

TERMESTRUTURAL DE VIGA CONSTITUÍDA POR PERFIL FORMADO A FRIO COM SEÇÃO CAIXÃO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO ANÁLISE

Ronaldo Rigobello⁽¹⁾, Jorge Munaiar Neto⁽²⁾, Maximiliano Malite⁽³⁾, Valdir Pignatta e Silva⁽⁴⁾

Resumo

Neste trabalho são apresentados resultados de análises numéricas, em contextos térmico e estrutural, para a situação de incêndio, feitas em uma viga constituída por perfil formado a frio de aço, com seção transversal em forma de caixão, sob laje de concreto e sobre alvenaria. Inicialmente, se faz a análise térmica empregando o programa computacional sueco Super Tempcalc (TCD v5.0), por meio do qual se obtém o redutor de momento fletor resistente, em função do tempo de exposição ao fogo. Em seguida, por meio do programa ANSYS v9.0 são realizadas análises térmicas, estruturais e termomecânicas, considerando-se diversas situações de vínculo nos apoios da viga, bem como no contato da mesma com a laje.

Palavras-chave: Aço, incêndio, perfis formados a frio, análise térmica, análise numérica

1 Mestre em engenharia de estruturas e doutorando pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. E-mail: ronbello@sc.usp.br.

2 Professor Doutor da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas - Avenida Trabalhador São-carlense, 400 –13566-590, São Carlos, SP, Brasil. Email: jmunaiar@sc.usp.br,

3 Professor Doutor da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas - Avenida Trabalhador São-carlense, 400 –13566-590, São Carlos, SP, Brasil. Email: mamalite@sc.usp.br

4 Professor Doutor da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica - Av. Prof. Almeida Prado, trav2, n271 Edifício da Engenharia Civil - Cidade Universitária - 05508-900, São Paulo, Brasil email: valpigss@usp.br

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de uma viga constituída por perfil formado a frio de aço com seção transversal do tipo “caixão”, sob laje de concreto e sobre alvenaria de compartimentação quando submetida ao incêndio-padrão.

Inicialmente, foi empregado o código computacional *Super Tempcalc TCD - Temperature Calculation and Design v5.0 (1997)*, para fins de análise térmica bidimensional transiente. Nessa etapa, se determinou o campo de temperaturas para a situação *viga-laje-alvenaria* da seção transversal de todas as vigas do edifício, em que se obteve o redutor do momento fletor resistente em função da temperatura, sem considerações de instabilidades global ou local. Com base nessas informações, escolheu-se a viga mais solicitada em incêndio e, em seguida, por meio do código ANSYS v9.0 (2004) foram determinados campos de temperaturas para fins de comparação ao TCD, bem como o redutor do carregamento máximo a ser aplicado (valor característico) em função da temperatura, considerando-se os efeitos associados a instabilidades e deformações térmicas. Por fim, analisou-se estruturalmente o sistema a partir de várias hipóteses de vinculação nas extremidades da viga e interface entre viga e laje.

2 ASPECTOS DE INTERESSE DO MODELO NUMÉRICO

2.1 Características geométricas

A seção transversal da viga escolhida para análise está apresentada na figura 1, com comprimento estabelecido igual a 3,8 metros. No modelo de análise térmica foram considerados: *perfil de aço, laje de concreto e alvenaria*, com dimensões apresentadas na mesma figura 1. A figura 2 esquematiza as condições de exposição ao fogo e a discretização do modelo numérico construído para fins de análise térmica e estrutural.

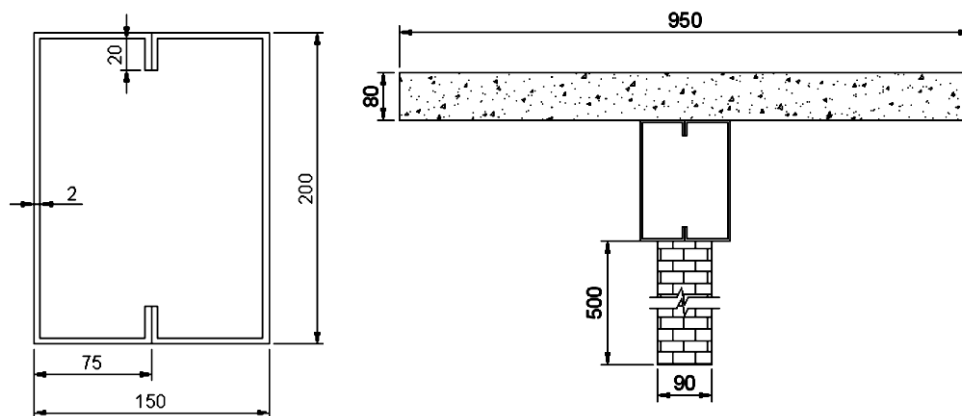


Figura 1: Dimensões geométricas da seção transversal da viga estudada (unidade: mm)

2.2 Propriedades mecânicas dos materiais

Em temperatura ambiente, as propriedades mecânicas adotadas para o aço do perfil foram $f_{yk} = 300$ MPa, $E_a = 20500$ kN/cm² e $\gamma_a = 7850$ kg/m³. Na análise estrutural de elementos de aço sob elevada temperatura, os efeitos da ação térmica nos materiais são considerados por meio de coeficientes de redução de resistência dos materiais em função da temperatura, fornecidos pela ABNT NBR 14432:1999 e pelo modelo constitutivo proposto no EN 1993-1-2:2005. A resistência à compressão do concreto em temperatura ambiente é igual a 25 MPa e o módulo de elasticidade (secante) igual a 23800 MPa, obtido de acordo com a ABNT NBR 6118:2003. A resistência à tração do concreto foi adotada igual a 0,12 da resistência à compressão.

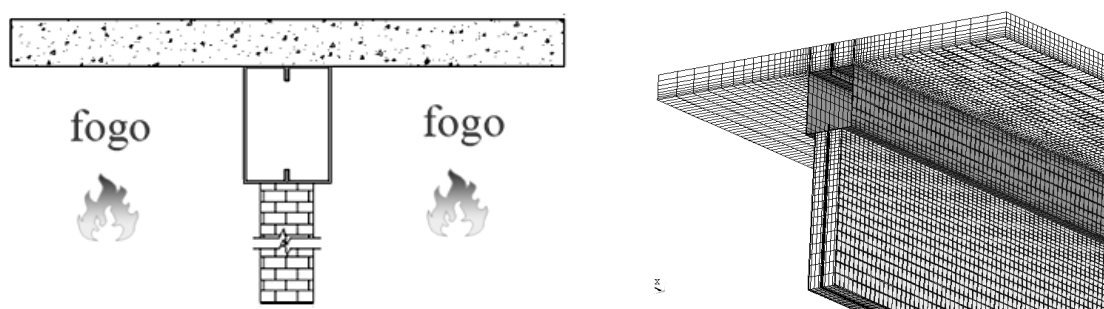


Figura 2: Condições de exposição ao fogo e modelo numérico para análise térmica

É assumido comportamento elástico-linear na tração até a ruptura. A relação constitutiva adotada para o concreto foi adaptada daquela apresentada no EN 1992-1-1 (2004), considerando como simplificação regime plástico após atingir a tensão de ruptura, por tração e por compressão, com inclinação igual a 1/1000 para se evitar problemas de instabilidade numérica. Os parâmetros para obtenção da relação constitutiva em função da temperatura, ou seja, o coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto ($k_{c\theta}$) e a deformação específica de início do esmagamento do concreto (ϵ_{c0}), foram obtidos de acordo com a ABNT NBR 15200:2004 e EN 1992-1-2:2004. Como o EN 1992-1-2:2004 não fornece os valores do redutor do módulo de elasticidade, k_{Ec} , foi proposto neste trabalho a eq. 1, com base no ANSI/AISC-360-05:2005. Para se levar em conta material com comportamento diferenciado na tração e na compressão foi utilizado o modelo de HJELM (Cast Iron Plasticity) disponível na biblioteca do ANSYS.

$$\theta = 20^\circ\text{C} \rightarrow k_{Ec} = 1 \quad 20^\circ\text{C} < \theta \leq 600^\circ\text{C} \rightarrow k_{Ec} = \frac{660 - \theta}{640} \quad \theta \geq 600^\circ\text{C} \rightarrow k_{Ec} = \frac{1200 - \theta}{6400} \quad (1)$$

2.3 Propriedades físico-térmicas dos materiais

Os valores assumidos para as propriedades térmicas do aço em função da temperatura são aqueles recomendados pela ABNT NBR 14323:1999 e pelo EN 1993-1-2:2005. Os valores assumidos para as propriedades térmicas do concreto em função da temperatura são aqueles apresentados no EN 1992-1-2:2004, para umidade de 3%. Foi adotada nesta pesquisa a variação da condutividade térmica referente ao limite inferior, bem como redução da massa específica do concreto sob temperatura elevada. Para a alvenaria foram adotados os parâmetros do código computacional Ozone (Liège, 2001): massa específica igual a 1600 kg/m^3 , calor específico igual a $840 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ e condutividade térmica igual a $0,7 \text{ W/m }^\circ\text{C}$.

2.4 Características do incêndio

A elevação de temperatura dos gases foi adotada com base no modelo de incêndio-padrão, conforme eq. 2 (ABNT NBR 5628:2001 e ISO 834 (1990)), em que θ_g é a temperatura dos gases ($^\circ\text{C}$) e t o tempo (em minuto). Adotou-se ainda o fator de emissividade equivalente chamas-material igual a 0,5 (para os materiais aço, concreto e alvenaria), bem como coeficiente de transferência de calor por convecção igual a $25 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$. A face superior da laje foi considerada adiabática.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2)$$

3 ASPECTOS DA MODELAGEM NUMÉRICA

3.1 Considerações com relação à análise numérica via TCD

Para obtenção da capacidade resistente das vigas em situação de incêndio, inicialmente, foi realizada análise *térmica* via modelagem executada com o código Super Tempcalc (TCD) (1997), desenvolvido pela FSD (Fire Safety Design - Suécia), por meio do método dos elementos finitos. Os resultados numéricos da análise térmica são: *campo de temperaturas e isothermas*. Um exemplo de saída do código em questão é apresentado na figura 3a.

Em seguida, determinaram-se o momento resistente da seção de aço à temperatura ambiente (M_{Rk}), sem considerações de instabilidades local ou global e em situação de incêndio ($M_{Rk,fi}$). Para o cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio, as características do perfil são introduzidas no módulo SBEAM do TCD, o qual permite determinar o momento resistente em

incêndio da seção transversal plastificada em função do tempo por meio da eq. 4, em que $k_{y,\theta i}$ é o redutor de resistência do aço do elemento finito “i” à temperatura θ , f_{yk} é o valor característico da resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente, A_i é a área do elemento i, $M_{Rk,fi}$ é o momento resistente da seção transversal e y_i é a distância entre o eixo neutro (determinado por meio da eq. 3) e o centróide do elemento i. Os valores de $k_{y,\theta i}$ correspondem à deformação linear específica residual de 0,2 % indicados no EN 1993-1-2:2005, para simular a instabilidade local em incêndio. Externamente ao programa, pode-se calcular o fator de redução $K = M_{Rk,fi}/M_{Rk}$, conforme figura 3b.

$$\sum_{i=1}^m k_{y,\theta i} \cdot f_{yk} \cdot A_i \cdot y_i = 0 \quad (3)$$

$$M_{Rk,fi} = \sum_{i=1}^m k_{y,\theta i} \cdot f_{yk} \cdot A_i \cdot y_i \quad (4)$$

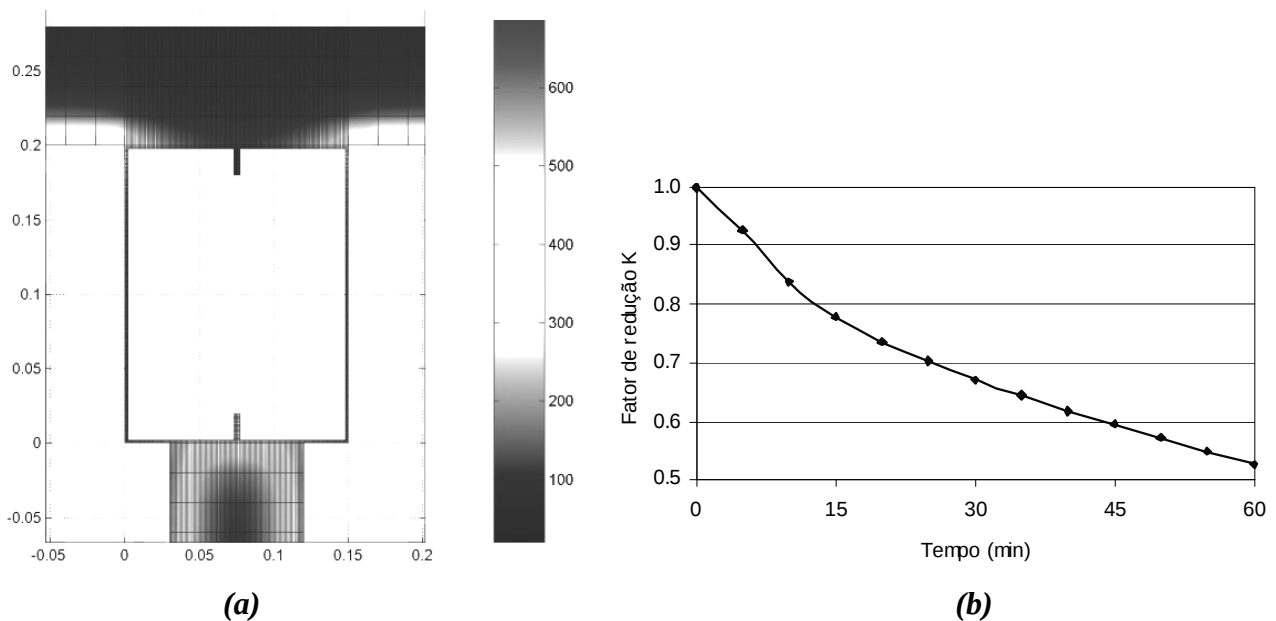


Figura 3: **(a)** Distribuição das temperaturas na seção transversal após 15 minutos de incêndio e **(b)** Redutor do momento resistente da seção do perfil em função do tempo

3.2 Considerações com relação à análise numérica via ANSYS

Para obtenção da capacidade resistente das vigas em situação de incêndio, foram necessárias duas análises distintas: *térmica e estrutural*. Por meio da análise térmica, foi determinado o campo de temperaturas no perfil de aço em função da elevação da temperatura, considerando laje de concreto e alvenaria como elementos absorvedores de calor (“sink elements”).

O elemento utilizado para representação do perfil de aço, da laje de concreto e da alvenaria na análise térmica foi o **Solid70**, juntamente com o elemento **Surf152** para geração das superfícies

de convecção e radiação nas faces expostas ao incêndio. Tais elementos possuem apenas a temperatura como único grau de liberdade por nó. O elemento utilizado para representação do perfil de aço na análise estrutural foi o **Solid45**, cujos graus de liberdade em cada nó correspondem às translações nas direções x , y e z . A análise estrutural foi realizada aplicando-se, inicialmente, carregamento uniformemente distribuído sobre a viga, na forma de força nos nós sobre a mesa superior do perfil metálico. Visando evitar problemas localizados em função da forma escolhida para a aplicação do carregamento, o deslocamento vertical dos nós da mesa superior pertencentes a uma mesma seção transversal foi compatibilizado, acoplando-se tais nós na direção y (vertical), conforme Figura 4.

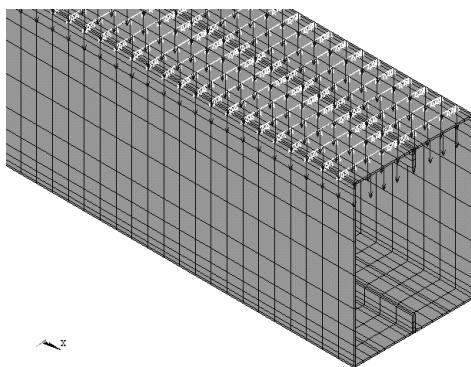


Figura 4: Aplicação do carregamento no modelo para análise estrutural

Em seguida, foi incrementado o campo de temperaturas obtido previamente na análise térmica. Para obtenção do carregamento máximo a ser utilizado como referência, foi realizada uma análise da mesma viga em temperatura ambiente, obtendo-se esse carregamento em correspondência a um deslocamento com comportamento assintótico.

3.3 Considerações sobre a vinculação adotada

Por se tratar de uma pesquisa inédita desse tipo de sistema, adotou-se a estratégia de se iniciar com uma situação estrutural relativamente simples para, em seguida, refinar o modelo aplicando-se considerações mais realísticas. Para a condição inicialmente adotada, **Modelo 1**, considerou-se engaste fixo e engaste móvel nas extremidades da viga (figura 5a), restrição ao deslocamento na direção z na interface laje-viga, bem como acoplamento dos deslocamentos na direção y dos nós pertencentes a uma mesma seção na mesa superior. Na figura 5b é mostrado um detalhe da vinculação da extremidade do modelo numérico.

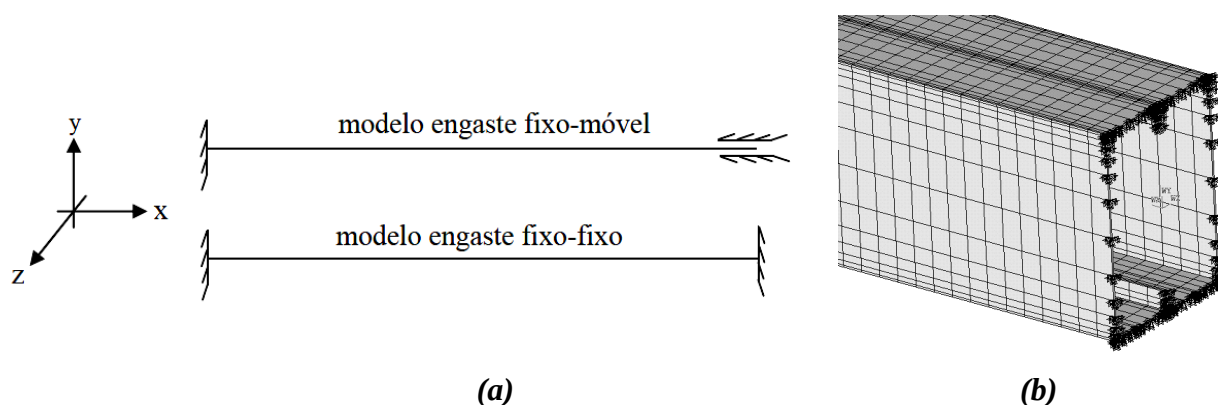


Figura 5: **(a)** Esquemas estáticos assumidos para a viga de aço e **(b)** Detalhe ilustrativo da vinculação na extremidade do perfil

Em seguida, buscando uma representação mais rigorosa das condições de vínculo da viga, foram estabelecidos e analisados quatro casos de refinamento com referência às condições de vinculação:

- **Modelo 2:** engaste fixo – engaste móvel, restrição ao deslocamento na direção z na interface laje-viga, bem como acoplamento dos deslocamentos nas direções y e x dos nós pertencentes a uma mesma seção na mesa superior;
- **Modelo 3:** engaste fixo – engaste fixo, restrição ao deslocamento na direção z na interface laje-viga, bem como acoplamento dos deslocamentos nas direções y e x dos nós pertencentes a uma mesma seção na mesa superior;
- **Modelo 4:** engaste fixo – engaste móvel, restrição ao deslocamento nas direções x e z na interface laje-viga, bem como acoplamento dos deslocamentos na direção y dos nós pertencentes a uma mesma seção na mesa superior;
- **Modelo 5:** engaste fixo – engaste fixo, restrição ao deslocamento nas direções x e z na interface laje-viga, bem como acoplamento dos deslocamentos na direção y dos nós pertencentes a uma mesma seção na mesa superior.

Para os **Modelos de 1 a 5**, para fins de análise estrutural, não foi considerada a existência de laje de concreto (exceto como travamento lateral), considerando apenas a rigidez da viga de aço na determinação dos deslocamentos, ou seja, desconsiderando a ação mista entre viga e laje. Por meio de análise com relação aos resultados obtidos (os quais não serão aqui apresentados por ultrapassar os objetivos do presente trabalho) foi possível constatar que o deslocamento vertical máximo (flecha) mostrou-se fortemente influente na alteração do sentido da reação de apoio e, conseqüentemente, na capacidade resistente. Dessa forma, a análise foi estendida à situação de viga mista (consideração da laje) com interação total, aqui denominado **Modelo 6**, cujos resultados serão apresentados nos itens seguintes.

Para o modelo com a consideração da ação mista, a laje foi modelada utilizando-se o elemento **Shell 181**, cujos graus de liberdade em cada nó correspondem às translações e rotações nas direções x, y e z. A análise estrutural foi realizada aplicando-se, inicialmente, carregamento uniformemente distribuído sobre a viga. A figura 6 apresenta uma visão geral do modelo numérico gerado pelo código ANSYS, bem como as superfícies da seção expostas ao fogo com pontos de análise.

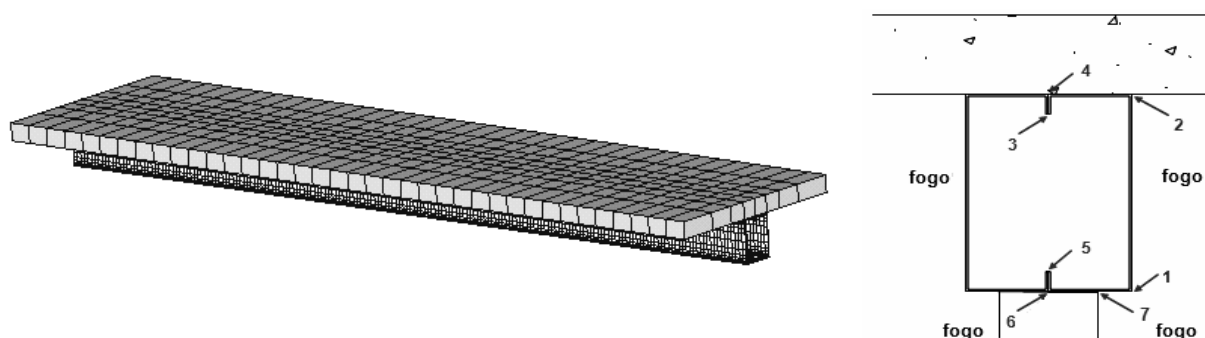


Figura 6: Modelo numérico, exposição ao fogo e pontos de monitoramento de temperatura

A Figura 7 apresenta vistas lateral e superior do modelo, permitindo-se visualização do posicionamento dos “pontos de conexão” entre o perfil de aço e a laje de concreto. A ligação entre laje de concreto e viga de aço é obtida pelo acoplamento dos graus de liberdade dos elementos sólidos e de casca, nos nós em destaque nessa mesma figura. O carregamento foi aplicado na forma de força nos nós sobre a laje de concreto nos pontos vinculados ao perfil de aço para evitar problemas (efeitos) localizados na laje quando do processamento do modelo.

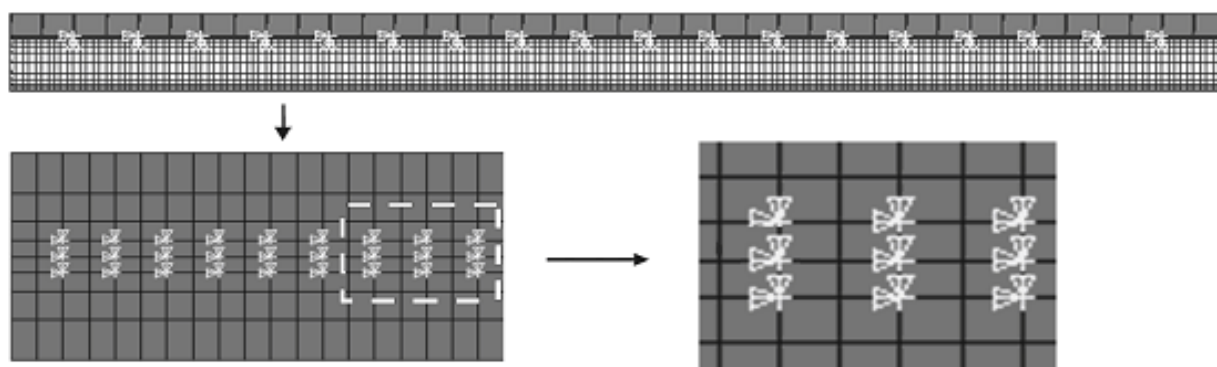


Figura 7: Ligação viga-laje no modelo numérico: posição dos acoplamentos dos graus de liberdade para representar os conectores de cisalhamento

Deve-se ressaltar que, da forma como foi modelado o sistema, a consideração do engaste fixo impõe variação do ponto de aplicação da reação hiperestática de apoio (força axial). Essa

mesma reação (força axial equivalente) que surge em resposta à situação de incêndio, quando aplicada fora do centróide da seção transversal no apoio provoca momentos solicitantes adicionais. Em vista da deformação final do *modelo biengastado* ter a forma de uma catenária, como será visto mais adiante, e as ligações apresentarem grandes deformações localizadas, estudou-se, também, para efeito de comparação, a situação *de ligação biapoiada*, aqui denominado **Modelo 7**, conforme figura 8a. Na figura 8b tem-se a vinculação correspondente no modelo numérico.

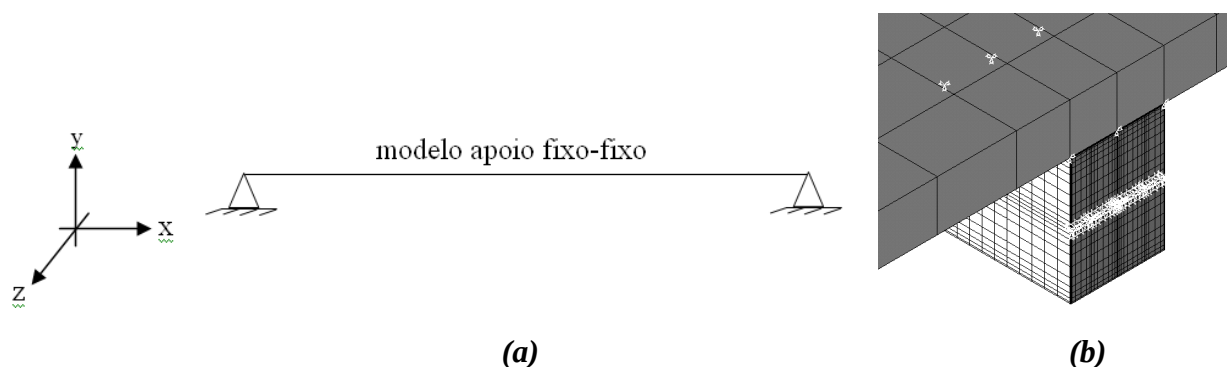


Figura 8: Modelo 7: **(a)** Esquema estático e **(b)** Detalhe da vinculação na extremidade do perfil

Para o **Modelo 7** empregou-se uma chapa de topo com 2 mm de espessura (mesma espessura do perfil) com módulo de elasticidade constante igual a 10 vezes o módulo de elasticidade do aço (em temperatura ambiente). Cabe ressaltar que para o caso de apoios fixos rotulados, são acoplados os deslocamentos verticais entre o perfil e a laje na extremidade do elemento misto.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Na figura 9 são apresentados os resultados obtidos na análise térmica efetuada por meio dos códigos TCD e ANSYS, com relação aos pontos 4 e 6 indicados na figura 6. A boa correlação demonstra que as hipóteses, as ferramentas e as operações adotadas resultam coerentes e em concordância com as necessidades da análise em questão.

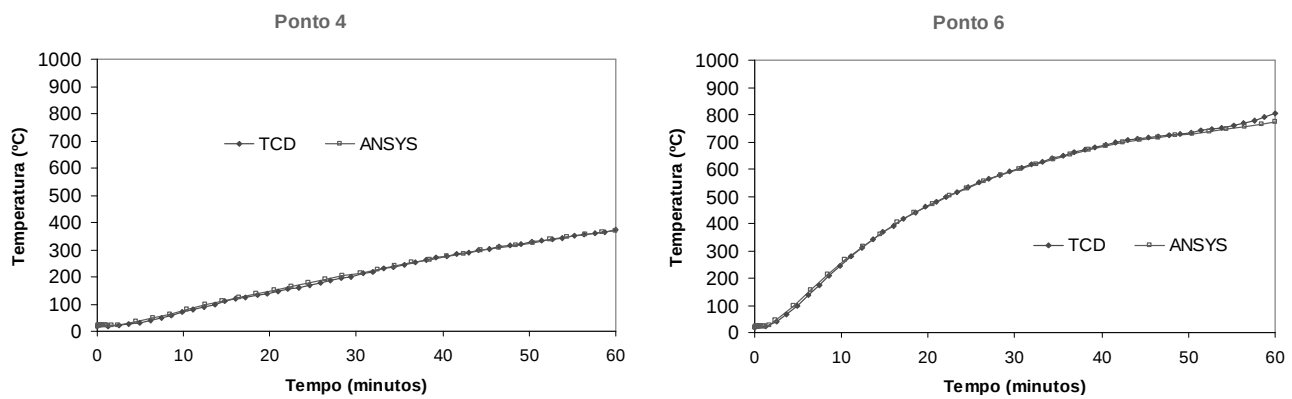


Figura 9: Variação da temperatura em função do tempo para os pontos 4 e 6 da figura 6

As Figuras 10 e 11 apresentam resultados de deslocamentos verticais no meio do vão para os modelos analisados. Pode-se notar pela análise da figura 10a, que as restrições introduzidas no **Modelo 2** praticamente não afetam os resultados, quando comparados aqueles obtidos para o modelo **Modelo 1**. No entanto, os **Modelos 3, 4 e 5** alteram substancialmente a resposta da viga, pois consideram restrições longitudinais ao deslocamento.

No **Modelo 5**, a reação vincular horizontal é inicialmente de compressão devido à dilatação da viga. Em seguida, com o aumento gradativo da temperatura, ocorre redução do módulo de elasticidade com consequente aumento da flecha, conduzindo a viga a uma configuração em "catenária", quando então a reação passa a ser de tração, conforme pode ser observado na figura 12a, o que constitui uma situação favorável à segurança da viga.

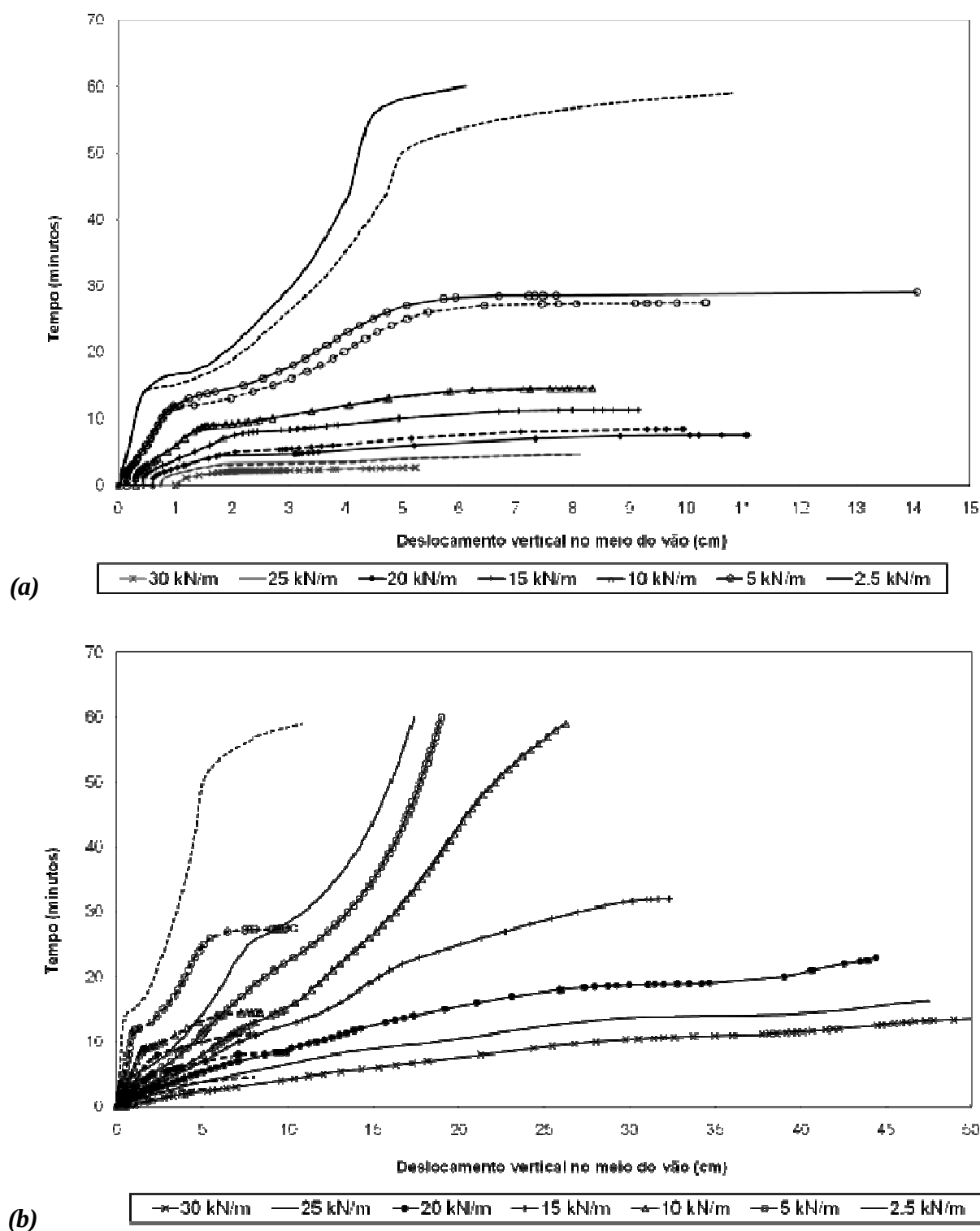


Figura 10: Deslocamentos verticais no meio do vão em função do tempo: (a) **Modelo 2** (linha cheia) x Modelo 1 (linha tracejada) e (b) **Modelo 3** (linha cheia) x Modelo 1 (linha tracejada)

O gráfico apresentado na Figura 10b evidencia que a restrição ao deslocamento axial nos apoios, como aquela aplicada ao **Modelo 2**, ocasiona maiores deslocamentos transversais durante todo o período de elevação de temperatura, quando comparados àqueles identificados no **Modelo 1**.

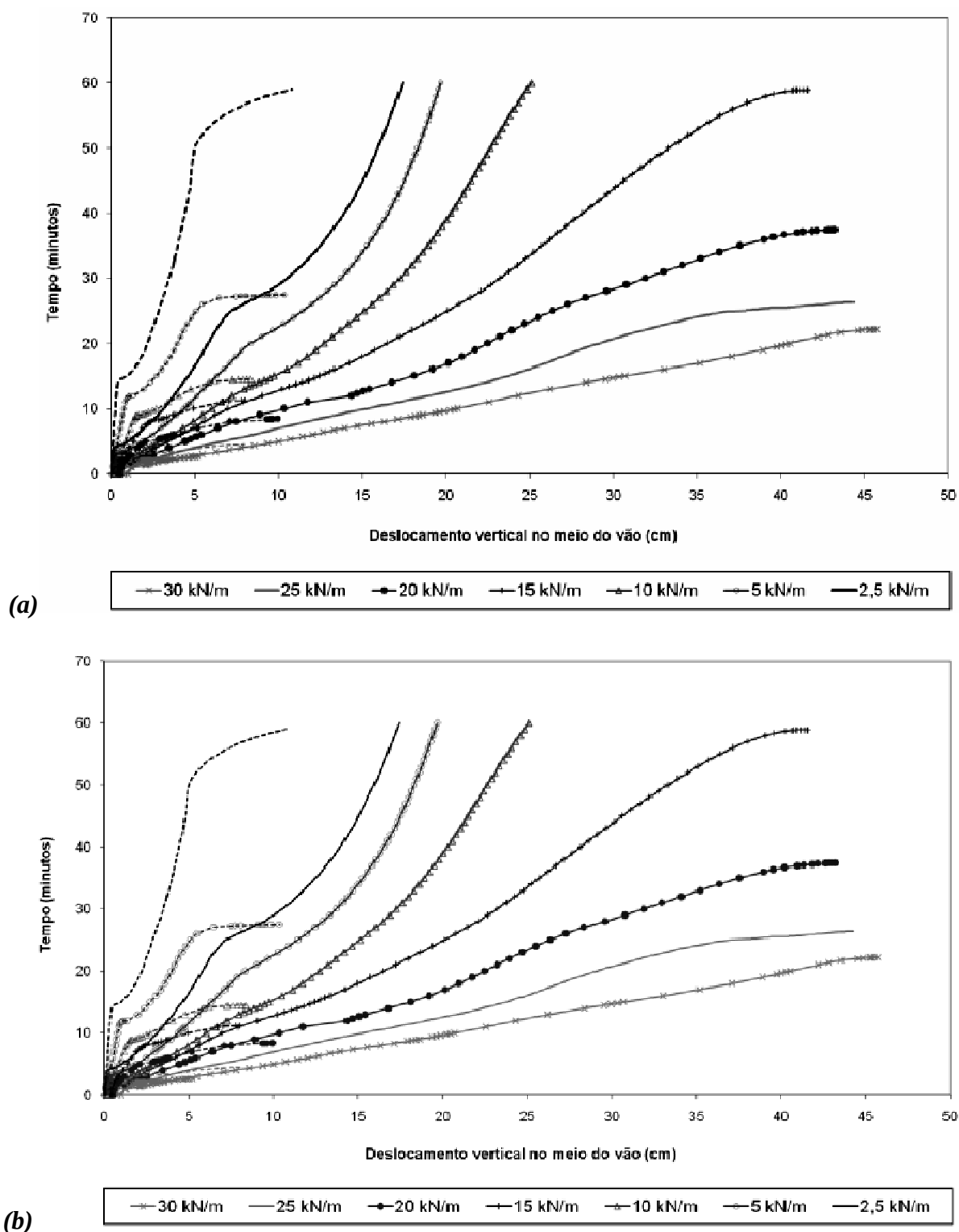


Figura 11: Deslocamentos verticais no meio do vão em função do tempo: **(a) Modelo 4** (linha cheia) x Modelo 1 (linha tracejada) e **(b) Modelo 5** (linha cheia) x Modelo 1 (linha tracejada)

A restrição axial ao deslocamento nos apoios possibilita uma configuração de grandes deslocamentos à viga (em formato aproximado de catenária). A configuração de grandes deslocamentos provoca uma menor penalização no fator de redução de esforços resistentes da viga durante o tempo de exposição ao incêndio-padrão, em resposta à reação de tração, porém, a custo de

grandes deformações. Futuramente, o estado limite último em situação de incêndio, para essa situação, precisa ser mais bem avaliado.

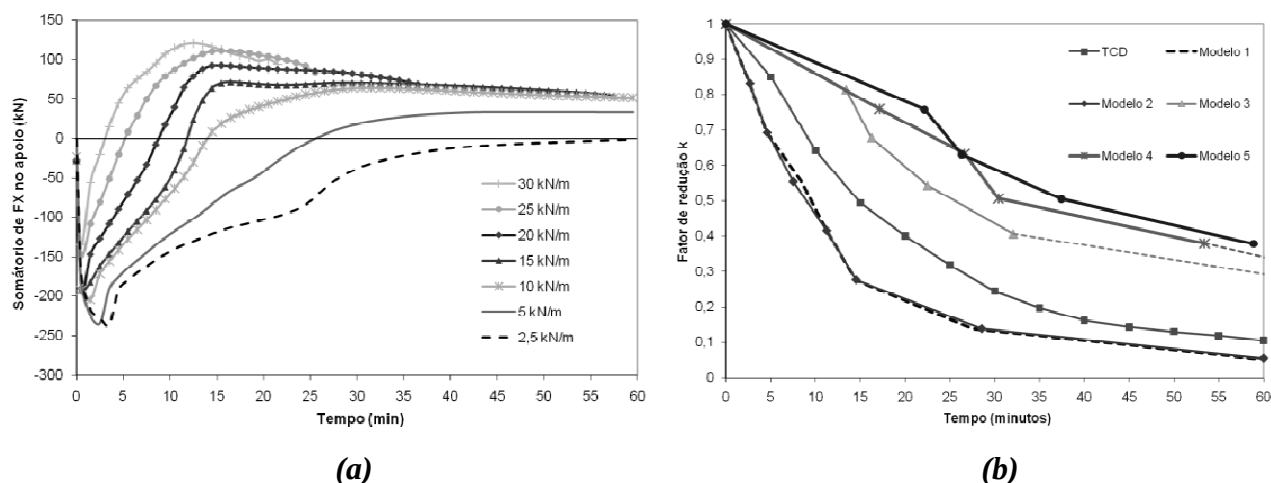


Figura 12: **(a)** Somatório de forças na direção x (F_x) no apoio da viga em relação ao tempo e **(b)** Comparativo da evolução dos fatores de redução

À medida que restrições ao deslocamento longitudinal são inseridas no modelo, a capacidade resistente da viga aumenta. O fator de redução apresentado na figura 12b, no caso do TCD, consiste da relação (eq. 5) entre momento resistente característico em incêndio, $M_{Sk,fi}$, e à temperatura ambiente, M_{Sk} . No caso ANSYS, o fator de redução é dado pela eq. 6, que consiste na relação entre o carregamento máximo aplicável em situação de incêndio, $p_{Sk,fi}$, e à temperatura ambiente, p_{Sk} .

$$k = \frac{M_{Sk,fi}}{M_{Sk}} \quad (5)$$

$$k = \frac{p_{Sk,fi}}{p_{Sk}} \quad (6)$$

A comparação entre os resultados dos **Modelos 3 e 5**, ambos com as extremidades com engastes fixos, permite avaliar a influência da restrição axial na interface laje-viga na resposta do elemento estrutural. O **Modelo 5** difere do **Modelo 3** por possuir restrição axial na interface laje viga (na posição dos conectores de cisalhamento). Pode-se notar, por meio da figura 12b, que o **Modelo 5** apresenta redutores menos severos se comparados àqueles apresentados pelo **Modelo 3**, o que permite admitir que a presença de uma fonte de restrição ao deslocamento axial, como por exemplo, aquela imposta à viga de aço pela presença de uma laje de concreto, por meio de conectores de cisalhamento, pode ser importante no desempenho da viga em situação de incêndio.

O aspecto relatado motivou a elaboração do **Modelo 6**, que possibilita uma avaliação mais realista do comportamento de viga mista de aço e concreto em situação de incêndio. A figura 13

apresenta a configuração deformada obtida para o **Modelo 6** (modelo da viga mista) para o caso de carregamento de 25 kN/m e para o tempo em torno de 26 minutos (tempo de colapso). O deslocamento no meio do vão é de aproximadamente 20 cm.



Figura 13: Configuração deformada da viga para $p_{sk,fi} = 25$ kN/m e $t = 26$ min de incêndio

Vale aqui ressaltar que a consideração da laje de concreto no modelo numérico gerou dificuldades consideráveis quando da convergência do processamento do modelo numérico, tendo sido necessário alterar valores considerados como “default” pelo código ANSYS para parâmetros como tolerância e deformação máxima.

Em fase posterior à análise do **Modelo 6**, tendo em vista que os engastes passam a ser comportar como rótulas para baixos níveis de temperatura, foi proposto um novo modelo, aqui denominado **Modelo 7**, construído com apoios fixos nas extremidades com o intuito de se avaliar a influência do tipo vinculação na resposta do elemento estrutural (engaste *versus* rótula). Nesse sentido, inicialmente apresentam-se os resultados obtidos para os **Modelos 6 e 7** em temperatura ambiente. Na figura 14, têm-se os deslocamentos no meio do vão em função do carregamento, para a condição de extremidades engastadas e condição de apoios fixos, figuras 14a e 14b, respectivamente.

Na análise da figura 14b (modelo biapoiado) verifica-se a influência significativa da laje na obtenção do carregamento de colapso da viga, dado pela tendência assintótica dos deslocamentos transversais no meio do vão em função do carregamento. O mesmo aspecto não ocorre para o modelo biengastado, já que nas regiões de momento máximo (próximo aos engastes fixos) o concreto se encontra tracionado e, por isso, contribui pouco para a resistência da viga mista. Tal fato sugere a necessidade do estudo da continuidade da laje (com presença de armadura negativa) em estudos futuros.

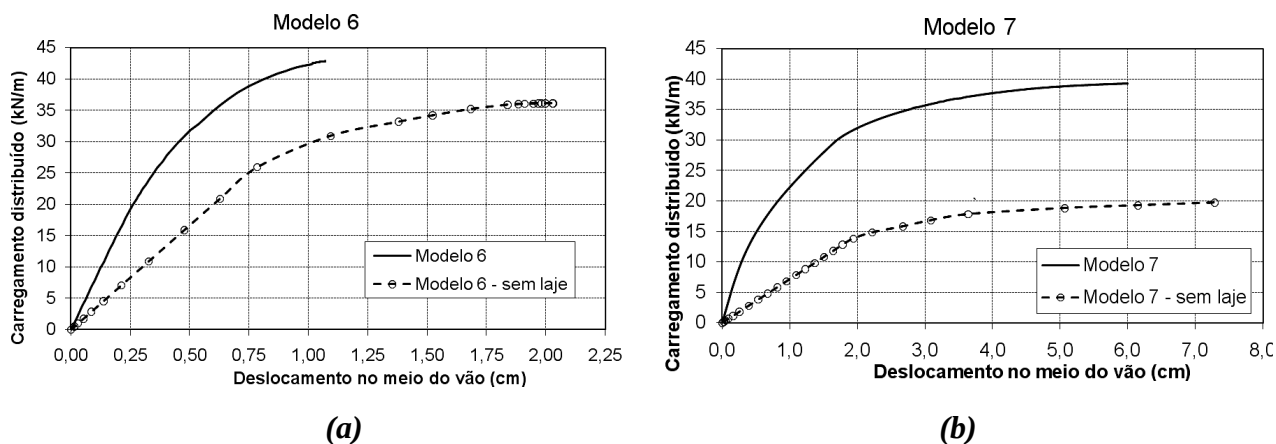


Figura 14: Deslocamento no meio do vão em função do carregamento: (a) Condição de extremidades engastadas e (b) Condição de extremidades com apoios fixos

Na figura 15a, têm-se os deslocamentos obtidos para as vigas *biengastada e biapojada*, considerando-se um determinado nível de carregamento e o tempo de exposição do elemento ao aquecimento determinado pela curva de incêndio padrão ISO 834. Analisando a figura 15a pode-se notar que, em geral, os deslocamentos da viga biengastada resultam menores se comparados àqueles obtidos para a viga biapojada para baixos tempos (baixas temperaturas).

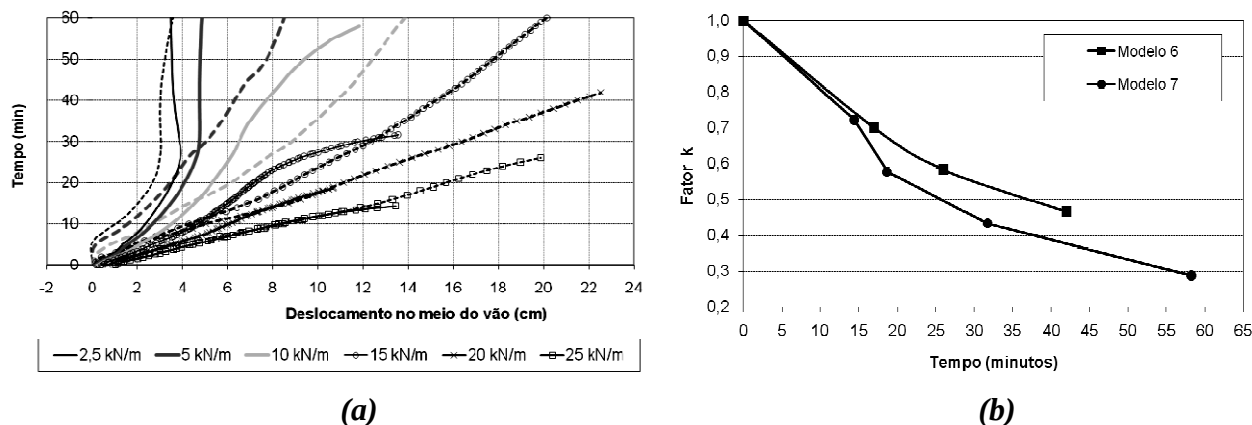


Figura 15: (a) Deslocamento no meio do vão em situação de incêndio: Modelo 6 (engastes, linhas tracejadas) x Modelo 7 (apoios fixos, linhas cheias) e (b) Fator de redução do momento resistente em incêndio para os modelos biapojado e biengastado

Em seguida, os deslocamentos passam a ser superiores para voltar a ser inferiores quando se aproxima o colapso (em caráter numérico) da viga biapojada. No modelo biengastado, as menores flechas, de início, se devem ao efeito do engastamento, ainda não prejudicado pelas grandes deformações locais nessa mesma região em resposta à elevação da temperatura.

O instante em que o deslocamento da viga biengastada, em relação à biapojada, passa a ser superior, se deve (possivelmente) à ocorrência de grandes deformações locais (formação de rótulas plásticas) na região do engaste em resposta à elevação da temperatura. A proximidade do colapso da viga biapojada, identificado pela falta de convergência do programa, a leva a grandes

deslocamentos, superando os deslocamentos identificados para biengastada, a qual, possivelmente, ainda retém (pelo modelo adotado) uma reserva de segurança resultando num maior tempo para o colapso. Tomando-se o carregamento último igual àquele que provoca uma tendência “assintótica” na curva deslocamento-tempo, para um determinado carregamento, pode-se, ainda que em caráter preliminar, determinar um fator de redução da resistência do elemento em situação de incêndio (Eq. 6).

Na figura 15b são apresentados os fatores de redução obtidos para os modelos *biengastado* e *biapoiado*. Por meio de análise da figura 15b, nota-se que o **Modelo 7** (viga mista biapoiada) apresenta fatores de redução mais severos que aqueles obtidos para a viga do **Modelo 6** (biengastado), durante todo o processo de aquecimento. Essa conclusão, entretanto, está diretamente associada ao modelo adotado para a ligação articulada. Supõe-se que, em situações ideais, o comportamento a altas temperaturas de ambas as vigas, biapoiada ou biengastada, sejam similares.

CONCLUSÕES

Neste trabalho analisou-se do ponto vista térmico e estrutural, o comportamento de uma viga constituída por perfil formado a frio de aço em situação de incêndio. A fim de considerar uma situação realística, a viga foi admitida sob laje de concreto e sobre alvenaria e engastada nos pilares, situação frequentemente encontrada em edifícios de pequeno porte.

Para a análise térmica, foram utilizados dois programas de computador, TCD e ANSYS, para fins de comparação de resultados. A coincidência de resultados foi notável indicando que as estratégias computacionais aqui adotadas estão adequadas.

Iniciou-se a análise estrutural, via ANSYS, por meio de uma modelagem simplificada e progressivamente foram introduzidos refinamentos. Admitiu-se de início a plastificação total da seção e foram desconsiderados quaisquer efeitos das deformações térmicas. Em seguida, foram incluídos esses efeitos, bem como a possibilidade de instabilidade local, porém ainda sem consideração do efeito misto conferido pela conexão da laje à viga. Esforços solicitantes adicionais devido a restrições à deformação térmica longitudinal ao nível da interface laje-perfil e no apoio foram considerados na análise.

Os efeitos da deformação térmica elevaram a capacidade resistente da viga em incêndio. A reação vincular horizontal inicialmente é de compressão devido à dilatação da viga. Em seguida, com o aumento gradativo da temperatura, ocorre a redução do módulo de elasticidade com conseqüente aumento da flecha, conduzindo a viga a uma configuração que lembra uma catenária (comportamento de cabo), quando então a reação passa a ser de tração.

Considerando-se o efeito misto, para análises em temperatura ambiente, a laje pouco contribui na capacidade da viga, uma vez que se observa, nos resultados numéricos, aproximadamente 40% do volume da laje submetida à tração em razão da condição de engaste nos apoios. Para análises em situação de incêndio, a reação vincular também se altera de compressão para tração.

Em vista das grandes deformações locais (apoios) e globais (flecha), para fins de comparação, estudou-se, também, o caso de vigas biapoiadas (ambos os apoios fixos). O comportamento de ambas as vigas, no estado limite último em situação de incêndio, são similares, com algum ganho para o modelo biengastado. No entanto, essa constatação depende fortemente do modelo empregado para a ligação.

Pretende-se dar continuidade ao presente trabalho incluindo: contribuição da armadura da laje, continuidade da laje e da viga, abertura nas paredes, modelos numéricos com elementos somente do tipo casca, interação parcial viga-laje, incêndio natural, outros modelos de ligação e análise experimental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPESP, à Cosipa, ao CBCA, pelo apoio à pesquisa, e às Eng^{as}. Érika Bastos e Tatianne Iamin Kotinda pela inestimável colaboração nas etapas iniciais do trabalho.

REFERÊNCIAS

American Institute of Steel Construction. ANSI/AISC 360-05 Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, EUA, 2005.

Anderberg, Y. User's Manual. Fire Safety Design. Lund, TCD 5.0 edition, (1997).

ANSYS INC. Ansys Release 9.0 – Documentation, (2004).

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14323 - Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, Brasil, 1999.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14432 – Exigências de resistência ao fogo dos elementos construtivos das edificações. Rio de Janeiro, Brasil, 2000.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 5628 - Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR6118 - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado - Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR15200 - Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, Brasil, 2004 .

European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.2: General rules - Structural fire design. EN 1993-1-2, Brussels (2005).

European Committee for Standardization. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules General and rules for buildings, EN 1992-1-1, Brussels (2004).

European Committee for Standardization. EN 1992-1-2 - Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels, Belgium (2004).

International Organization for Standardization (ISO). Fire-resistance tests – elements of building construction – Part 1.1: General requirements for fire resistance testing. ISO 834. Geneva: ISO/TC, 1990. [Revision of first edition (ISO 834:1975)].

Université de Liège, Departement M&S. Ozone V2.0, The design fire tool ozone v2.0 – theoretical description and validation on experimental fire tests. Liège. 2001.

Silva, V. P.; Fakury, R. H. Brazilian standards for steel structures fire design. Fire Safety Journal. v. 37, n. 2, p. 217-227. U. K. 2002.

THERMAL AND STRUCTURAL ANALYSES OF A COLD FORMED BOX SECTION STEEL BEAM IN FIRE

Abstract

In this work, the results of numerical, thermal and structural analyses for a cold formed box section steel beam under a slab and on masonry in fire situation are presented. Initially, the Swedish software Super Tempcalc (TCD) for thermal analysis was used and the reduction factor of bending fire resistance as function of time of exposition to the fire is determined. After that, by means of the software ANSYS, thermal and structural analyses applied to several boundary conditions in the supports (fixed-fixed, fixed-fixed with roller, pinned-pinned) and the contact with the slab (with or without composite effects) are carried on.

1 CONCLUSIONS

There were total coincidence of thermal analyses results from ANSYS and TCD.

Structural analysis was initiated by means of a simplified model and gradually refinements were been introduced. The total plastification of the cross section was admitted of beginning without any consideration of the thermal deformations effects. After that, those effects were included, as well as the local buckling, however without the consideration of the composite effect slab-beam. Additional efforts due to the restrictions to the axial thermal deformation to the level of the interface slab-profile and in the support were considered in the analysis. The effects of the thermal deformation had raised the fire resistance of the beam. The horizontal reaction initially is of compression due to axial expansion of the beam. After that, with the gradual increase of the temperature, the modulus of elasticity reduces with consequent increase of the vertical displacement, leading the beam to a configuration that remembers a centenary, when then the reaction becomes tension.

Considering the composite action, for analyses at room temperature, the contribution of the slab is very small to the fire limit state of the beam, in view that in the numerical results, approximately 40% of the volume of the slab are submitted to the tension in reason of the condition of fixed supports. For analyses in fire situation, the reaction also change from compression to tension.

In view of the great local (supports) and global (displacement) deformations, for comparison, it was studied, also, the case of pinned-pinned beams. The behavior of both beams in the limit state is similar, with small advantage for the fixed-fixed model. However, this conclusion depends strongly on the connection model.

Finally, based on the procedures adopted here, the authors have the intention to give continuity to the present work including: contribution of the reinforcement of the slab, continuity of the slab and the beam, opening in the walls, numerical models using only shell elements, partial interaction beam-slab, natural fire, other models of connection and experimental analysis.