

REVESTIMENTOS TÉRMICOS EM PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO NO CONTEXTO DO PROJETO ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Cristiane Lopes Mendes
Jorge Munaiar Neto
Maximiliano Malite

Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC/USP,
e-mail: lopesmendes@yahoo.com; jmunaiar@sc.usp.br; mamalite@sc.usp.br

Resumo

Com a publicação das normas NBR 14323:1999, intitulada “Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio”, e NBR 14432:2000, intitulada “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações”, despertou-se a preocupação com o dimensionamento das estruturas em caso de incêndio. Quando o aço é exposto a altas temperaturas apresenta reduções na resistência ao escoamento e no módulo de elasticidade. Em função dessas reduções, a NBR 14432:2000 apresenta tempos requeridos de resistência ao fogo, com os quais se pode optar pelo dimensionamento da estrutura, apresentado na NBR 14323:1999, ou pela aplicação de revestimento térmico. No entanto, essa última norma não permite a utilização do método simplificado de dimensionamento por ela proposto para perfis formados a frio. Quanto aos revestimentos térmicos, o mais utilizado no Brasil é a argamassa projetada, não muito adequada aos perfis formados a frio. O presente trabalho faz um breve histórico sobre estruturas de aço em situação de incêndio, sobre perfis formados a frio em temperatura ambiente e em situação de incêndio, além de apresentar tipos de revestimentos térmicos e suas aplicações.

Palavras-chave: perfis formados a frio, incêndio, dimensionamento, revestimento térmico.

Introdução

Atualmente, duas normas brasileiras tratam de estruturas e elementos construtivos de edificações em situação de incêndio, a NBR 14323:1999, “Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio”, e a NBR 14432:2000, “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações, ambas em processo de revisão”.

A NBR 14323:1999 fixa condições para o dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio constituídas por perfis soldados, laminados e formados a frio, todos não híbridos, bem como ligações soldadas e parafusadas, por meio de métodos experimental, simplificado e avançado. No entanto, não permite a utilização do método simplificado de dimensionamento para estruturas compostas por perfis formados a frio. Nesse caso, a utilização de estruturas constituídas por perfis formados a frio pode ser viabilizada por meio de ensaios ou dimensionamento por métodos avançados, ou mesmo por meio da aplicação de materiais de revestimento térmico contra elevadas temperaturas.

Atualmente, o revestimento térmico mais utilizado no Brasil é a argamassa projetada. No entanto, a aplicação desse material dificulta, ou pode até inviabilizar, a utilização

de perfis formados a frio, uma vez que são constituídos por chapas finas (máximo 8 mm de espessura), enquanto o material projetado necessita de espessuras variando de 5 a 20 mm, resultando em um peso próprio final bastante elevado.

O presente trabalho tem por objetivo abordar perfis formados a frio em situação de incêndio, os quais constituem elementos de aço com espessura máxima de chapa igual a 8 mm. Para tanto, serão também abordados aspectos referentes ao comportamento do aço estrutural em situação de incêndio, a partir das prescrições da NBR 14323:1999.

Pretende-se, ainda, obter informações com relação aos tipos de materiais para revestimento térmico e suas aplicações, a possibilidade de usar ou não revestimento térmico em perfis formados a frio, bem como reunir informações diversas sobre perfis formados a frio em temperatura elevada.

Perfis Formados a Frio – Temperatura Ambiente

A utilização de perfis formados a frio na execução de edifícios e galpões de uso geral está cada vez mais difundida no Brasil, em razão do menor custo final desse

tipo de estrutura, gerado pelo menor peso das estruturas, ou pelo custo reduzido desses perfis quanto à fabricação e montagem, quando comparados a perfis laminados.

Ressalta-se ainda a flexibilidade nos caminhos a serem adotados em projeto, devido à grande variedade de seções transversais desses perfis que podem ser conformadas ou combinadas. Por outro lado, faz-se necessário maior cuidado nos projetos, pois os perfis formados a frio, quando comparados aos perfis laminados e soldados, são mais suscetíveis aos modos de instabilidade (local, distorcional e global), bem como aos modos de falha relacionados ao metal base nas ligações.

A NBR 14762:2001 tem como base o Método dos Estados Limites e estabelece princípios para o dimensionamento de perfis estruturais de aço formados a frio, constituídos por chapas ou tiras de aço com espessura máxima de 8 mm, ligados por soldas ou parafusos, para utilização em edifícios. Apresenta as combinações de ações adequadas aos perfis formados a frio e requisitos para o dimensionamento de barras e ligações, porém, não apresenta referências para o dimensionamento de perfis em temperaturas elevadas.

Estruturas Metálicas em Situação de Incêndio

A verificação de estruturas metálicas em situação de incêndio tornou-se uma etapa de fundamental importância, e porque não dizer imprescindível, quando da elaboração e execução de projetos.

Por essa razão, em 1996, a Associação Brasileira de Normas Técnicas instalou uma comissão para estudar o assunto em questão, constituída por acadêmicos de universidades de São Paulo e Minas Gerais e por profissionais do meio técnico. O grupo em questão elaborou um texto-base para dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio, com base em referências atualizadas sobre o tema.

O texto-base foi devidamente desenvolvido em total compatibilidade com as normas brasileiras já em vigor. O texto foi aprovado e, em 1999, foi publicada a norma brasileira NBR 14323, intitulada “Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio”. Com vistas a fornecer informações necessárias e em caráter complementar, foi apresentada à comunidade científica e técnica a NBR 14432, publicada em 2000 e intitulada “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações”.

Essa última norma estabelece o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão, denominado TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo), considerado na elevação da temperatura dos gases, bem como a necessidade da verificação ou não em situação de incêndio.

A Tabela 1, extraída resumidamente de Silva (2000), contém informações referentes às edificações, segundo a NBR 14432:2000, isentas de verificação em situação de incêndio. Na última referência são apresentados os TRRF para as edificações que necessitam de verificação estrutural em situação de incêndio.

O TRRF é determinado em função de aspectos como o tipo de ocupação, área e altura da edificação, podendo variar de 30 a 120 minutos. O parâmetro TRRF deve garantir a saída dos ocupantes da edificação, a segurança das operações de combate a incêndio e a minimização de danos às edificações adjacentes.

Aspectos de interesse com relação à norma brasileira NBR 14323:1999

A norma brasileira NBR 14323:1999 tem como função a determinação da ação térmica nos elementos construtivos das edificações e o dimensionamento dos diversos elementos que constituem a edificação em situação de incêndio em função da elevação da temperatura do aço. Apresenta a variação das propriedades do aço com a temperatura e fixa condições para o dimensionamento de perfis soldados, laminados e formados a frio, pilares mistos, lajes mistas (com e sem forma incorporada) e ligações por soldas ou parafusos.

A Figura 1a, extraída de Silva (2001), esquematiza a variação da temperatura dos gases ao longo do tempo e é denominada curva “*Temperatura x Tempo*” representativa de uma situação de um “*Incêndio-Real*” de um ambiente sujeito à situação de incêndio.

Na fase inicial o incêndio é de pequenas proporções e não implica riscos à vida humana. Para fins de dimensionamento passa a ser utilizada a curva da Figura 1b, também extraída de Silva (2001), denominada curva “*Temperatura x Tempo*” representativa de uma situação de um incêndio denominado “*Incêndio-Natural*”, em que a fase inicial é desconsiderada e a fase de resfriamento é ajustada por uma reta.

No entanto, a curva da Figura 1b depende de fatores relacionados ao ambiente em chamas, como carga de incêndio (material combustível), grau de ventilação, compartimentação, entre outros.

Por essa razão, a NBR 14323:1999 apresenta equações para dimensionamento com base em um método simplificado, em que a curva da variação da temperatura dos gases no tempo, denominada “*Incêndio-Padrão*” (ISO 834) e esquematizada na Figura 2, é descrita por meio da equação logarítmica (1), da NBR 14432:2000.

$$\theta_g = \theta_o + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

Na equação (1), θ_g é a temperatura dos gases no ambiente em chamas, θ_o é a temperatura antes do início do incêndio, em °C (normalmente igual 20°C), e t é o tempo, em minutos.

Tabela 1 Edificações consideradas isentas de verificação estrutural em incêndio.

Área (m ²)	Ocupação	Carga de incêndio específica (MJ/m ²)	Altura (m)
≤ 750	Qualquer	Qualquer	Qualquer
≤ 1500	Qualquer	≤ 1000	≤ 2 pavimentos
Qualquer	Centros esportivos, terminais de passageiros (1)	Qualquer	≤ 23
Qualquer	Garagens abertas (2)	Qualquer	≤ 30
Qualquer	Depósitos (3)	Baixa	≤ 30
Qualquer	Qualquer	≤ 500	Térrea
Qualquer	Industrial (4)	≤ 1200	Térrea
Qualquer	Depósitos (4)	≤ 2000	Térrea
Qualquer	Qualquer (5)	Qualquer	Térrea
≤ 5000	Qualquer (6)	Qualquer	Térrea

Observações:

(1) Centros esportivos, estações e terminais de passageiros e construções provisórias, para $23\text{ m} < h < 30\text{ m}$ e $h > 30\text{ m}$ o TRRF deverá ser 30 e 60 minutos, respectivamente, e para subsolo com $h < 10\text{ m}$ e $h > 10\text{ m}$ o TRRF deverá ser de 60 e 90 minutos, respectivamente.

(2) Garagens abertas lateralmente, com estrutura de concreto armado ou protendido ou em aço, atendendo às condições construtivas da NBR 14432:2000.

(3) Depósitos sem risco de incêndio expressivo (armazena materiais incombustíveis).

(4) Observados os critérios de compartimentação constantes das normas em vigor ou, na sua falta, de regulamentos de órgãos públicos.

(5) Utilizando chuveiros automáticos, conforme outras normas brasileiras.

(6) Com pelo menos duas fachadas de aproximação perfazendo, no mínimo, 50% do perímetro.

Outras isenções ou reduções no TRRF são apresentadas na NBR 14432:2000.

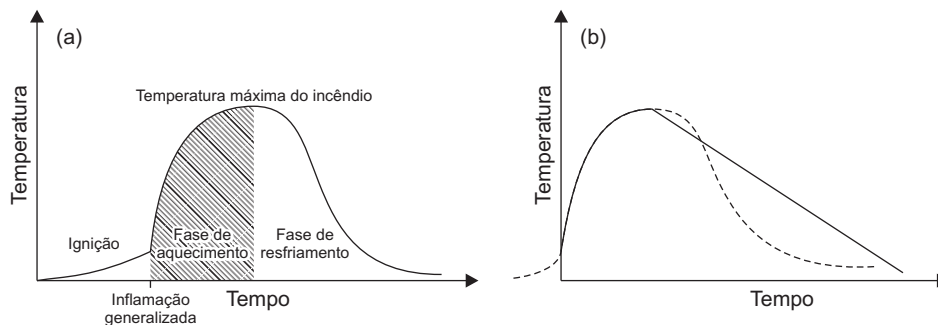


Figura 1 Curvas: (a) “Temperatura × Tempo” de um “Incêndio-Real” e (b) “Temperatura × Tempo” de um “Incêndio-Natural”.

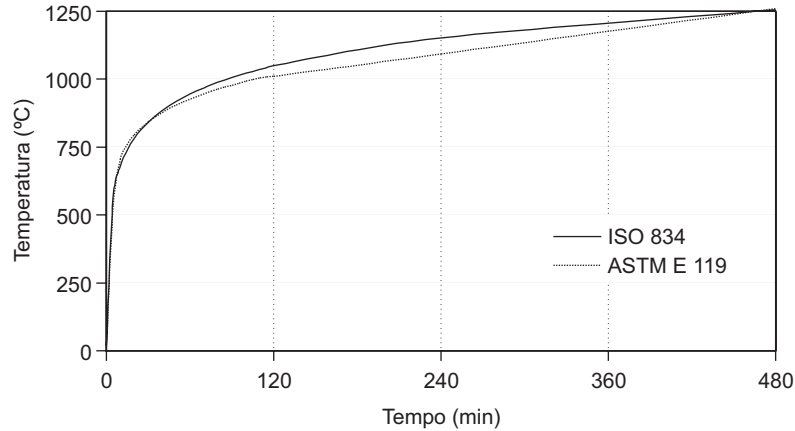


Figura 2 Curva “Temperatura × Tempo” de um “Incêndio-Padrão”.

Reduções na resistência ao escoamento e no módulo de elasticidade do aço

A verificação estrutural em situação de incêndio deve-se ao fato de as propriedades mecânicas do aço resultarem reduzidas quando expostas a elevadas temperaturas, podendo provocar o colapso da estrutura em um tempo reduzido, o qual pode não ser suficiente para garantir a evacuação da edificação. A influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade do aço e do concreto é apresentada nas Figuras 3 e 4.

Essas mesmas reduções são apresentadas na NBR 14323:1999 sob a forma de fatores de redução da resistência ao escoamento do aço ($k_{y,\theta}$), da resistência característica à compressão do concreto com densidade normal ($k_{cn,\theta}$) e do módulo de elasticidade do aço ($k_{E,\theta}$) em função da temperatura. O texto-base da NBR 14323:2003 apresenta também os valores de redução do módulo de elasticidade do concreto de densidade normal ($k_{Ecn,\theta}$).

A temperatura do aço segundo a NBR 14323:1999

A elevação da temperatura ($\Delta\theta_{at}$) dos elementos de aço sem revestimento térmico, segundo a NBR 14323:1999, está diretamente relacionada ao parâmetro denominado fator de massividade (F) da seção transversal do elemento, o qual resulta da relação entre o perímetro exposto ao fogo (u) e a área da seção (A).

Também são considerados a massa específica do aço, o calor específico do aço e o fluxo de calor por unidade de área (ϕ). Para o dimensionamento simplificado apresentado na NBR 14323:1999, podem ser assumidos $c_a = 600\text{J/kg}^\circ\text{C}$ e $\rho_a = 78,5\text{ kN/m}^3$.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{(u/A)}{c_a\rho_a} \phi\Delta t \quad (2)$$

Nos elementos protegidos com revestimento térmico, o calor que chega ao metal depende da condução através do material de proteção, diferente dos elementos sem proteção, nos quais o calor é transmitido por convecção e radiação. A elevação de temperatura para os elementos protegidos depende também da condutividade térmica, do calor específico e da densidade tanto do aço como do material de proteção, além da espessura desse material.

Dimensionamento simplificado segundo a NBR 14323:1999

A segurança é verificada quando a sollicitação de cálculo em situação de incêndio ($S_{fi,d}$), obtido por meio de combinações últimas excepcionais, resulta menor ou igual à resistência de cálculo, para o estado último considerado em situação de incêndio ($R_{fi,d}$).

O dimensionamento simplificado de estruturas de aço em situação de incêndio, segundo a NBR 14323:1999, se aplica às barras prismáticas, vigas mistas e pilares mistos compostos por perfis laminados e soldados não-híbridos e às lajes de concreto com forma de aço incorporada. Portanto, não se aplica às estruturas compostas por perfis formados a frio. Apesar de não previsto na NBR 14323:1999, o dimensionamento de perfis formados a frio em incêndio, assim como os perfis soldados e laminados, se faz necessário em razão de esses também sofrerem reduções de resistência ao escoamento em função da temperatura, conforme ilustra a Figura 5.

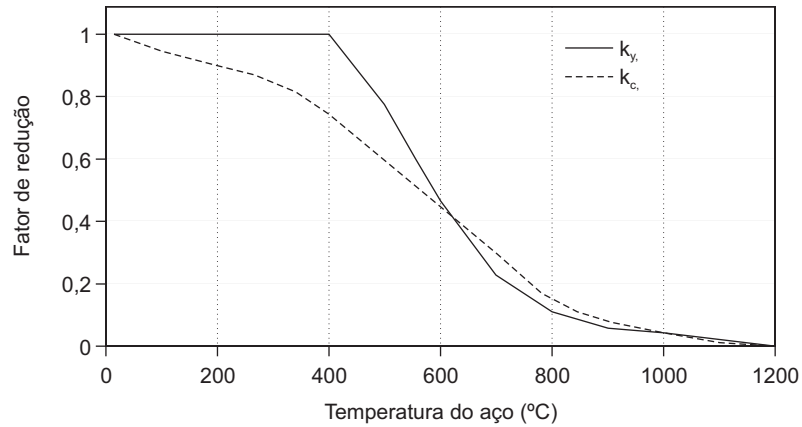


Figura 3 Redução da resistência ao escoamento do aço e da resistência à compressão do concreto em função da temperatura.

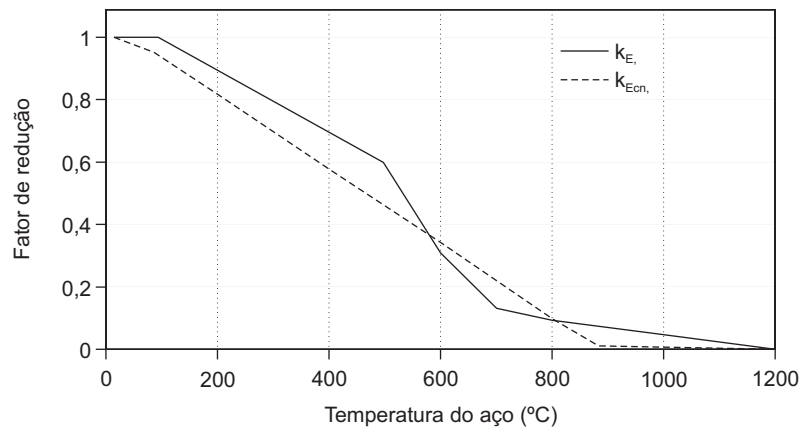


Figura 4 Redução do módulo de elasticidade do aço e do concreto em função da temperatura.

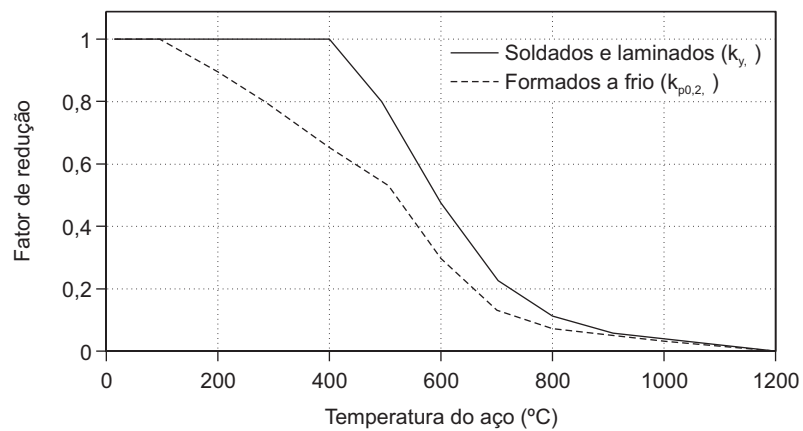


Figura 5 Redução da resistência ao escoamento do aço em função da temperatura. *Fonte:* Eurocode 3 Parte 1.2.

Nesse caso, podem ser estabelecidos como ferramentas para fins de dimensionamento de perfis formados a frio em situação de incêndio: métodos avançados (programas computacionais), métodos experimentais (ensaios em laboratórios) e aplicação de revestimento térmico nos elementos estruturais.

Materiais para Aplicação como Revestimento Térmico

Os materiais para revestimento térmico devem apresentar capacidade de proteção térmica para altas temperaturas, mantendo sua integridade durante o incêndio, sem causar aumento considerável no peso próprio na estrutura. Para isso é necessário que eles apresentem, em geral, baixa massa específica aparente, baixa condutividade térmica e calor específico elevado.

Esses materiais devem trabalhar acompanhando os deslocamentos da estrutura. Não é permitida a presença de materiais agressivos à saúde. A durabilidade do material deve ser compatível com a vida útil da estrutura. Não deve ser higroscópico, de modo a garantir que o aço não receba umidade, porém é necessário o uso de “primers” ou de outros produtos anticorrosivos nas estruturas internas para não agravar a corrosão. A combustão e conseqüente propagação de chamas não podem ocorrer nesses materiais. Não podem permitir a instalação e proliferação de insetos e, portanto, devem ser formulados e produzidos com fungicidas e bactericidas.

Os materiais para revestimentos térmicos utilizados atualmente podem ser classificados segundo três fatores:

- Quanto ao material constituinte: alvenaria, concreto de cimento portland, concreto leve, argamassas à base de cimento, de fibras minerais, de vermiculita ou de gesso, mantas de fibras cerâmicas, de fibras minerais ou de lã de rocha, tintas intumescentes, entre outros.
- Quanto à morfologia: dos tipos contorno, caixa com vãos e caixa sem vãos.
- Quanto à técnica de colocação: moldados com o uso de formas, aplicados manualmente, aplicados por jateamento, fixados por dispositivos específicos ou montados.

Por meio da NBR 14323:1999 é possível determinar analítica e aproximadamente a espessura do material de proteção, fazendo uso do equacionamento para determinação da temperatura do aço revestido com material de proteção passiva. Com essas equações, facilmente cria-se uma planilha eletrônica para a determinação da temperatura do aço. A partir dessa planilha, e conhecendo o TRRF da edificação, é possível determinar a espessura necessária de material de proteção para cada elemento estrutural.

Muitos fabricantes não apresentam em seus catálogos as propriedades mecânicas e térmicas de seus materiais.

Apenas como referência, apresentam-se na Tabela 2 as propriedades de alguns materiais.

Argamassas projetadas

As argamassas projetadas têm este nome porque são aplicadas por jateamento, como ilustra a Figura 6, extraída de Fakury (1999). São materiais econômicos, porém, não apresentam bom acabamento (por exemplo, aspecto de chapisco). Os materiais projetados foram desenvolvidos especificamente para proteção passiva das estruturas.

Estes materiais são os mais utilizados para a proteção de estruturas metálicas em todo o mundo e já foram especificados para a proteção contra incêndio em grandes edifícios, como o Sears Towers, World Trade Center, Torres Petronas, entre outros.

Em países como os Estados Unidos existem variados tipos dessas argamassas, as quais são classificadas com relação à composição química, utilização, fornecedor, custos, entre outros aspectos. Já no Brasil, elas são encontradas apenas de três formas diferentes, listadas a seguir:

- Argamassas cimentícias: compostas por materiais aglomerantes, como gesso e cimento, em grande quantidade, e resinas acrílicas. As composições dos aglomerantes variam de acordo com a sua utilização, variando-se assim o peso específico do material.
- Fibras projetadas: compostas por lã de rocha e materiais aglomerantes, sendo o último em menor quantidade. São de baixa densidade, 240 kg/m³, e indicadas para usos interiores e exteriores.
- À base de vermiculita: composto de agregados leves à base de vermiculita, cimento hidráulico e aglomerantes minerais.

Placas rígidas

O revestimento em questão consiste de placas rígidas que envolvem a estrutura de aço, isolando-a das altas temperaturas. Normalmente apresentam acabamento satisfatório (visualmente agradável) por possuir superfície lisa. Podem ser encontradas de três formas diferentes:

- Placas de gesso acartonado: semelhantes às placas de gesso convencional, porém possuem fibras de vidro e vermiculita na sua composição, garantindo características específicas para a proteção contra incêndio.
- Placas de lã de rocha: compostos por materiais fibrosos, no caso, a lã de rocha, a qual é obtida pela fusão da rocha de origem basáltica. Constituem painéis aglomerados por pulverização de resinas term endurecíveis.
- Painéis de silicato autoclavados: constituídos por placas rígidas que apresentam elevada resistência mecânica e à abrasão.

A Figura 7, extraída da página eletrônica da Guarutherm (2004), ilustra uma estrutura protegida com placas rígidas do tipo lã de rocha.

Mantas

As mantas são materiais flexíveis que podem ser compostas por aglomerados de fibra cerâmica, lã de rocha ou outro material fibroso. Elas apresentam baixa densidade,

em torno de 64 kg/m^3 . Essas mantas são aplicadas no contorno, envolvendo a estrutura, sendo fixadas por meio de pinos metálicos soldados previamente à estrutura. Esse sistema é adequado para edificações em funcionamento, pois geram pouca sujeira.

A Figura 8, extraída de Dias (2002), ilustra as etapas de colocação de manta em estrutura protegida por este sistema.



Figura 6 Aplicação de argamassa por jateamento.

Tabela 2 Propriedades típicas de materiais isolantes. *Fonte:* Fakury (1999).

Material	Densidade (kg/m^3)	Calor específico ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)	Condutividade ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)
Argamassa de fibras minerais	200-350	1050	0,08-0,10
Placas de vermiculita	150-300	1200	0,12-0,17
Placas de vermiculita e gesso	800	1200	0,15
Argamassa de vermiculita	300-800	920	0,06-0,15
Argamassa de gesso	500-800	1700	0,20-0,23
Mantas de fibras minerais	100-500	1500	0,23-0,25
Mantas cerâmicas	64-192	1067	0,10-0,25
Concreto celular	300-1000	1200	0,12-0,40
Concreto leve	1200-1600	1200	0,64-0,81
Concreto de cimento Portland	2200-2400	1200	1,28-1,74



Figura 7 Cobertura protegida com placas de lã de rocha.



Figura 8 Centro Empresarial do Aço protegido por manta de fibra cerâmica, São Paulo – SP: vista geral e detalhes da fixação da manta de fibra cerâmica em perfil soldado tipo I, por meio de pinos e arruelas de pressão.

Tintas intumescentes

A tinta intumescente é um material específico para proteção passiva, o qual permanece inativo na estrutura, como uma tinta comum, até que seja exposto a temperatura superior a 200°C.

A partir dessa temperatura inicia-se um processo de expansão volumétrica, ou seja, intumescem, tornando-se uma espuma rígida (devido às resinas que compõem a tinta) com poros preenchidos por gases atóxicos. Esse processo retarda a elevação rápida de temperatura das estruturas metálicas. A Figura 9, extraída de Dias (2002), ilustra um exemplo de edifício protegido com pintura intumescente.

Perfis Formados a Frio – Situação de Incêndio

O atual acervo bibliográfico que trata de perfis formados a frio em situação de incêndio é bastante escasso. Dentre as poucas bibliografias encontradas relacionando perfis formados a frio e incêndio, podem ser destacadas Kaitila (2000), Wang & Davies (2000), Feng *et al.* (2002a), Feng *et al.* (2002b), Feng *et al.* (2002c) e Soares & Rodrigues (2002).

Outros autores realizaram ensaios que permitiram obter fatores de redução da resistência ao escoamento do aço, como, por exemplo, Gerlich *et al.* (1996) e Klippstein (1978), apud Soares & Rodrigues (2002), por meio da equação (3), bem como Makelainen & Miller (1983), apud Soares

e Rodrigues (2002), por meio das equações (4) e (5). Em todas as equações θ é a temperatura no elemento de aço.

$$k_{y,\theta} = 1,0 - 5,3 \cdot 10^{-4} \theta + 4,0 \cdot 10^{-6} \theta^2 - 1,9 \cdot 10^{-8} \theta^3 + 1,7 \cdot 10^{-11} \theta^4 \quad (3)$$

$$k_{y,\theta} = 1,088 - 0,1314 \exp[0,0047(\theta - 148,3)] \dots \quad (4)$$

... para $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 500^\circ\text{C}$

$$k_{y,\theta} = 104(1,0 - \theta/1135)/(\theta - 356) \dots \quad (5)$$

... para $500^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$

Vale mencionar que nas equações (4) e (5) os valores de redução da resistência ao escoamento foram determinados com relação a 0,2% da deformação. Para todos os ensaios foi considerada uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$, conforme Figura 10.

Aplicação de materiais de revestimento térmico

Em Soares & Rodrigues (2002) é apresentado o dimensionamento de uma viga tipo caixa, composta por dois perfis formados a frio tipo U enrijecido ($U200 \times 75 \times 25 \times 2,0$), sujeita à flexão simples. O modelo da viga caixa analisada por ele está apresentada na Figura 11a.

A viga descrita na Figura 11a foi dimensionada em temperatura ambiente, bem como em temperatura elevada,

sem e com revestimento térmico, como: argamassa de gesso, placas de gesso, argamassa de fibras minerais e fibra mineral projetada. Variou-se o número de faces expostas ao fogo (1 face, 2 faces e 3 faces), e todos os casos foram realizados com TRRFs de 10, 20 e 30 minutos.

Os fatores de massividade da viga caixa foram os seguintes: para 3 faces expostas ao fogo usaram-se 350 m^{-1} , para 2 faces expostas usaram-se 191 m^{-1} e para 1 face exposta usaram-se 127 m^{-1} . Não se pode afirmar que esses valores estejam corretos, pois não é possível avaliar precisamente as condições de 1 face e 2 faces expostas ao fogo.

Em Feng *et al.* (2002c) estudou-se, experimental e numericamente, o comportamento térmico de painéis compostos por perfis formados a frio tipo U e placas de gesso, conforme esquematiza a Figura 11b. Os ensaios foram realizados considerando-se:

- O tipo do perfil formado a frio, sendo U não-enrijecido ou U enrijecido.
- Os perfis tipo U enrijecido foram ensaiados com ou sem abertura de serviço na alma (simulando a abertura para passagem de tubulações, por exemplo).
- Colocando-se ou não material isolante composto por lâ de rocha entre as placas de gesso.
- Variando-se o número de placas de gesso, com 12,5 mm de espessura, em 1 ou 2 em cada face.

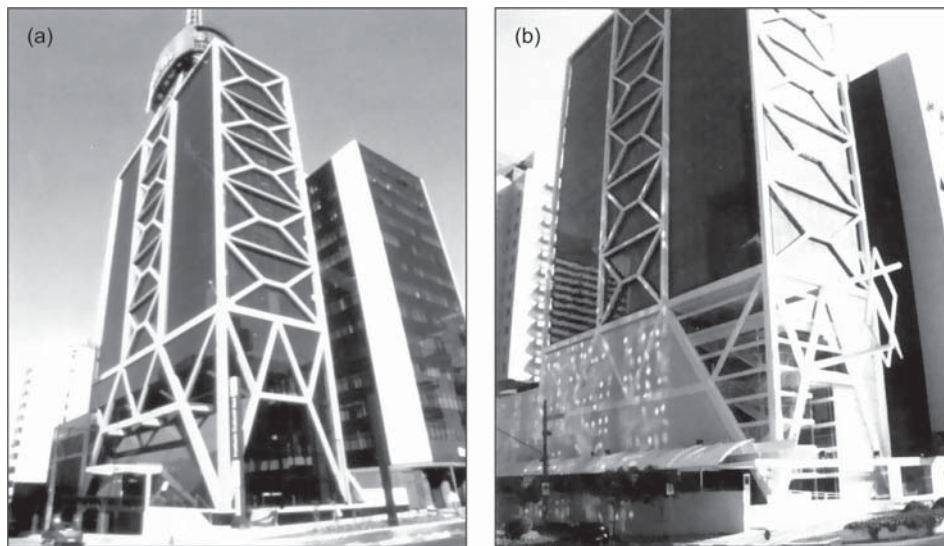


Figura 9 Edifício do ICI, São Paulo – SP: (a) em 1992 e (b) em 2002.

Nos painéis estudados, foram utilizadas placas com 30 cm × 30 cm posicionadas na porta frontal de um forno a gás, provocando aquecimento em apenas uma face dos painéis. O aumento da temperatura do forno foi controlado e os corpos-de-prova ficaram expostos às elevadas temperaturas por 2 horas, instrumentados com vários extensômetros térmicos para acompanhamento da elevação da temperatura.

A análise experimental foi realizada para determinar parâmetros apropriados para a modelagem computacional. Várias conclusões obtidas nos ensaios permitiram a adoção de condições de contorno e propriedades térmicas que foram utilizadas na modelagem numérica, por meio do programa ABAQUS.

Também foram modelados painéis variando-se apenas a espessura do perfil U enrijecido, em que se observou temperatura no aço maior para perfil com espessura menor, no lado exposto ao fogo, porém, no lado não exposto a temperatura é maior no perfil com maior espessura.

Proposta para aplicação de revestimento térmico

Com base nos resultados de Soares & Rodrigues (2002) e de Feng *et al.* (2002c), o presente trabalho propõe a utilização de placas de gesso para a proteção térmica de estruturas de aço compostas por perfis formados a frio, como, por exemplo, em treliças de sustentação de piso.

Para tanto, considera-se uma dada treliça “fictícia” com altura de 1,00 m, posicionada sob laje de concreto, e utilizam-se placas de gesso em suas três faces não-protegidas pela laje de concreto, conforme esquematiza a Figura 12.

Para determinação da temperatura do aço determina-se o fator de massividade considerando-se a relação entre

a área exposta ao incêndio e o volume dos perfis da treliça, inicialmente, sem revestimento térmico. A área corresponde ao somatório das áreas de todas as superfícies dos perfis da treliça, enquanto o volume corresponde ao somatório dos volumes de todos os elementos que compõem a treliça, tal que:

$$A = 16,4621 \text{ m}^2$$

$$V = 0,0272 \text{ m}^3$$

$$F = \frac{16,4621}{0,0272} = 605 \text{ m}^{-1}$$

O fator de massividade da treliça com revestimento térmico tipo caixa será calculado como a relação entre a área das placas de proteção e o volume dos perfis da treliça. Dessa forma, o fator de massividade da seção da treliça com revestimento térmico resulta:

$$A = 17,2 \text{ m}^2$$

$$V = 0,0272 \text{ m}^3$$

$$F = \frac{17,200}{0,0272} = 632 \text{ m}^{-1}$$

O próximo passo é a determinação da temperatura do aço para 30, 60, 90 e 120 minutos para a seção da treliça com e sem revestimento. As características térmicas da placa de gesso foram usadas de acordo com as apresentadas em Soares & Rodrigues (2002).

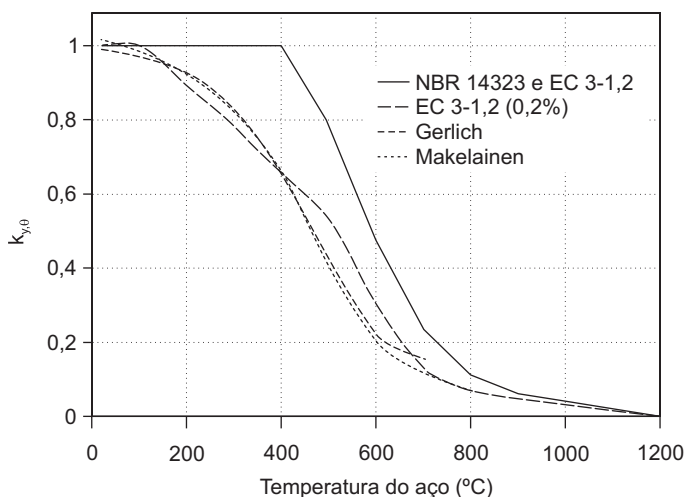


Figura 10 Comparação entre os fatores de redução da resistência ao escoamento do aço.

Massa específica = 800 kg/m³

Condutividade térmica = 0,20 W/m°C;

Calor específico = 1700 J/kg°C.

A espessura considerada para as placas de gesso foi de 12,5 mm. As temperaturas obtidas, em °C, estão indicadas na Tabela 3.

Nota-se que, mesmo com o fator de massividade maior da estrutura protegida, as temperaturas do aço são

menores, reduzindo de 2% a 23%, quando é usada uma placa de gesso, e reduzindo de 15% a 68%, quando são usadas duas placas de gesso, aspecto que gera, conseqüentemente, menores fatores de redução da resistência ao escoamento do aço.

Um bom exemplo para essa aplicação é no uso de treliças ou joists com função de suportar lajes de concreto ou pisos metálicos, pois, além de apresentar bom acabamento, tem a função de revestimento térmico, retardando o aquecimento do aço em caso de incêndio.

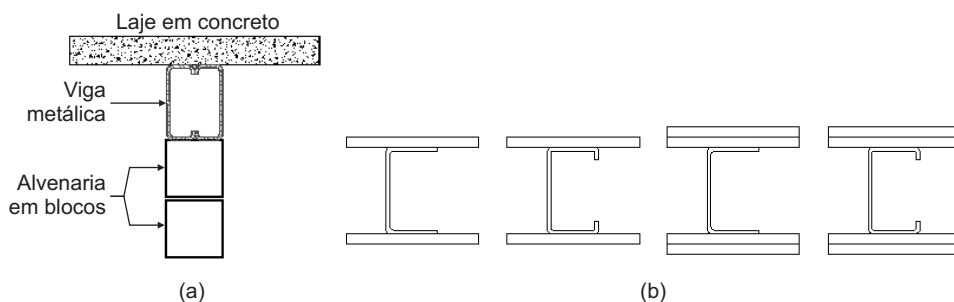


Figura 11 Modelos de: (a) viga caixa adotada para verificação da resistência à flexão e (b) painéis compostos por perfis formados a frio tipo U e placas de gesso.

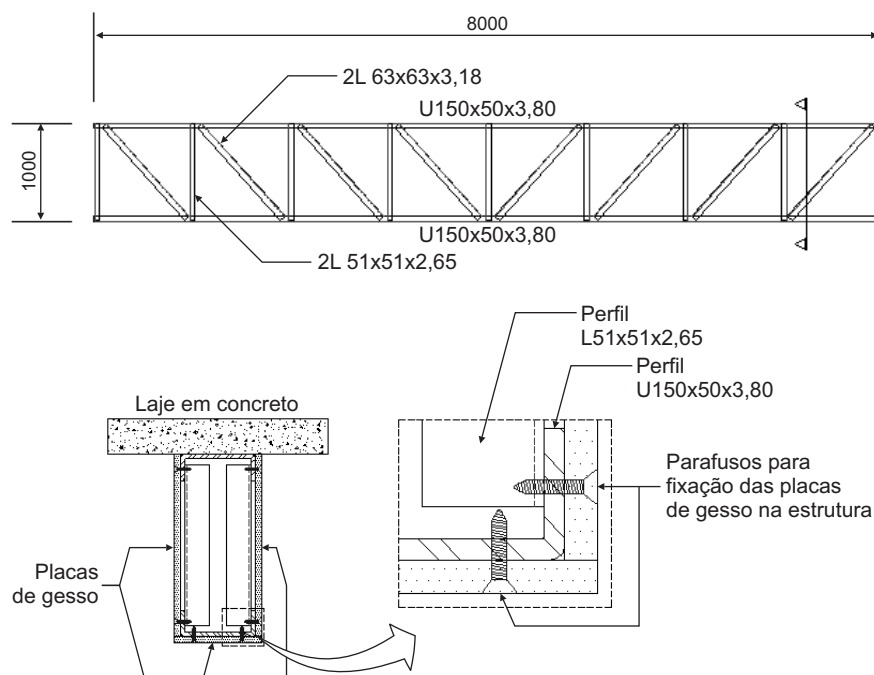


Figura 12 Esquema, sem escala, da proteção da treliça com placas de gesso.

Tabela 3 Temperatura do aço da treliça com e sem proteção térmica.

Tempo (min)	Temperatura (°C) sem revestimento	Temperatura com revestimento tipo caixa (°C)	
		1 placa de gesso e = 12,5 mm	2 placas de gesso e = 25,0 mm
30	841	651	268
60	945	879	571
90	1006	971	768
120	1049	1025	893

Conclusões

Apesar de identificado, ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, um número reduzido de pesquisas relacionadas a perfis formados a frio em situação de incêndio, procurou-se estabelecer algumas considerações com relação ao assunto proposto, ou seja, o dimensionamento com a consideração da aplicação de revestimento térmico como alternativa para a utilização desse tipo de perfil de aço, uma vez que ocorre, assim como nos perfis soldados e laminados, a redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade.

Quanto à proposta de proteção das estruturas compostas por perfis formados a frio com materiais de revestimento térmico, foi sugerido o uso de proteção do tipo caixa. Vale destacar que, para a utilização desse tipo de proteção, pode-se optar por placas de gesso acartonado, de lã de rocha ou painéis de silicato autoclavados. No exemplo proposto e apresentado, foi utilizada placa de gesso por ser um material de fácil acesso no Brasil e por ter custos relativamente mais baixos, considerando seu acabamento de ótima aparência.

No entanto, é importante ressaltar a grande preocupação que surge quando da utilização desse tipo de proteção para sistemas formados por treliças, ou seja, a determinação do fator de massividade, uma vez que a seção transversal a ser considerada se altera ao longo do comprimento da treliça.

Com relação ao método aqui proposto para dimensionamento, cabe ressaltar que por esse não ter sido aplicado em exemplo de dimensionamento de estruturas correntes da construção civil, devido à inexistência de resultados para comparação, sugere-se a continuidade do tema em questão e do método proposto neste trabalho, para que o mesmo seja futuramente aferido por meio de comparação de resultados com modelos analíticos, numéricos e experimentais, com vistas à sua aplicação no dimensionamento de elementos metálicos formados a frio.

Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14323*: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimento. Rio de Janeiro, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14432*: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14762*: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2001.
- DIAS, L. A. M. *Estruturas de aço*: conceitos, técnicas e linguagem. São Paulo: Ziguarte, 2002.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *DRAFT prEN 1993-1-2*: Eurocode 3 – Design of steel structures. Part 1-2: General rules. Structural fire design. Brussels, 2001.
- FAKURY, R. H. Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL “O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL”, 2., Belo Horizonte: SME, 1999. 1 CD-ROM.
- FENG, M.; WANG, Y. C.; DAVIES, J. M. Structural behavior of cold-formed thin-walled short steel channel columns at elevated temperatures. Part 1: experiments. *Thin-Walled Structures*, v. 41, p. 543-570, 2002a.
- FENG, M.; WANG, Y. C.; DAVIES, J. M. Structural behavior of cold-formed thin-walled short steel channel columns at elevated temperatures. Part 2: design calculations and numerical analysis. *Thin-Walled Structures*, v. 41, p. 571-594, 2002b.

- FENG, M.; WANG, Y. C.; DAVIES, J. M. Thermal performance of cold-formed thin-walled steel panel systems in fire. *Fire Safety Journal*, v. 38, p. 365-394, 2002c.
- GUARUTHERM. *Painéis rígido de lã de rocha Thermax PEM*. Disponível em: <<http://guarutherm.com.br>>. Acessado em: 15 jun. 2004.
- KAITILA, O. Cold-formed steel structures in fire conditions. In: SEMINAR ON STEEL STRUCTURES. Finlândia: Helsinki University of Technology, 2000.
- SILVA, V. P. *Estruturas de aço em situação de incêndio*. São Paulo: Zigurate, 2001.
- SILVA, V. P. O comportamento de sistemas estruturais básicos de aço em situação de incêndio. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., Punta Del Este, 2000. *Anais...* Punta Del Este, 2000.
- SOARES, C. H.; RODRIGUES, F. C. Dimensionamento de perfis de aço formados a frio em situação de incêndio. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CONSTRUÇÃO METÁLICA, 2., São Paulo, 2002. *Anais...* São Paulo: SME, 2002. 1 CD-ROM.
- WANG, Y. C.; DAVIES, J. M. Design of thin-walled steel channel columns in fire using Eurocode 3 Part 1.3. In: INTERNATIONAL WORKSHOP "STRUCTURES IN FIRE", 1., Copenhagen, 2000.