

Nº 180146

Projeto da norma NBR 17144-4: proteção contra incêndio de elementos estruturais., ensaio de resistência ao fogo; parte 4: revestimentos aplicados a elementos de aço

Antonio Fernando Berto

*Palestra apresentada no
WORKSHOP DE PROTEÇÃO
PASSIVA CONTRA FOGO EM
ESTRUTURAS METÁLICAS, 2026,
São Paulo. 38 slides.*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública. **PROIBIDO REPRODUÇÃO**

Projeto de Norma **ABNT NBR 17144-4**
Proteção contra incêndio de elementos estruturais
Ensaio de resistência ao fogo
Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Antonio Fernando Berto
Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT



ESPECIALISTAS EM FOCO:
Workshop de Proteção Passiva Contra Fogo em Estruturas Metálicas

**SHERWIN
WILLIAMS®**



Projeto de Norma ABNT NBR 17144 – 4 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo

Parte 1: Membranas horizontais

Parte 2: Membranas verticais

Parte 3: Revestimentos aplicados a elementos de concreto

Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Parte 5: Revestimentos aplicados a elementos de madeira

Parte 6: Revestimentos aplicados a elementos mistos de concreto e aço

Parte 7: Revestimentos aplicados a elementos de aço com aberturas na alma

Parte 8: Revestimentos aplicados a barras de aço sob regime de tração

Baseado nas normas EN 13381-4, EN 13381-8, ISO 834-10 e ISO 834-11



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Avaliar a contribuição de revestimentos de proteção à resistência ao fogo de elementos estruturais de aço - vigas e pilares (I, H, L, U, T ou tubulares):

- *espessuras de material de proteção*
- *fator de forma dos perfis de aço*
- *temperaturas de projeto*
- *períodos de proteção contra incêndio → TRRF*

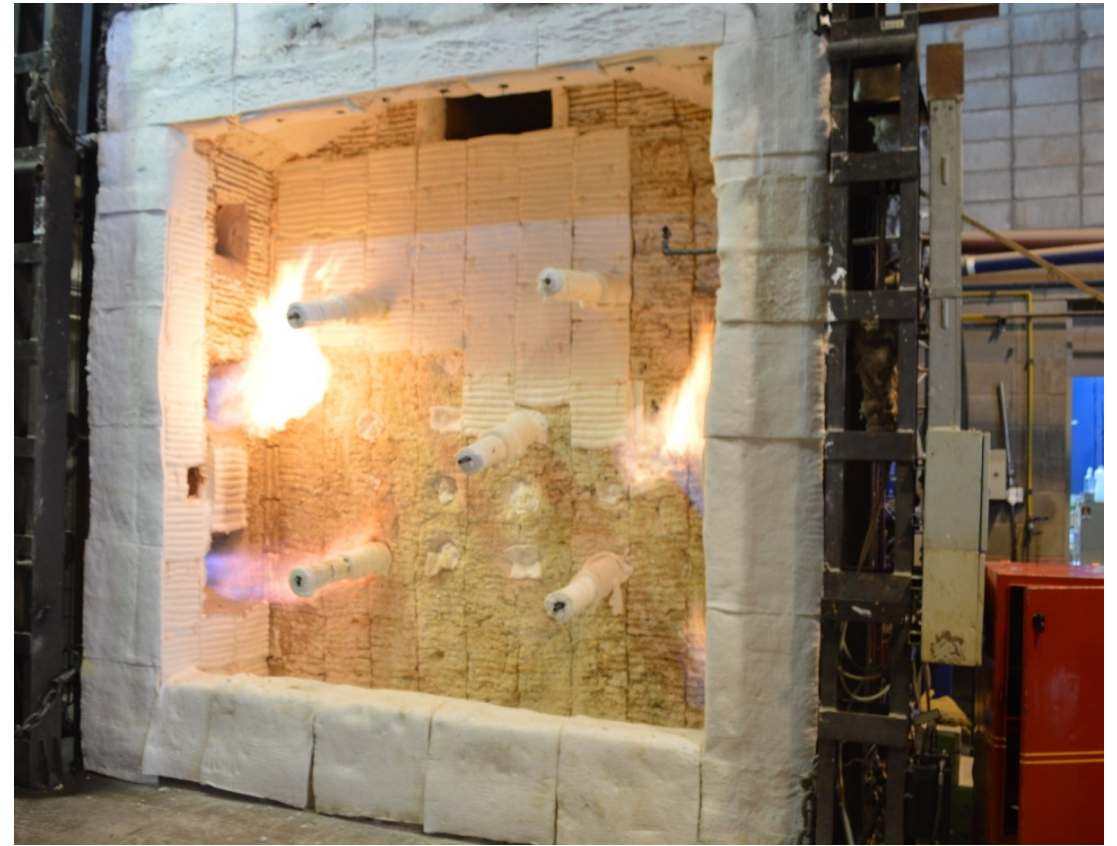
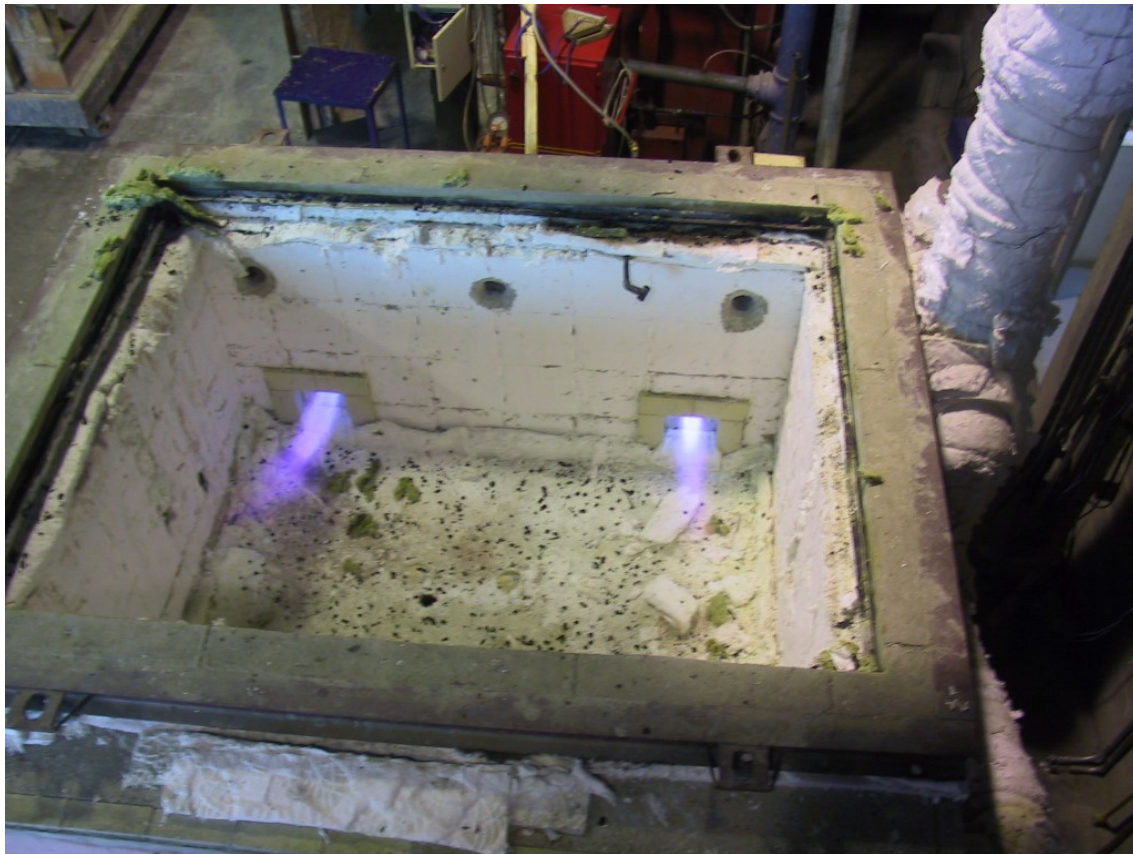
Definir aplicabilidade dos resultados obtidos nos ensaios e estabelecer condições para a aplicação direta desses resultados.

Os revestimentos podem ser reativos ou não-reativos: argamassas, pinturas, mantas e placas aplicadas em uma ou mais camadas.

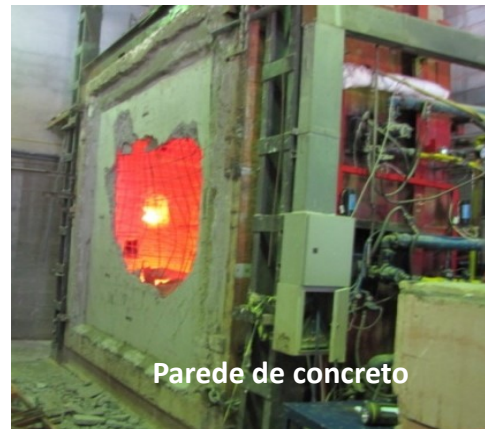
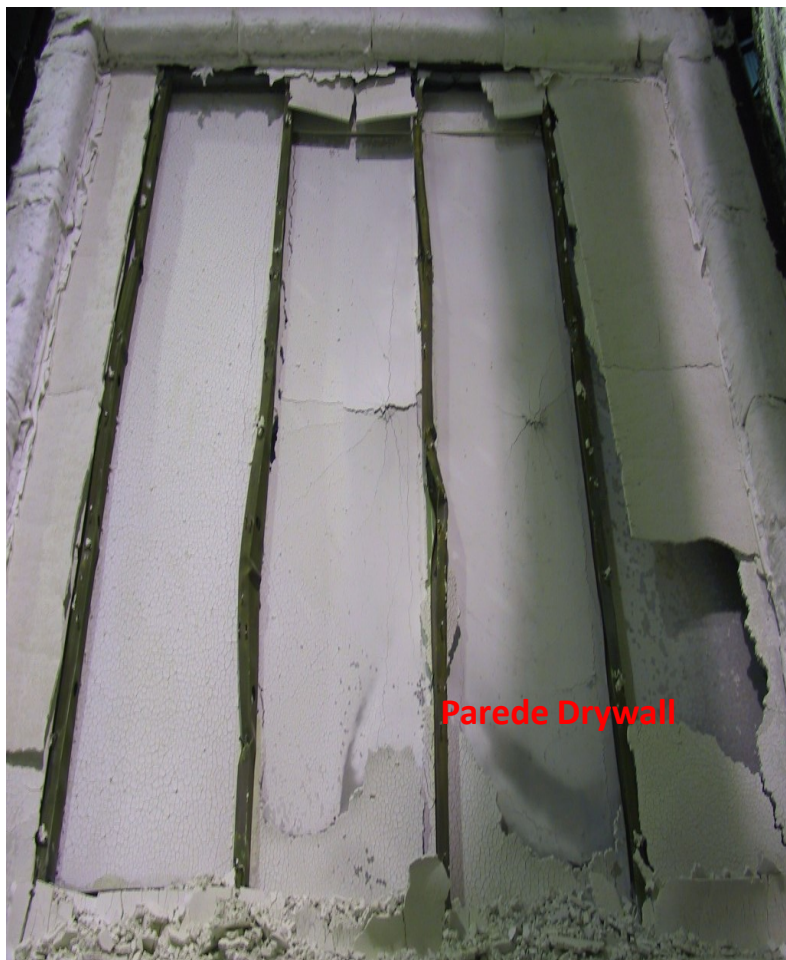


ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – **Ensaio de resistência ao fogo** – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Ensaio de resistência ao fogo em elementos construtivos

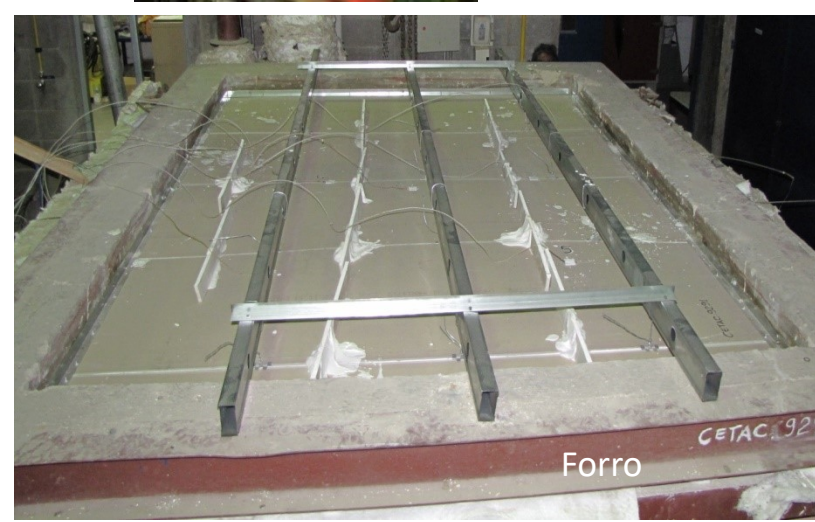
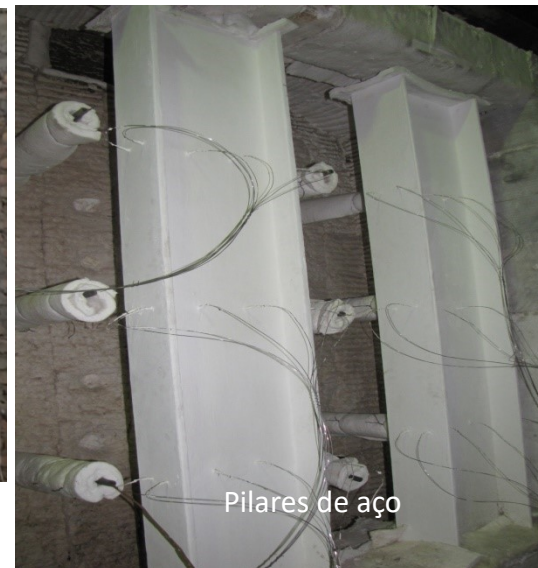
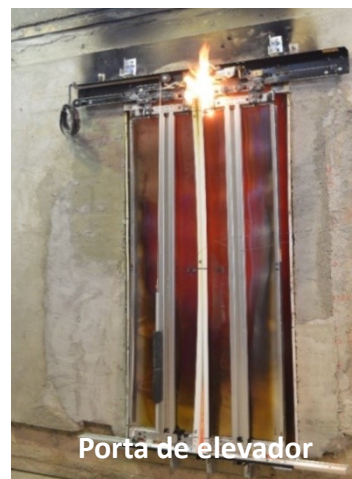


ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO



ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO

Laboratório de ensaios de resistência ao fogo em sistemas e elementos construtivos



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Equipamentos de ensaio devem atender a **ABNT NBR 16965, Ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos – Diretrizes gerais.**

Ensaio de resistência ao fogo em **vigas** e/ou **pilares** de aço, em grande escala carregados e em pequena escala não carregados, definem a capacidade do revestimento de proteger contra incêndio: *isolação térmica e aderência*.

Aderência é avaliada em vigas e pilares em grande escala, sob a ação de cargas e de aquecimento. Vigas: critério limite de deformação $L/30$. Pilares: contração axial limitante $h/100$ mm (como definido na ABNT NBR 16965).

Para revestimentos reativos é necessário realizar avaliações adicionais com base na curva de crescimento lento, também definida na **ABNT NBR 16965**.

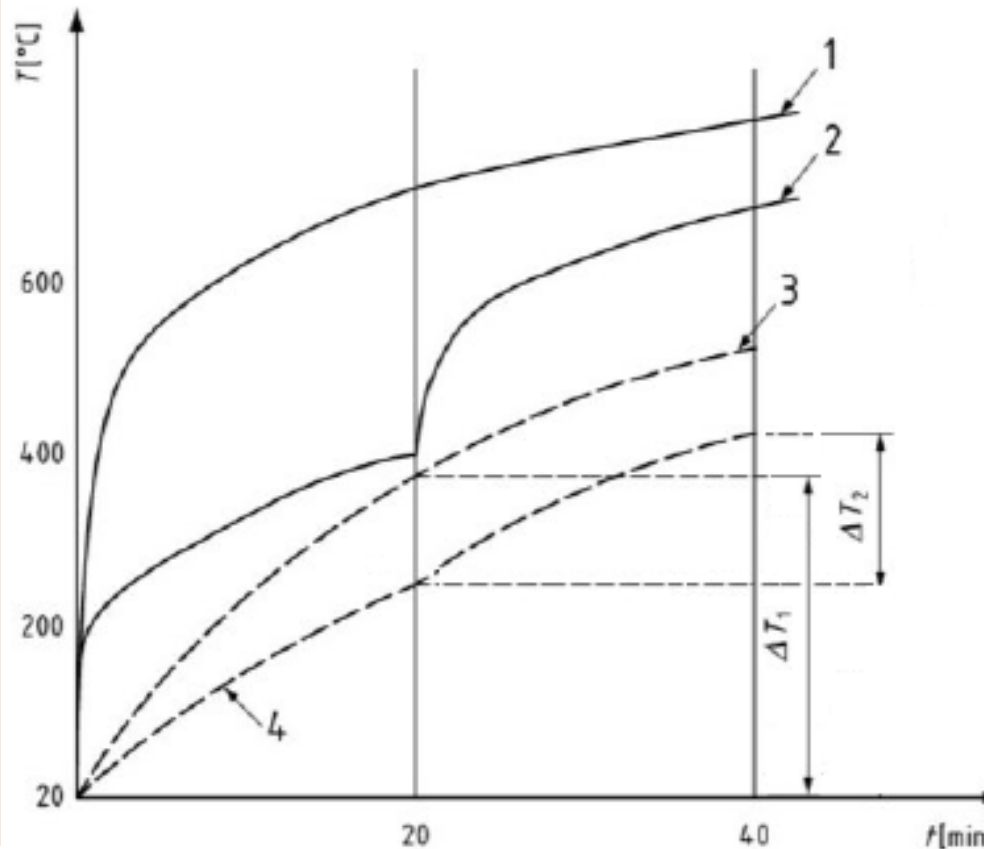
ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO

1 curva-padrão de elevação de temperatura

2 curva de crescimento lento

3 temperatura do aço para curva padrão

4 temperatura do aço para a curva de crescimento lento



ABNT NBR 16965, Ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos – Diretrizes gerais

ABNT NBR 5628, Componentes construtivos estruturais — Ensaio de resistência ao fogo

ABNT NBR 16945, Classificação da resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações

Curva padrão: $T = 20 + 345 \log(8t + 1)$ **Curva de cresc. Lento:** $T = 154 t^{0,25} + 20$, para $0 < t \leq 21$, e $T = 20 + 345 \log[8(t - 20) + 1]$, para $t > 21$

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

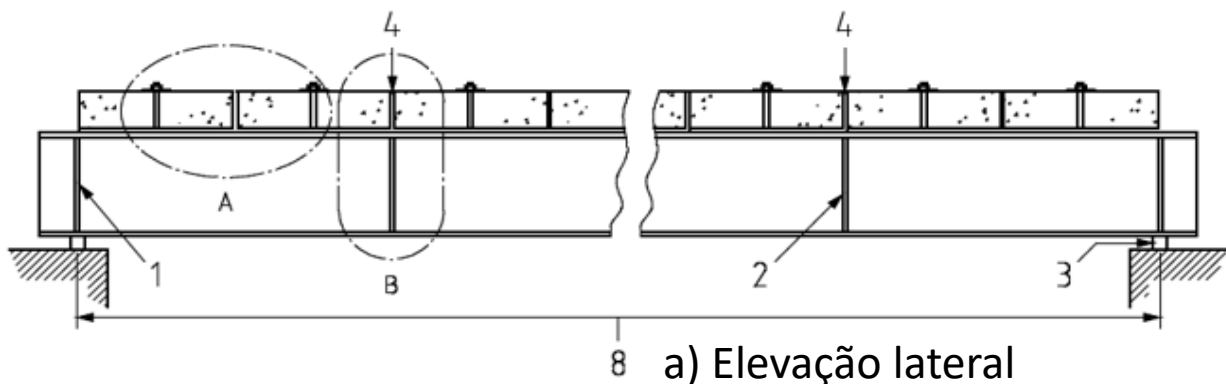
Perfis não carregados, comprimento exposto ao fogo de 1 m

- **perfis de referência:** comparação com os perfis em grande escala carregados - fatores de correção de aderência (obtido pela comparação entre resultados de perfis em grande escala carregados e de referência, utilizado para correção da aderência nos dados de perfis em pequena escala)
- **perfis em pequena escala:** relações tempo-temperatura-espessura de proteção, considerando fatores de correção de aderência

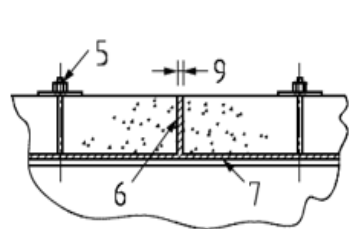
Perfis carregados, duas vigas/pilares em grande escala, com 2, 5 m de comprimento exposto ao fogo, para a menor e maior espessura do revestimento de proteção contra incêndio

- ensaiados para verificar a aderência à temperatura de 550 °C ou até a maior temperatura prevista para o aço no escopo da avaliação
- no ensaio de perfil em grande escala é incluído um perfil equivalente de referência
- dados obtidos nos ensaios são usados para determinar **fatores de correção para aderência** do revestimento de proteção

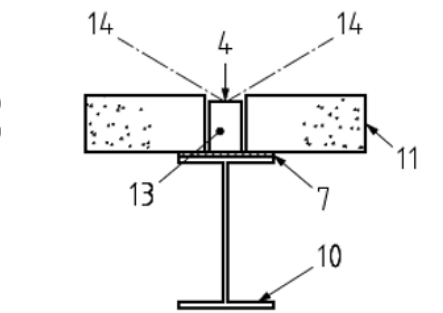
ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço



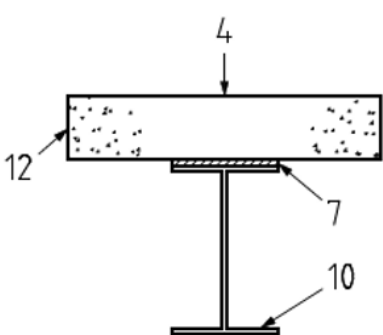
a) Elevação lateral



b) detalhe A –
Fixação da
cobertura da viga



c) detalhe B –
carregamento
aplicado sobre
elemento distribuidor
de carga



c) detalhe B –
carregamento aplicado
sobre elemento
distribuidor de carga

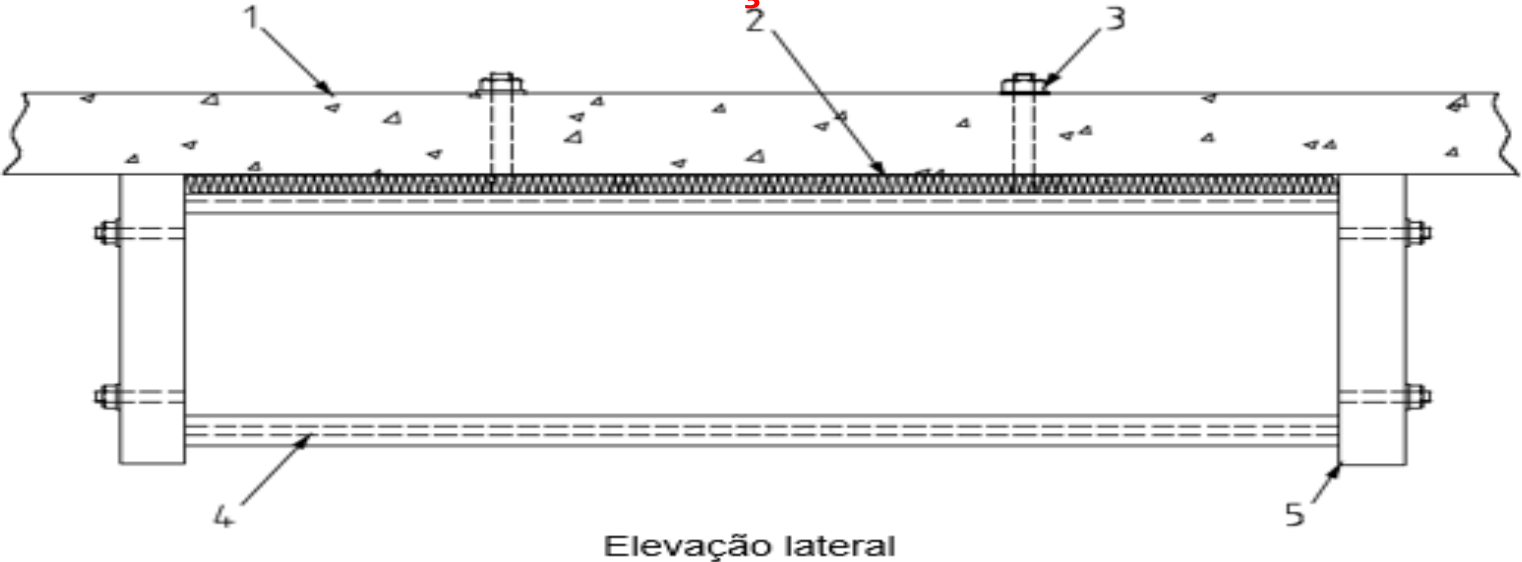
CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE ENSAIO - VIGA EM GRANDE ESCALA CARREGADA

- 1 reforço de alma em extremidade apoiada – Perfil I ou H
- 2 reforço de alma em pontos de carregamento – Perfil I ou H
- 3 espaço livre para assegurar que o revestimento interno do forno não interfira com a proteção do corpo de prova
- 4 carga aplicada de forma centralizada à parte superior da viga por meio de distribuidor de carga (13) ou à placa de concreto (12)
- 5 pino/placa/porca de travamento
- 6 isolamento térmico compressível
- 7 isolamento térmico compressível até a largura da viga

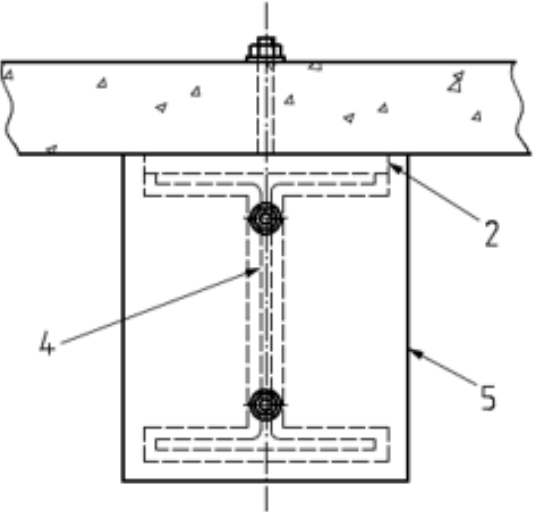
- 8 vão
- 9 espaçamento suficiente para garantir que a viga possa sofrer deflexão sem ser restringida pela placa de concreto
- 10 viga de aço (em perfil I neste exemplo)
- 11 placa de concreto aerado, com densidade, dimensões e fixação conforme Norma
- 12 placa de concreto leve, com densidade, dimensões e fixação conforme Norma
- 13 distribuidor de carga
- 14 fixação adicional para evitar rotação da viga, caso necessário

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE ENSAIO - VIGA NÃO CARREGADA



Elevação lateral



Elevação de extremidade

1 placa de cobertura (igual ao da viga em grande escala para a viga de referência; para outras vigas, deve ser de concreto aerado)

2 isolamento térmico compressível ao longo do perfil

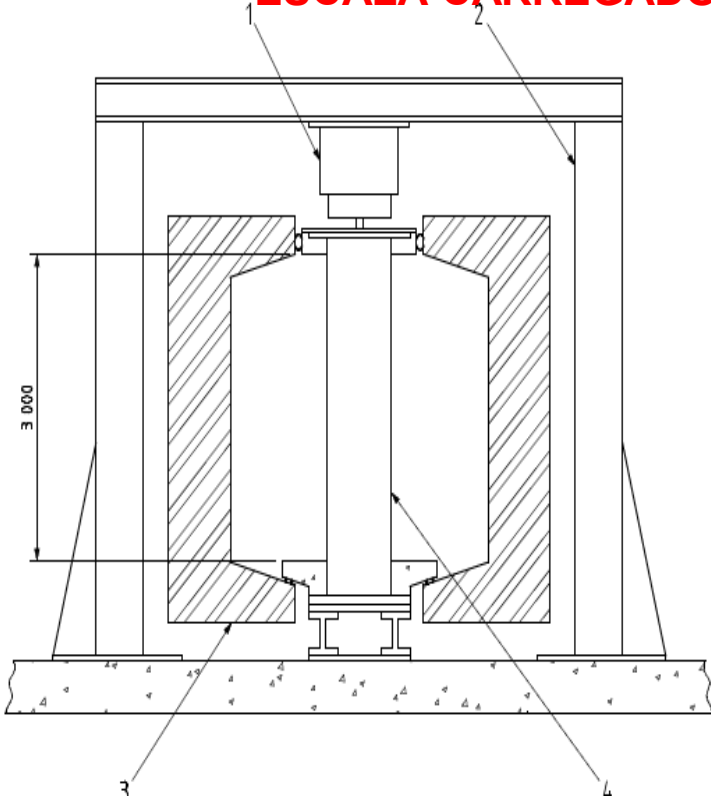
3 pino/placa/porca de travamento

4 perfil de aço

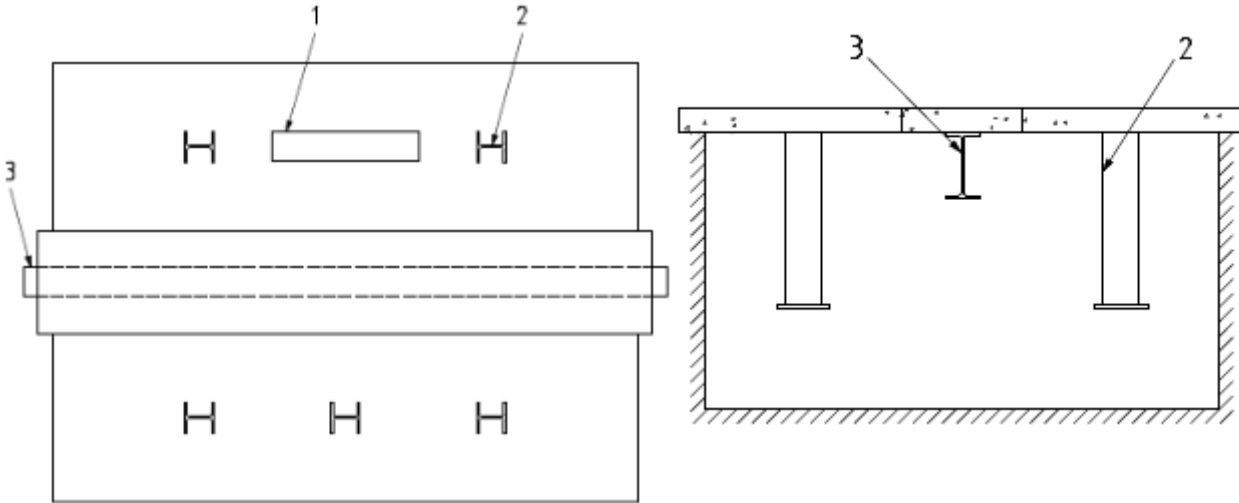
5 isolamento térmico na extremidade do perfil

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE ENSAIO - PILAR EM GRANDE ESCALA CARREGADO



- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1 macaco hidráulico | 3 forno |
| 2 quadro de carregamento | 4 pilar em grande escala |



- | | |
|---|-----------------------------------|
| 1 viga de referência (paralela à viga em grande escala carregada) | 2 pilares em pequena escala |
| | 3 viga em grande escala carregada |

CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE ENSAIO DE PILARES NÃO CARREGADOS



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

CARREGAMENTO DE VIGAS EM GRANDE ESCALA

Submetidos à carga total que represente 60 % do momento resistente, de acordo com a ABNT NBR 8800, calculada com base no limite de escoamento do aço.

A carga efetiva aplicada é a carga total calculada, deduzida do peso próprio da viga, da cobertura de concreto e do revestimento de proteção contra incêndio.

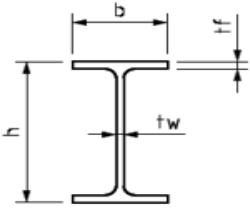
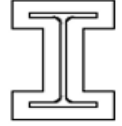

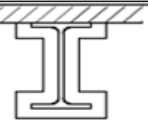
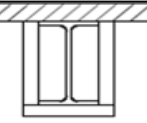
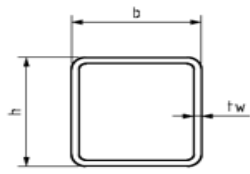

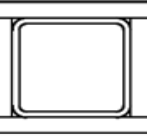
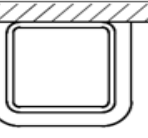
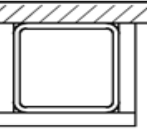
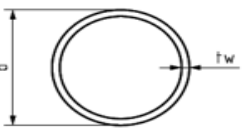
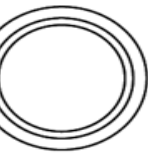
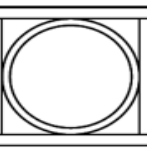
O método de carregamento deve ser realizado por um sistema que produza um momento fletor uniforme em pelo menos 20 % do vão central da viga.

CARREGAMENTO DE PILARES EM GRANDE ESCALA

Submetidos à carga total que represente 60 % da resistência à flambagem, de acordo com a ABNT NBR 8800, calculada com base no limite de escoamento do aço.

Os detalhes do cálculo para definir as cargas de ensaio devem ser incluídos no relatório de avaliação do revestimento.

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Perfil do aço	Perímetro (P) - Em contorno		Perímetro (P) - Em caixa	
<p><u>Perfil em I ou H</u></p>  <p>Área de seção transversal = $tw(h-2tf) + 2(b \times tf)$</p>	<p>4 lados $P = 4b + 2h - 2tw$</p> 	<p>4 lados $P = 2b + 2h$</p> 	<p>3 lados $P = 3b + 2h - 2tw$</p> 	<p>3 lados $P = b + 2h$</p> 
<p><u>Perfis quadrados ou retangulares</u></p>  <p>Área de seção transversal = $2b \times tw(h-2tw) \times (2tw)$</p>	<p>4 lados $P = 2b + 2h$</p> 	<p>4 lados $P = 2b + 2h$</p> 	<p>3 lados $P = b + 2h$</p> 	<p>3 lados $P = b + 2h$</p> 
<p><u>Perfis circulares ocios</u></p>  <p>Área de seção transversal = $\pi(d+2)^2 - \pi[(d-2tw)+2]^2$</p>	<p>$P = \pi d$</p> 	<p>$P = \pi d$</p> 		
Fator de forma = Perímetro / Área da seção transversal				

Caracterização de revestimentos de proteção contra incêndio

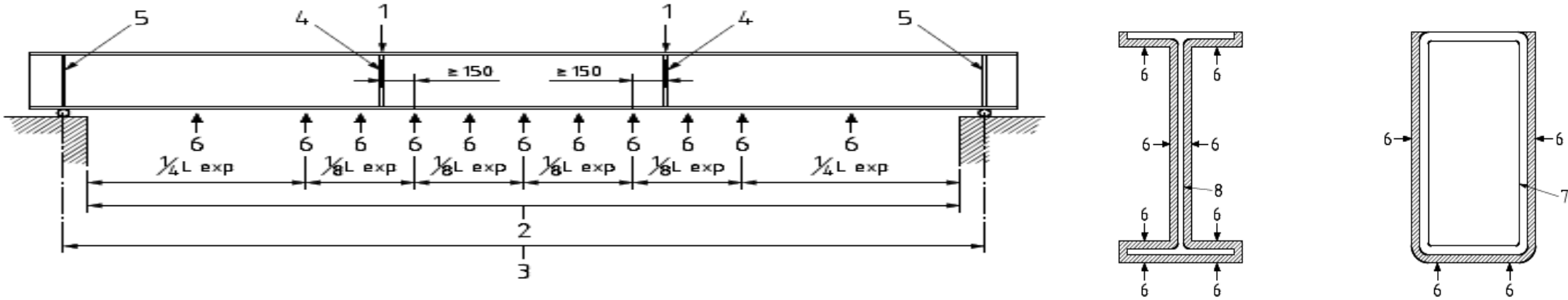
- Para revestimentos não reativos, deve-se determinar a densidade, o teor de umidade e a espessura
 - Para revestimentos reativos, deve-se determinar a espessura

Qualquer variabilidade na **densidade** do revestimento não reativo não pode diferir em mais de 15 % da média em todo o revestimento.

Caso esse limite seja atendido, a média deve ser utilizada na avaliação dos resultados e na determinação dos limites de aplicabilidade da avaliação.

Caso esse limite não seja atendido, a maior densidade registrada deve ser utilizada na avaliação e na determinação dos limites de aplicabilidade da avaliação.

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço



1 carga	5 enrijecedores de alma em extremidade apoiada, caso necessário – Perfil I ou H
2 comprimento exposto ao fogo L_{exp}	6 posições de medição da espessura do revestimento
3 vão	7 viga de perfil tubular
4 enrijecedores de alma em pontos de carregamento, caso necessário – Perfil I ou H	8 viga de perfil I ou H



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Espessura média dos revestimentos: média dentre todas as medições efetuadas para cada corpo de prova.

Espessura de revestimentos do tipo placa não pode diferir em mais de 15 % da média em toda a sua superfície. Caso esse limite não seja atendido, a maior espessura registrada deve ser utilizada na avaliação e na determinação dos limites de aplicabilidade da avaliação.

A espessura de revestimentos jateados, não pode diferir em mais de 20 % da média em toda a superfície do corpo de prova. Caso esse limite não seja atendido, a maior espessura registrada deve ser utilizada na avaliação e na determinação dos limites de aplicabilidade da avaliação.

As espessuras de revestimentos de perfis em grande escala carregados a serem usadas na avaliação devem ser as mesmas espessuras aplicadas aos perfis de referência para correção dos dados de aderência. A diferença entre as espessuras em cada caso não deve ser superior a 10 % ou a ± 5 mm da maior espessura, o que for menor.



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Revestimentos reativos: medir a espessura média do *primer*; em seguida, aplicar o revestimento reativo e medir a espessura total resultante, calculando a média das medições.

Variações permitidas na espessura do revestimento reativo, excluindo o *primer* e o *top coat* :

Nas seções de medição de temperatura:

- No mínimo 68 % das medições não podem diferir em mais de 20 % da média;
- No mínimo 95 % das medições não podem diferir em mais de 30 % da média;
- Nenhuma das medições pode diferir em mais de 45 % da média.

No geral:

- No mínimo 68 % das medições não podem diferir em mais de 20 % da média das seções de medição de temperatura;
- No mínimo 95 % das medições não podem diferir em mais de 30 % da média das seções de medição de temperatura;
- Nenhuma das medições pode diferir em mais de 45 % da média das seções de medição de temperatura.

Se a espessura do revestimento reativo estiver fora dessas tolerâncias, os corpos de prova devem ser ajustados para atender a essas exigências.

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Densidade e o teor de umidade de revestimentos não reativos

Perfis em grande escala carregados: a densidade do revestimento usada na avaliação (média ou máxima, de acordo com os critérios de variação da densidade) deve ser a mesma para os perfis de referência e/ou perfis em pequena escala. A diferença entre as densidades, em cada caso, não deve ser superior a 10 % da maior densidade, para uma mesma espessura de revestimento.

No momento do ensaio, o teor de umidade do corpo de prova deve aproximar-se das condições normais de uso. Se o corpo de prova contiver ou for suscetível à absorção de umidade, ele não pode ser ensaiado até atingir uma condição de secagem ao ar.



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Escopo	Pacote de ensaio	Vigas em grande escala ^f	Pilares em grande escala ^f	VR ^b	Pr ^e	VIPE ^c	PIPE ^d	Total de perfis em pequena escala	Procedimento de correção definidos na Norma
Vigas I ^a	1 ^g	✓		2		11		13	a)
Pilares I ^a	2 ^h		✓		2		11	13	b)
Vigas I + Pilares I ^a	3 ⁱ	✓		2		11	13	26	c)
Vigas I + Pilares I ^a	4 ^j	✓		2			13	15	d)

^a “I” representa perfis com seção transversal I ou H

^b VR = Viga de referência. Deve ser incluída na análise térmica do revestimento de proteção.

^c VIPE = Viga “I” em pequena escala

^d PIPE = Pilar “I” em pequena escala

^e PR = Pilar de referência. Deve ser incluído na análise térmica do revestimento de proteção.

^f selecionados conforme critérios da Norma

^g pacote para avaliação de vigas (exposição em 3 faces)

^h pacote para avaliação de pilares (exposição em 4 faces)

ⁱ pacote para avaliação de vigas e pilares (exposição, respectivamente, em 3 e 4 faces)

^j pacote para avaliação de vigas e pilares (exposição em 4 faces, mas pode ser aplicado de modo conservador para vigas expostas em 3 faces)

Seleção de corpos de prova em avaliações de revestimentos não reativos para perfis I ou H

O mesmo revestimento de proteção com número distinto de camadas exige pacotes distintos de ensaios.



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Seleção de corpos de prova em avaliações de revestimentos não reativos para perfis tubulares

Escopo	Pacote de ensaio	Vigas em grande escala ^a	Pilares em grande escala ^a	Perfis de referência	Vigas tubulares (pequena escala)	Pilares tubulares em pequena escala	Total de perfis em pequena escala	Procedimento de correção definidos na Norma
Vigas tubulares	1 ^b	✓		2	4		6	e)
Pilares tubulares	2 ^c		✓	2		4	6	f)

^a selecionados conforme critérios da Norma

^b pacote para avaliação de vigas (exposição em 3 faces)

^c pacote para avaliação de pilares (exposição em 4 faces)



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Escopo	Pacote de ensaio	Vigas em grande escala ^f	Pilares em grande escala ^f	VR ^b	PR ^e	VIPE ^c	PIPE ^d	Total de perfis em pequena escala	Procedimento de correção definidos na Norma
Vigas I ^a	1 ^g	✓		2		13		15	a)
Pilares I ^a	2 ^h		✓		2		13	15	b)
Vigas I + Pilares I ^a	3 ⁱ	✓		2		13	15	30	c)
Vigas I + Pilares I ^a	4 ^j	✓		2			15	17	d)

^a “I” representa perfis com seção transversal I ou H

^b VR = Viga de referência. Esta viga deve ser incluída na análise térmica do revestimento de proteção.

^c VIPE = Viga “I” em pequena escala

^d PIPE = Pilar “I” em pequena escala

^e PR = Pilar de referência. Este pilar deve ser incluído na análise térmica do revestimento de proteção.

^f selecionados conforme 7.6.2

^g pacote para avaliação de vigas (exposição em 3 faces)

^h pacote para avaliação de pilares (exposição em 4 faces)

ⁱ pacote para avaliação de vigas e pilares (exposição, respectivamente, em 3 e 4 faces)

^j pacote para avaliação de vigas e pilares (exposição em 4 faces, mas pode ser aplicado de modo conservador para vigas expostas em 3 faces)

Seleção de corpos de prova em avaliações de revestimentos reativos para perfis I ou H



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Seleção de corpos de prova para avaliações de revestimentos reativos para perfis tubulares

Escopo	Pacote de ensaio	Vigas em grande escala ^a	Pilares em grande escala ^a	Perfis de referência	Vigas tubulares (pequena escala)	Pilares tubulares em pequena escala	Total de perfis em pequena escala	Procedimento de correção definidos na Norma
Vigas tubulares	1 ^b	✓		2	4		6	e)
Pilares tubulares	2 ^c		✓	2		4	6	f)

^a selecionados conforme critérios da Norma

^b pacote para avaliação de vigas (exposição em 3 faces)

^c pacote para avaliação de pilares (exposição em 4 faces)

Quando o revestimento de proteção for aplicável a perfis tubulares circulares e retangulares, adotam-se seções retangulares nos pacotes de ensaio de perfis tubulares.



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

FATOR DE FORMA e ESPESSURA DE REVESTIMENTO para a análise térmica perfis I ou H

A gama de fatores de forma de perfis e espessuras de revestimento a ser avaliada deve ser determinada a partir da amplitude da usabilidade do produto de revestimento na aplicação de uso final.

São definidos coeficientes de variação entre 0 e 1:

- K_d para a espessura do revestimento e
- K_s para o fator de forma dos perfis

Os coeficientes permitem definir os intervalos de espessuras de revestimento e de fator de forma dos perfis.

Para o fator de forma dos perfis: $s_p = K_s (s_{max} - s_{min}) + s_{min}$

s_p é o fator de forma do perfil no fator K_s ;

s_{max} é o maior fator de forma dos perfis no escopo da avaliação, relativo a um fator $K_s = 1$;

s_{min} é o menor fator de forma dos perfis no escopo da avaliação, relativo a um fator $K_s = 0$.

EXEMPLO: Para fatores de forma de 60 m⁻¹ a 300 m⁻¹ e $K_s = 0,3$, o intervalo do fator de forma será $0,3 \times (300-60) + 60 = 132$ m⁻¹.

Para a espessura de revestimento: $d_p = K_d (d_{max} - d_{min}) + d_{min}$

d_p é a espessura de revestimento no fator K_d ;

d_{max} é a maior espessura de revestimento no escopo da avaliação, relativa a um fator $K_d = 1$;

d_{min} é a menor espessura de revestimento no escopo da avaliação, relativa a um fator $K_d = 0$.

EXEMPLO: Para espessuras de 10 mm a 50 mm e $K_d = 0,3$, o intervalo de variação de espessura será $0,3 \times (50-10) + 10 = 22$ mm.



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Gama de coeficientes de fatores de forma e espessuras de revestimento de perfis I ou H

Gama de coeficientes de fatores de forma (K_s)	Gama de coeficientes de fatores de espessura (K_d)			
	0,0 (d_{min})	0,2 a 0,4	0,6 a 0,8	1,0 (d_{max})
0,0 (s_{min})	✓	✓	✓	✓
0,2 a 0,4	✓	*	✓	✓
0,6 a 0,8	✓	✓	*	✓
1,0 (s_{max})		✓	✓	✓

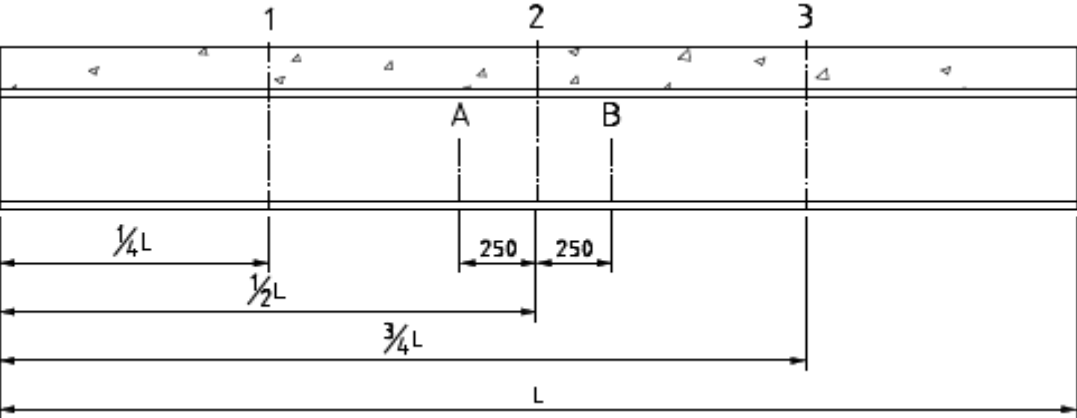
✓ Corpos de prova necessários para qualquer avaliação

* Corpos de prova adicionais para pacotes de ensaio 4 (mostrados nas tabelas de seleção de Corpos de prova para Revestimentos Não Reativos e para revestimentos reativos I ou H)

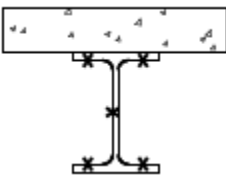


ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

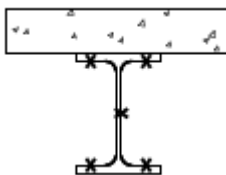
A instrumentação para medição de temperatura, pressão interna do forno, carga aplicada, deformação e contração devem atender à ABNT NBR 16965.



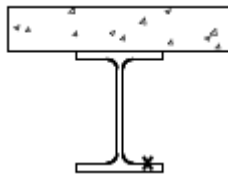
Elevação lateral da viga em grande escala carregada



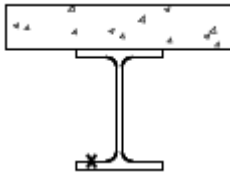
Seções 1 e 3



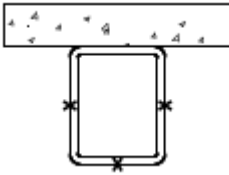
Seção 2



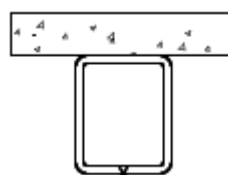
Seção A



Seção B



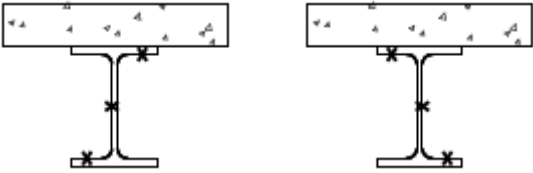
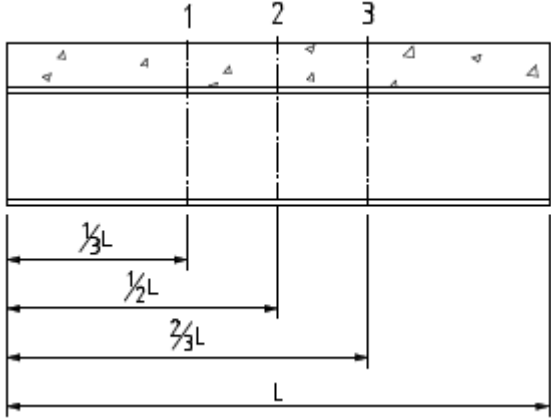
Seções 1 a 3



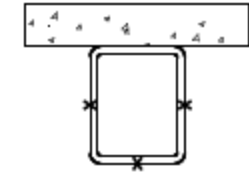
Seções A e B

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

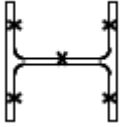
Elevação lateral da viga não carregada



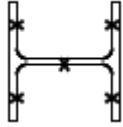
Seções 1 e 3 Seção 2



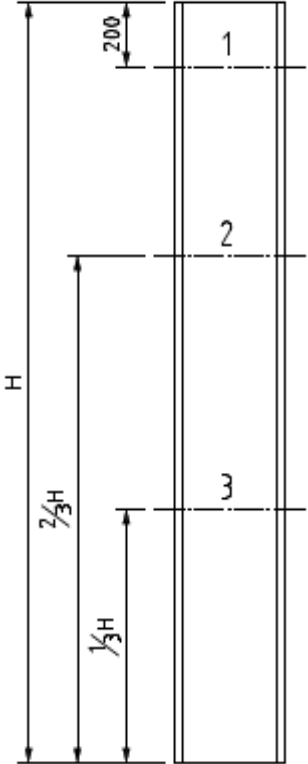
Seções 1, 2 e 3



Seções 1 e 3



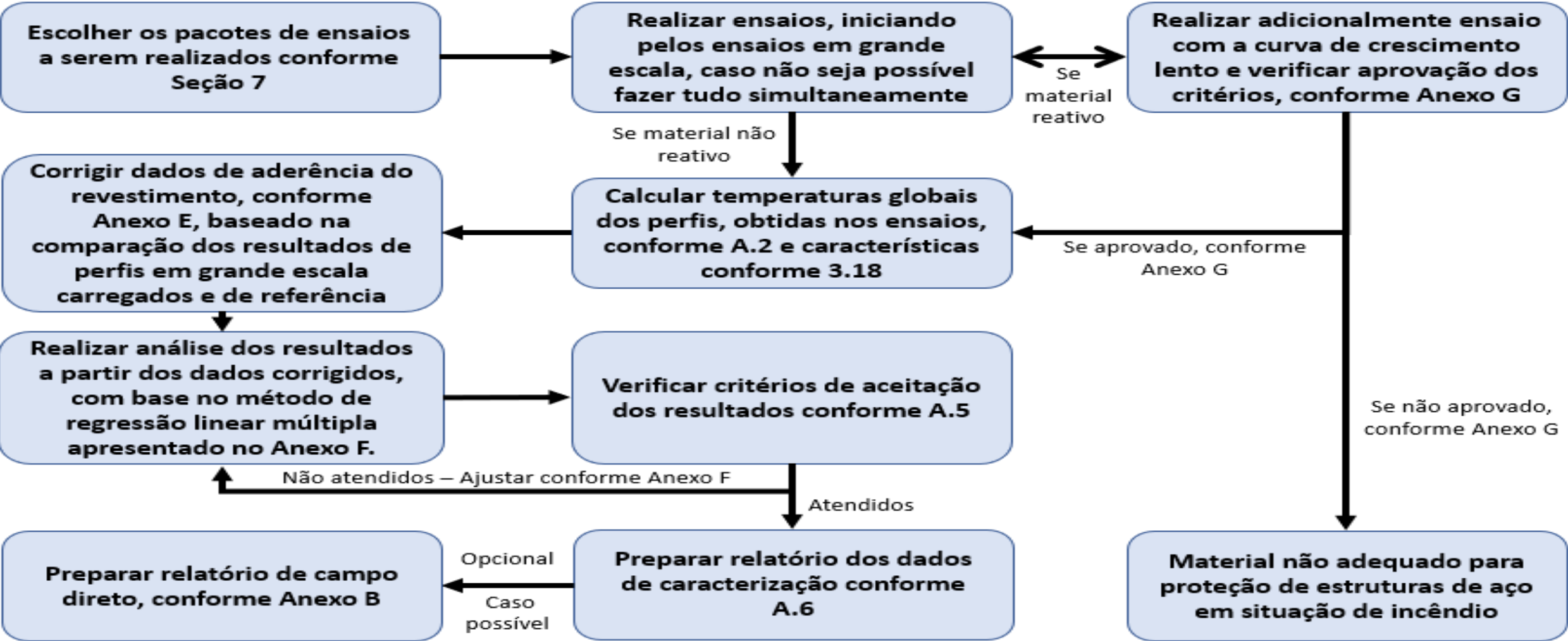
Seção 2



Elevação lateral de pilar em grande escala carregado



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço



Fluxograma para avaliação dos revestimentos



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Diretrizes para seleção de perfis em grande escala carregados para avaliação da aderência de revestimentos contínuos

Perfil em grande escala carregado	Espessura de proteção	Fator de forma	Altura ou largura mínima da seção transversal (mm)
Viga 1	Máxima	Próximo ao valor médio do escopo da avaliação	300
Viga 2	Mínima	Próximo ao valor médio do escopo da avaliação	300
Pilar 1	Máxima	Próximo ao valor médio do escopo da avaliação	200
Pilar 2	Mínima	Próximo ao valor médio do escopo da avaliação	200

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Cálculo da temperatura média global de cada perfil

A temperatura do aço para fins de avaliação dos resultados deve ser a temperatura média global de cada perfil, calculada da seguinte forma:

- **para vigas I ou H:** (média da mesa superior + média da alma + média da mesa inferior) / 3;
- **para pilares I, H ou tubulares:** média entre cada seção de medição de temperatura;
- **para vigas tubulares:** (média das superfícies laterais + média da superfície inferior) / 2.

Temperatura característica do aço

Temperatura utilizada para a determinação do fator de correção de aderência, calculada como (temperatura média global do perfil + temperatura máxima do perfil)/2

Correções dos dados de aderência do revestimento para a análise térmica

Devem ser determinados os fatores de correção de aderência para a gama de espessuras ensaiada e os tempos finais corrigidos para atingir as temperaturas de interesse.

A temperatura característica do aço deve ser utilizada para a determinação dos fatores de correção de aderência.

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Correção dos dados de aderência do revestimento

Corrigir os dados obtidos em pequena escala tomando como base os resultados em grande escala carregadas e de referência, considerando as proteções obtidas pela mínima e máxima espessura do revestimento.

Método de correção dos tempos para atingir temperaturas de projeto: $t_a = t_1 \times \frac{S_1}{S} \times \frac{D}{D_1}$

t_a é o tempo ajustado

t_1 é o tempo para o perfil de referência atingir a temperatura de projeto

S é o fator de forma do perfil em grande escala carregado

S_1 é o fator de forma do perfil de referência

D é a espessura do revestimento de proteção contra incêndio aplicado ao perfil em grande escala carregado

D_1 é a espessura do revestimento de proteção contra incêndio aplicado ao perfil de referência.

Cálculo do fator de correção de aderência: $k = \frac{t_g}{t_a}$

t_g é o tempo para o perfil em grande escala carregado atingir a temperatura de projeto.

Caso o valor obtido seja superior a 1, o fator deve ser limitado a 1.

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Cálculo dos tempos finais corrigidos

Para cada perfil em pequena escala e para cada temperatura de projeto, o fator de correção de aderência (k_i) deve ser determinado por interpolação linear entre os valores máximo e mínimo:

$$k_i = \left[\frac{k_{max} - k_{min}}{d_{max} - d_{min}} \right] (d_i - d_{min}) + k_{min}$$

k_i é o fator de correção de aderência para o perfil em pequena escala na espessura i ;

k_{max} é o fator de correção de aderência obtido pelo cálculo com a máxima espessura de revestimento;

k_{min} é o fator de correção de aderência obtido pelo cálculo com a mínima espessura de revestimento;

d_i é a espessura de revestimento do perfil em pequena escala, em mm;

d_{max} é a espessura máxima de revestimento para o perfil em grande escala carregado, em mm;

d_{min} é a espessura mínima de revestimento para o perfil em grande escala carregado, em mm.

Os tempos para os perfis em pequena escala atingirem as temperaturas de projeto devem ser corrigidos pelo fator (k_i).

O tempo final de cada perfil em pequena escala a ser usado na avaliação deve ser calculado por $t_{fi} = k_i \times t_{1i}$

t_{fi} é o tempo final para cada perfil i em pequena escala a ser usado na avaliação;

k_i é o fator de correção de aderência para o perfil em pequena escala na espessura i ;

t_{1i} é o tempo medido para o perfil i em pequena escala atingir a temperatura de projeto.



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Exemplo de cálculo de temperaturas finais

Perfil em pequena escala	Espessura da proteção (d_i) mm	Tempo até a temperatura de projeto (t_{1i}) min	Fator de correção k_i	Tempo final (t_{fi}) min
1	12,2	60	0,980	58,8
2	25,5	85	0,943	80,2
3	30,7	94	0,929	87,3
4	38,4	113	0,908	102,6

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Dados de entrada

- Temperatura de projeto
- Tempos finais corrigidos para atingir temperatura de projeto
- Fatores de forma calculados para perfis
- Espessuras ensaiadas dos revestimentos de proteção

Análise por regressão linear múltipla é realizada com a seguinte equação:

$$t = a_0 + a_1 d_p + a_2 \left(\frac{d_p}{A_m/V} \right) + a_3 \theta_a + a_4 d_p \theta_a + a_5 \left(d_p \frac{\theta_a}{A_m/V} \right) + a_6 \left(\frac{\theta_a}{A_m/V} \right) + a_7 \left(\frac{1}{A_m/V} \right)$$

t é o tempo para atingir a temperatura de projeto, em min;

d_p é a espessura do revestimento de proteção contra incêndio, em m;

A_m/V é o fator de forma do perfil de aço, em m^{-1} ;

a_0 a a_7 são os coeficientes da regressão linear múltipla;

θ_a são as temperaturas de projeto do aço, em °C.

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Cálculo das espessuras de revestimento para os dados de caracterização

Utilizando os coeficientes da regressão, determina-se as espessuras mínimas de revestimento em função dos fatores de forma de perfis, temperaturas de projeto e tempos de resistência ao fogo

$$d_p = \frac{t - a_0 - a_3\theta_a - \left(\frac{a_6\theta_a}{\frac{A_m}{V}}\right) - \left(\frac{a_7}{\frac{A_m}{V}}\right)}{a_1 + a_4\theta_a + \left(\frac{a_2}{\frac{A_m}{V}}\right) + \left(\frac{a_5\theta_a}{\frac{A_m}{V}}\right)}$$

- t é o tempo para atingir a temperatura de projeto, em min
- d_p é a espessura do revestimento de proteção contra incêndio, em m
- A_m/V é o fator de forma do perfil de aço, em m^{-1}
- a_0 a a_7 são os coeficientes da regressão linear múltipla
- θ_a é a temperatura crítica do aço, em $^{\circ}C$

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Tempo de resistência ao fogo – TRF 30 min								
Temperatura de projeto (°C)	350	400	450	500	550	600	650	700
Fator de forma (m ⁻¹)	Espessura do revestimento para manter a temperatura do elemento de aço abaixo da temperatura de projeto							
40								
45								
50								
55								
60								
65								
70								
75								
...								
240								
245								
250								
255								
260								
265								
270								
275								
280								
285								
290								
295								
300								



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Aceitação do método de avaliação empregado e dos dados de caracterização

A aceitação da avaliação deve contemplar todos os dados dentro das temperaturas alcançadas e toda a duração dos ensaios:

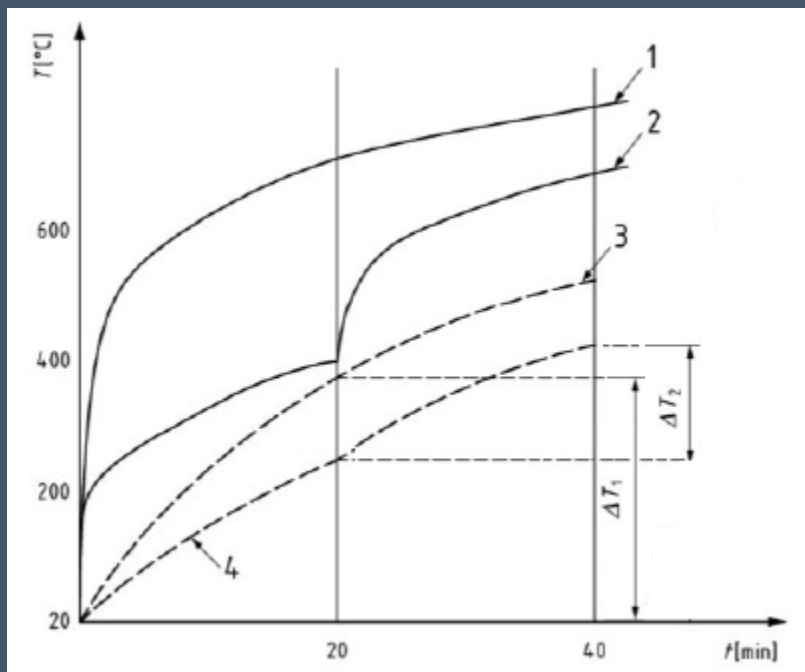
- a) Para cada perfil em pequena escala, o tempo para atingir cada temperatura de projeto, calculado a partir da regressão, não pode exceder o respectivo tempo final corrigido (de ensaio) em mais de 15 %
- b) A média de todas as diferenças percentuais calculadas em a) deve ser inferior a zero
- c) No máximo 30 % das diferenças percentuais calculadas em a) deve ser superior a zero
- d) Os resultados devem respeitar as seguintes regras gerais, desde que todos os outros parâmetros se mantenham constantes:
 - A espessura do revestimento aumenta quando o tempo de resistência ao fogo aumenta;
 - O tempo de resistência ao fogo diminui quando o fator de forma aumenta;
 - A temperatura aumenta quando o tempo de resistência ao fogo aumenta;
 - A temperatura diminui quando a espessura do revestimento aumenta;
 - A temperatura aumenta quando o fator de forma aumenta;
 - A espessura aumenta quando o fator de forma aumenta.

Os critérios de aceitação devem ser aplicados individualmente a todas as temperaturas de projeto incluídas no escopo da avaliação, em incrementos de 50 °C, iniciando 50 °C abaixo da menor temperatura definida no escopo até à maior temperatura definida no escopo. Deve haver pelo menos três intervalos de temperatura no escopo da avaliação.

Os coeficientes da regressão devem ser ajustados até que esses critérios de aceitação sejam atendidos.



ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço



1 curva-padrão de elevação de temperatura	3 temperatura do elemento com a exposição à curva-padrão
2 curva de crescimento lento	4 temperatura do elemento com exposição à curva de crescimento lento

Gama de coeficientes de fator de forma (K_f)	Gama de coeficientes de fatores de espessura (K_d)			
	0,0 (d_{min})	0,2 a 0,4	0,6 a 0,8	1,0 (d_{max})
0,0 (s_{min})	✓			
0,2 a 0,4			✓	
0,6 a 0,8		✓		
1,0 (s_{max})				✓

Aceitação de revestimentos reativos por meio da curva de crescimento lento

Todas as medições de temperatura comparáveis entre os dois ensaios, ou seja, em cada posição de medição de temperatura, devem ser tabuladas e apresentadas graficamente. Deve ser determinado o aumento de temperatura no elemento exposto à curva-padrão em um tempo t (ΔT_1) e o aumento de temperatura no elemento exposto à curva de crescimento lento em um tempo $t+20$ min (ΔT_2).

Os resultados da avaliação serão válidos somente se $\Delta T_1 > \Delta T_2$, para todas as posições comparáveis ao longo do ensaio. Caso contrário, o trabalho deve ser encerrado considerando que a metodologia não se aplica ao revestimento em questão.

ABNT NBR 17144 Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 4: Revestimentos aplicados a elementos de aço

Campo direto de aplicação dos resultados

A extensão nominal das variáveis avaliadas durante os ensaios está sujeita a determinados limites.

Essas extensões podem ser realizadas simultaneamente, desde que respeitados os limites, e são restritas a cada tipo de perfil, ou seja, as extensões permitidas para vigas não são válidas para pilares, e vice-versa. Da mesma forma, as extensões válidas para perfis I ou H não podem ser aplicadas a perfis tubulares, e vice-versa.

- **Espessura de revestimento permitida para vigas**
- **Espessura de revestimento permitida para pilares**
 - **Fator de forma permitido para vigas**
 - **Fator de forma permitido para pilares**
- **Perfis de grandes dimensões em revestimentos do tipo caixa**