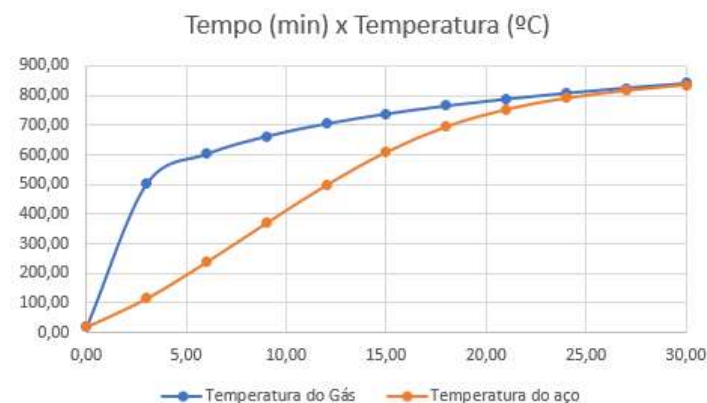
Tempo (min)	Tempo (s)	θ_g [°C]	φ_c (W/m ²)	φ_r (W/m ²)	φ (W/m ²)	$\Delta\theta_a$ [°C]	θ_a [°C]
0,00	0,00	20,00	0,00	-	-	-	20,00
3,00	180,00	502,29	12.057,23	10.033,61	22.090,84	95,74	115,74
6,00	360,00	603,12	12.184,53	16.055,92	28.240,45	122,39	238,12
9,00	540,00	662,85	10.618,07	19.810,70	30.428,77	131,87	369,99
12,00	720,00	705,44	8.386,04	21.136,65	29.522,69	127,94	497,94
15,00	900,00	738,56	6.015,55	19.669,35	25.684,90	111,31	609,25
18,00	1.080,00	765,67	3.910,53	15.820,43	19.730,96	85,51	694,76
21,00	1.260,00	788,62	2.346,52	11.143,62	13.490,14	58,46	753,22
24,00	1.440,00	808,52	1.382,35	7.344,34	8.726,69	37,82	791,04
27,00	1.620,00	826,08	875,90	5.028,01	5.903,91	25,59	816,63
30,00	1.800,00	841,80	629,18	3.822,10	4.451,28	19,29	835,92

Fonte: Autor

Por sua vez, o gráfico da

Figura 25 apresenta as curvas Tempo (min) x Temperatura (°C) do gás e do aço.

Figura 25: Curvas Tempo (min) x Temperatura (°C) do gás e do aço



d) Verificação se a temperatura do aço no TRRF é superior à temperatura crítica

Martins (2000) ratifica que, para que um elemento estrutural tenha resistência adequada em situação de incêndio, a temperatura atingida pelo mesmo no tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) não pode ultrapassar sua temperatura crítica.

Como verificado no subcapítulo 4.1, o ELU do perfil adotado não é de instabilidade local elástica à temperatura ambiente. Portanto, poderá ser adotada a temperatura crítica igual a 550° C (CBMERJ, 2019), não sendo necessário o cálculo apresentado no subcapítulo 0.

Desta forma, em razão da temperatura do aço no TRRF (835,92° C) ser superior à temperatura crítica (550° C), verifica-se a necessidade de proteção do elemento estrutural.

Dimensionamento da proteção

Tendo sido configurada a necessidade de proteção do elemento estrutural contra incêndio, passamos à seleção da proteção e, em seguida, à sua verificação. No presente trabalho, optamos por verificar tanto uma proteção tipo contorno quanto uma proteção tipo caixa.

a) Proteção tipo contorno

A proteção tipo contorno escolhida foi a tinta intumescente, por ser um material de aplicação razoavelmente simples mesmo em edificações já existentes, i. e., cuja obra já foi concluída. Selecionou-se o fabricante *Nullifire Limited* modelo S-605. Trata-se de uma formulação multicamada à base de solvente (Figura 26), certificada segundo a norma britânica de BS 476² e cuja aplicação pode ser feita por pistola pulverizadora ou rolo de pintura (NULLIFIRE, 2021).

Figura 26: Tinta intumescente do fabricante Nullifire Limited modelo S-605

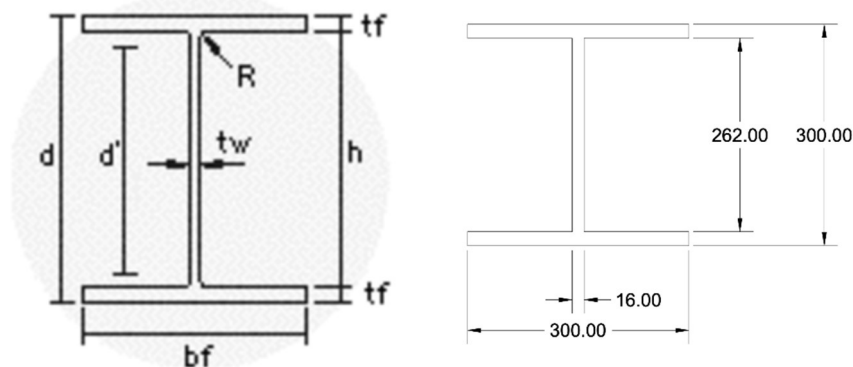


Fonte: Nullifire (2021)

Antes de apresentarmos a carta de cobertura, é necessário o cálculo do fator de massividade do elemento protegido, que será realizada de acordo com o primeiro caso da Figura 11, i. e., seção com revestimento tipo contorno, de espessura uniforme e exposta ao incêndio por todos os lados, sendo equivalente a u/Ag , onde u é o perímetro exposto ao fogo.

² *Flammability Test for Thin Flexible Materials.*

Figura 27: Cálculo de u aplicado ao caso concreto



Fonte: Divicom (2021)

$$u = 2b_f + 2h + 2(b_f - t_w) + 4t_f$$

$$u = 2(300) + 2(262) + 2(300-16) + 4(19) = 1768 \text{ mm} = 176,8 \text{ cm} \quad (28)$$

$$u / A_g = 176,8 / 155,9 = 1,134 \text{ cm}^{-1} = 113,4 \text{ m}^{-1} \quad (29)$$

A carta de cobertura do material selecionado consta no *Yellow Book* (GUIMARÃES, 2007 *apud* ASFP, 2004) e indica as espessuras para vigas e pilares de aço com as 4 faces expostas ao fogo e temperatura crítica bem próxima à adotada no trabalho (544 ° C), sendo, portanto, apropriada ao exemplo proposto. A tabela da Figura 28 revela que **a cobertura de 0,35 mm** (mínima) atende aos requisitos de proteção do elemento estrutural para fins de atendimento à norma.

Figura 28: Carta de cobertura da tinta intumescente (Nullifire S-605) para vigas e pilares de aço com 4 faces expostas ao incêndio, segundo ASFP (2004).

F (m ⁻¹)	Espessura requerida (mm) para o período de resistência ao fogo (min)			
	30	60	90	120
20	0,35	0,80	1,30	1,30
30	0,35	0,80	1,30	1,60
40	0,35	0,80	1,35	1,85
50	0,35	0,80	1,40	2,10
60	0,35	0,80	1,45	2,35
70	0,35	0,80	1,55	2,65
80	0,35	0,80	1,60	2,90
90	0,35	0,80	1,65	3,15
100	0,35	0,85	1,80	3,60
110	0,35	0,90	1,90	4,20
120	0,35	0,95	1,95	4,60
130	0,35	1,00	2,05	4,75
140	0,45	1,05	2,10	4,90
150	0,50	1,25	2,15	5,05
160	0,55	1,40	2,25	5,20
170	0,65	1,45	2,30	5,35
180	0,70	1,55	2,35	5,50
190	0,75	1,60	2,40	5,60
200	0,80	1,65	2,65	6,25
210	0,80	1,75	3,15	
220	0,85	1,80	3,70	
230	0,85	1,90	4,20	
240	0,90	1,95	4,70	
250	0,90	2,05	5,20	
260	0,95	2,10	5,70	
270	0,95	2,20	6,25	
280	1,00	2,25		
290	1,00	2,35		
300	1,05	2,40		
310	1,15	2,50		
320	1,20	2,70		

Deve ser considerado 0,1 mm para a tinta de fundo e tinta de acabamento

Fonte: Guimarães (2007).

b) Proteção tipo caixa

A proteção tipo caixa escolhida foi a placa rígida, por ser um material que se enquadra numa condição oposta à tinta intumescente quanto à facilidade de emprego em edificações já construídas. Dentre as opções do mercado, selecionou-se a placa rígida de lã mineral comprimida do fabricante *Cafco International* modelo *Cafco-Board*. Trata-se de um material que combina proteção ao fogo e isolamento termoacústico (Figura 29). Além disso, é um material classificado como classe A, a melhor classificação segundo a norma de reação ao fogo ASTM E84³ (ISOLATEK, 2021).

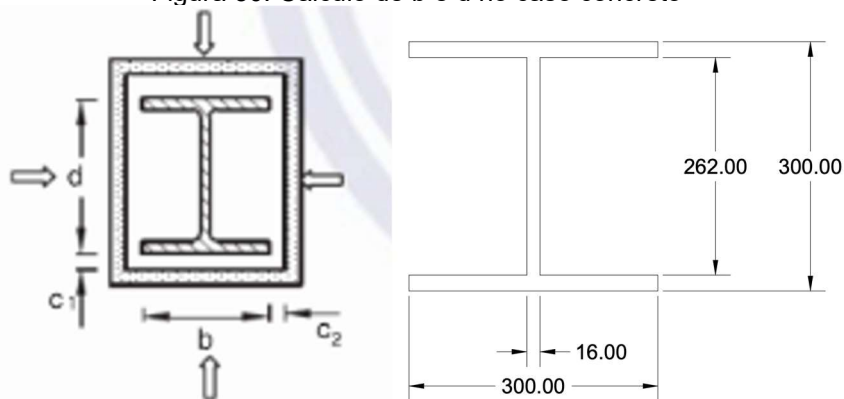
Figura 29: Operário instalando o Cafco-Board® em viga metálica



Fonte: Firestop Contractors International Association (2021)

Novamente, antes de apresentarmos a espessura de proteção, é necessário o cálculo do fator de massividade do elemento protegido, que será realizada de acordo com o segundo caso da Figura 11, i. e., seção com revestimento tipo caixa, de espessura uniforme e exposta ao incêndio por todos os lados, sendo equivalente a: $2(b + d) / Ag$

Figura 30: Cálculo de b e d no caso concreto



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323 (1999)

$$\begin{aligned} u / Ag &= 2 (b + d) / Ag \\ u / Ag &= 2 (30 + 30) / 155,9 \\ u / Ag &= 0,770 \text{ cm}^{-1} = 77,0 \text{ m}^{-1} \end{aligned} \quad (30)$$

³ Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials.

A Figura 31 consta no *Yellow Book* (ASSOCIATION FOR SPECIALIST FIRE PROTECTION *et al.*, 2002) e indica as espessuras para proteção tipo caixa de pilares utilizando o material selecionado. Analisando a tabela, verificamos que a espessura a ser aplicada ao elemento estrutural para fins de atendimento à norma **será a espessura mínima recomendada pelo fabricante, que é igual a 20 mm** (Figura 29).

Figura 31: Espessura do CAFCO® BOARD para pilares

		COLUMNS					Product thickness	
		Fire resistance period (minutes)						
Section factor A/V (Hp/A)		30	60	90	120	180	240	
		260	185	74	46			20mm
			250	96	59			25mm
			260	119	73	41		30mm
				143	86	48		35mm
				169	101	56	38	40mm
				196	116	63	43	45mm
				226	131	71	49	50mm
				260	164	87	59	60mm
					200	104	70	70mm
					239	122	82	80mm
					260	141	94	90mm
						160	106	100mm
					181	118	110mm	

Fonte: Association for Specialist Fire Protection (2002)

Considerações sobre as soluções (proteções) adotadas

Analisando o exemplo de dimensionamento proposto e confrontando as soluções apresentadas, a saber: proteção tipo caixa *Cafco-Board* e a tinta intumescente Nullifire S-605, foi possível constatar:

- Que, inicialmente, a temperatura do aço sem proteção no TRRF (
- (i) Tabela 1), foi calculada em 835,92°C. Nesta temperatura, a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade do aço são reduzidos em aproximadamente 90% em relação à temperatura ambiente (Figura 32), sendo latente a necessidade de proteção.

Figura 32: Redução da resistência à tração do aço e do módulo de elasticidade em função aumento da temperatura

Temperatura do aço θ_a °C	Fator de redução da resistência ao escoamento ^a $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade ^a $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
800	0,110	0,090
900	0,060	0,068
1 000	0,040	0,045
1 100	0,020	0,023
1 200	0,000	0,000

^a Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.

Fonte: ABNT NBR 14323:1999.

- (ii) Que a cobertura mínima por tinta intumescente Nullifire S-605 (0,35 mm) irá conferir ao pilar o TRRF previsto na NT 2-19 do CBMERJ, i. e., 30 minutos.
- (iii) Que, através da proteção tipo caixa, que conferiu ao elemento um fator de massividade de 77 m^{-1} , a espessura mínima da placa *Cafco-Board* (20 mm) garantirá ao elemento estrutural um tempo de resistência ao fogo de quase 90 minutos, ou seja, superior ao TRRF previsto na NT 2-19 do CBMERJ, como indicado no retângulo azul da Figura 30.

Neste exemplo específico e diante das soluções apresentadas, verifica-se que ambas as proteções atenderiam à norma. No entanto, a proteção tipo caixa de lã mineral, por conferir um tempo de resistência ao fogo superior à estrutura, garantirá um tempo maior para que as pessoas evacuem a edificação e para que o Corpo de Bombeiros realize as ações de busca, salvamento e combate a incêndio, sem que ocorra o colapso da edificação.

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo apresentar o método simplificado de dimensionamento em situação de incêndio aplicado a pilares de aço submetidos a compressão simples, conferindo ao elemento estrutural a proteção necessária no TRRF. Para tanto, utilizou-se um perfil de pilar interno de uma edificação hipotética como exemplo de dimensionamento, seguindo os requisitos da ABNT NBR 8800:2008 (em temperatura ambiente), bem como da NT 2-19 do CBMERJ e da ABNT NBR 14323:2013 (em situação de incêndio). Como o ELU do perfil adotado não era o de instabilidade local elástica, não foi necessário o cálculo da temperatura crítica segundo a norma da ABNT.

Na verificação realizada, constatou-se que a temperatura do pilar no TRRF (30 minutos) superava a temperatura crítica, sendo necessária sua proteção. Utilizou-se, para fins didáticos, primeiramente uma proteção do tipo contorno por tinta intumescente, sendo necessária uma cobertura de 0,35 mm para proteger o elemento estrutural e, num segundo momento, uma proteção do tipo caixa por placa rígida de lã mineral comprimida de 20 mm, que conferiu ao pilar um TRRF de quase 90 minutos.

Diante do apresentado, verifica-se que o projetista, além de compreender a NT 2-19 do Corpo de Bombeiros e o método de dimensionamento simplificado em situação de

incêndio, na seleção da forma e do tipo de material de revestimento contra fogo dos elementos estruturais, precisa analisar as diversas opções presentes nas cartas de coberturas fornecidas pelos fabricantes e em catálogos (como o *Yellow Book*), a fim de que adote a alternativa que atenda aos requisitos normativos e seja econômica ao cliente. Trata-se de mais um dos desafios que o novo COSCIP (2018) trouxe aos profissionais de SCI.

Por fim, ratificando o previsto no art. 8º da Lei Federal nº 13.425, de 30 de março de 2017, entende-se que os tópicos apresentados no presente trabalho deveriam ser parte do currículo de todos os cursos de engenharia civil. Afinal, é bem razoável que o processo construtivo, desde sua fase de dimensionamento estrutural, seja realizado visando à não ocorrência de colapsos prematuros das edificações em situação de incêndio, assegurando a saída das pessoas e o acesso do Corpo de Bombeiros para as operações de combate e salvamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLGAYER, A. A. **Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas de uma junta de aço ASTM A36 soldado pelo processo de arco submerso (SAW) com diferentes aportes térmicos**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola Politécnica. UNIVATES. Lajeado, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800** - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14323** - Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120** - Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIATION FOR SPECIALIST FIRE PROTECTION *et al.* **Fire protection for structural steel in buildings** – The yellow book. 3. ed. Farnham: ASFP, 2002.

BRASIL. **Lei Federal nº 13.425**: Estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público; altera as Leis nº s 8.078, de 11 de setembro de 1990, e 10.406, de 10 de janeiro de 2002 – Código Civil; e dá outras providências. Brasília: 2017.

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Proteção Estrutural Contra Incêndio**. Disponível em: <http://cursoscbca.com.br/moodle/arquivos/pdfs/Apostila_Sist_Estrut_peq/Apostila_Modulo_9_Protecao_Fogo_peq.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2020.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Nota Técnica 2-19**: Segurança estrutural contra incêndio - Resistência ao fogo dos elementos de construção. Rio de Janeiro, 2019.

DeHAAN, J. **Kirk's Fire Investigation**. 6. ed. New Jersey: Pearson, 2007.

DIVICOM. **Catálogos**. Disponível em: <https://www.mesaninos.com.br/catalogos.html>. Acesso em 10 abr 2021.

ESTADÃO. **Prédio desaba durante incêndio no centro de SP**; há ao menos um desaparecido. Disponível em: <<https://www.estadao.com.br/ao-vivo/predio-desabou>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

FIRESTOP CONTRACTORS INTERNATIONAL ASSOCIATION. **Fireproofing for Small Applications**. Disponível em: <https://fcia.org/wp-content/uploads/FCIAFireproofing-PMancusoISOLATEK.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2021.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Laudo aponta erro nos pilares do Palace 2**. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff19059836.htm>. Acesso em 15 mar 2021.

FRANSEN, J. M.; REAL, P. V. **Fire design of steel structures**. 1. ed. Mem Martins: ECCS, 2010.

GUIMARÃES, P. P. O. **Sobre o dimensionamento do revestimento contra fogo de estruturas de aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

ISOLATEK. **Cafco-Board®**. Disponível em: <https://www.isolatek.com/rigid-board/cafco-board/>. Acesso em: 20 mai. 2021.

KLEIN JUNIOR, O.; SILVA, V. P. **Ferramenta computacional para o dimensionamento de pilares de concreto armado em situação de incêndio**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267865266_Ferramenta_computacional_para_o_dimensionamento_de_pilares_de_concreto_armado_em_situacao_de_incendio_Computational_tool_for_the_reinforced_concrete_columns_fire_design. Acesso em 15 nov. 2020.

MARTINS, M. M. **Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2000.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **Guide for Fire and Explosion Investigations**. 2011. ed. Quincy: NFPA, 2011.

NBC. **Tehran's Iconic Plasco Building Collapses After Fire; 30 Reportedly Dead**. Disponível em: <https://www.nbcnews.com/news/world/tehran-s-iconic-plasco-building-collapses-after-fire-iran-state-n708721>. Acesso em 20 nov. 2020.

NULLIFIRE. **S605 Intumescent Basecoat**. Disponível em: https://www.nullifire.com/tr_TR/anasayfa/download/1416/download.html. Acesso em: 20 mai. 2021.

REBELLO, Y. C. P. **Estruturas de aço, concreto e madeira: atendimento da expectativa dimensional**. São Paulo: Zigurate Editora, 2005.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). **Decreto Estadual nº 42: Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico**. Rio de Janeiro, 2018.

SCADELAI, M. A., PINHEIRO, L. M. **Estruturas de concreto – capítulo 16**. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec802/Pilares/16%20Pilares.pdf>. Acesso em 20 mar 2021.

SILVA, V. P. *et al.* **Apostila para a disciplina PEF 2402: Estruturas metálicas e de madeira**. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/110863/mod_resource/content/0/apostila2012.pdf. Acesso em: 20 mar 2021.

USP. **Tabela de perfis**. Disponível em:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/555517/mod_resource/content/1/tabela_perfis_2014-2.pdf. Acesso em 20 mar 2021.

ZONA DE RISCO. **Lembrança: Incêndio do Edifício Grande Avenida**. Disponível em:

<<https://zonaderisco.blogspot.com/2014/04/lembranca-incendio-do-edificio-grande.html> >.

Acesso em: 20 nov. 2020.