

The Influence of end Conditions on Numerical Models of Cold Formed Steel and Concrete Composite Beams in Fire

Influência da Vinculação em Modelos Numéricos de Vigas Mistas de Aço e Concreto em Situação de Incêndio



R. RIGOBELLO ^a
ronbello@sc.usp.br

S. J. C. ALMEIDA ^b
sauojca@hotmail.com

J. MUNAIAR NETO ^c
jmunaiar@sc.usp.br

M. MALITE ^d
mamalite@sc.usp.br

V. P. SILVA ^e
valpigss@usp.br

Abstract

In this paper is discussed the influence of the end conditions in composite cold-formed steel box section and concrete over masonry in fire situation. The software ANSYS was used for numerical simulation of the composite beam. The end conditions are considered as fixed or pinned and axial restrained at the ends. Initially, numerical thermal analysis to determine the field of temperatures in the steel profile and the slab under ISO-fire are carried out. The heat flux between steel, concrete slab and masonry are considered. The structural analysis is carried through for evaluating the performance of the composite beam in fire. Both geometric and materials nonlinearities, as well as the variation of the stress-strain diagram of the materials in function of the temperature are considered. Finally, comparisons between the behavior of beams with fixed ends and pinned ends are shown as well as the reduction factors with the time of exposition to the fire are determined.

Keywords: fire, structural analysis, numerical analysis, composite beams, cold-formed steel..

Resumo

Neste trabalho é discutida a influência da condição de vinculação de extremidade de vigas mistas de aço e concreto, sobre alvenaria, em situação de incêndio. O perfil de aço da viga é formado a frio, com seção transversal do tipo caixão. São consideradas situações de engastamento e rótula ideal para as extremidades da viga de interesse, em modelos numéricos elaborados por meio do código computacional ANSYS. Inicialmente, são realizadas análises numéricas de caráter térmico para a determinação do campo de temperaturas no perfil de aço e na laje, quando submetidos ao incêndio-padrão ISO 834. Em seguida, efetua-se o acoplamento termoestrutural para avaliação do desempenho do elemento em temperaturas elevadas. Por fim, são apresentadas comparações de interesse entre situações de extremidades da viga considerando-as engastadas e rotuladas, bem como são determinados os redutores do esforço resistente em resposta ao tempo de exposição ao fogo.

Palavras-chave: incêndio, análise estrutural, análise numérica, vigas mistas, perfis formados a frio.

^a Doutorando em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

^b Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-carlense, 400, CEP: 13.566-590, São Carlos, SP, Brasil

^c Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, 271 Cid. Universitária, São Paulo, SP, Brasil

1. Introdução

A Norma Brasileira ABNT NBR 14432:2000 [1] dispensa a verificação estrutural em situação de incêndio para o caso de edifícios com área total inferior a 750 m². Incluem-se nessa exceção, as estruturas de aço ou mistas sem revestimento contra fogo. Os autores deste artigo vêm estudando o comportamento em situação de incêndio de um sistema estrutural empregado no Brasil em edifícios residenciais de interesse social, composto por vigas de aço com seção tipo caixão sob laje de concreto.

Há trabalhos que analisaram o comportamento de vigas de aço com seção em forma de "I", sem problemas de instabilidades, isoladas (sem laje), em situação de incêndio (por exemplo: BUCHANAN et all [2], MOURÃO; SILVA [3]) incluindo o efeito do tipo de vinculação. Neste artigo, apresenta-se uma análise original, envolvendo uma viga de aço com seção unicelular (caixão) formada a frio, sujeita a instabilidades locais, superposta por uma laje de concreto. Em face desse ineditismo, a análise é desenvolvida de forma a isolar fenômenos e introduzi-los à medida que a análise se aprofunda até atingirmos uma conclusão irrefutável. Em Regobello et all [4] e [5], analisou-se o comportamento de vigas biengastadas de aço sob laje, sem e com o efeito misto, respectivamente. Em vista de a configuração última da viga biengastada em incêndio se aproximar da forma de uma catenária, procurou-se estender, neste artigo, o estudo às vigas biapoiadas.

O comportamento do concreto em situação de incêndio ainda não é inteiramente conhecido (KHOURY [6]), portanto, neste artigo os autores decidiram impor hipóteses simplificadoras buscando obter uma sinalização do comportamento estrutural global, inicialmente, em caráter exploratório, sem a pretensão de concluir o assunto. A pesquisa está em desenvolvimento, ainda sob forma teórica e, em breve, com comprovação experimental realizada em forno hori-

zontal para pesquisa da resistência ao fogo de estruturas, ora em construção na Universidade de São Paulo.

O presente trabalho teve por objetivo analisar a influência da vinculação de extremidades em modelos numéricos de vigas mistas de aço e concreto e concreto em situação de incêndio. As vigas estudadas são compostas de perfil de aço com seção transversal do tipo "caixão", constituído por perfis formados a frio, e laje de concreto armado, posicionados sobre parede. As condições de vinculação estudadas são casos de engastamento fixo e apoios fixos. Nesse contexto, são apresentados resultados de deslocamentos no meio do vão dos modelos, bem como são determinados os redutores do esforço resistente em resposta ao tempo de exposição ao fogo. O programa ANSYS é a ferramenta empregada para a realização das análises térmicas e estruturais.

2. Características geométricas da viga

A geometria dos modelos correspondem aos de uma viga constituída por perfil formado a frio de aço, apresentada na figura 1a. No modelo foram considerados: perfil de aço, laje de concreto de 8 cm de espessura por 0,95 m de largura e alvenaria (sob a mesa inferior) com 9 cm de espessura por 50 cm de extensão (figura 1b). O comprimento adotado foi igual a 3,8 metros (figura 1c). Na figura 1c tem-se o esquema das condições de vinculação consideradas e analisadas. Nessa mesma figura, a condição 1 refere-se à situação de extremidades com engastes fixos e a condição 2 refere-se à situação de extremidades com apoios fixos. O modelo adotado neste trabalho corresponde fielmente à situação encontrada nos edifícios de interesse social já mencionados. Após uma análise preliminar termestrutural de todas as vigas desses edifícios, optou-se por aquela mais representativa entre as mais solicitadas em incêndio.

Figura 1 – (a) Dimensões da seção transversal das vigas. (b) Esquema geral e dimensão da laje e alvenaria. (c) Vinculação dos apoios para os casos analisados. Dimensões em mm

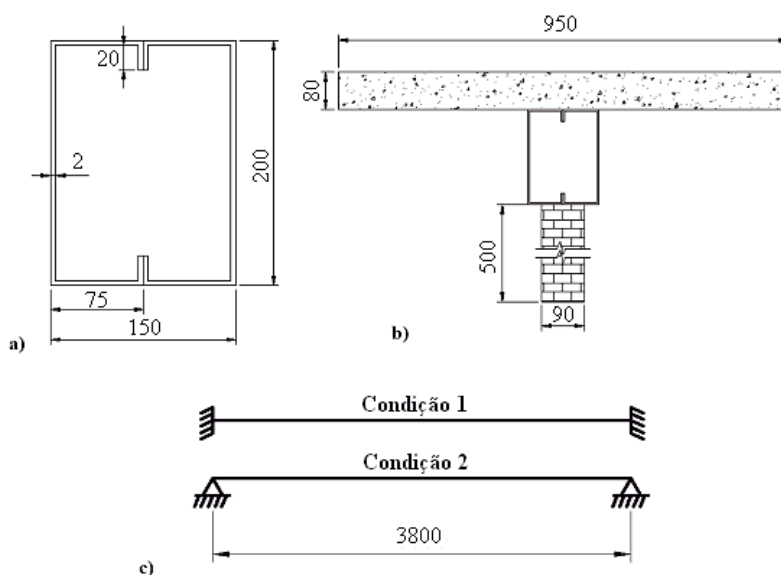
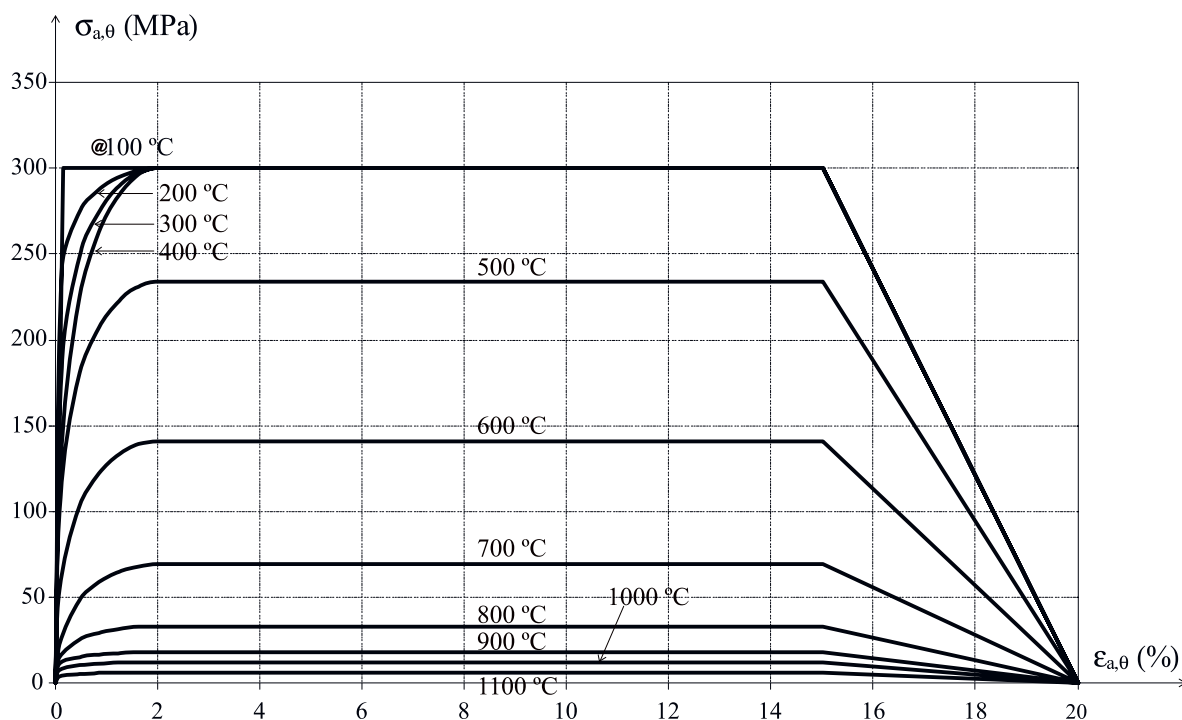


Figura 2 - Relações tensão x deformação adotadas para aço, em função da temperatura



3. Propriedades físico-térmicas dos materiais

As propriedades térmicas do concreto e do aço, variáveis com a temperatura e relevantes para a análise térmica, são: condutividade térmica, calor específico e alongamento. Os valores assumidos para as propriedades térmicas do aço em função da temperatura são aqueles recomendados pela NBR 14323:1999 [1]. Os valores assumidos para as propriedades térmicas do concreto em função da temperatura são aqueles apresentados no EN 1992-1-2:2004 [7], para concreto com umidade de 3%. No caso da condutividade térmica do concreto em função da temperatura, são prescritas duas equações, referentes a limite superior e inferior. Foi adotada neste estudo a equação referente ao limite inferior. Considerou-se, também, a ligeira redução da massa específica do concreto à temperatura elevada. Para a alvenaria foram adotados os parâmetros recomendados pelo código computacional OZONE v2.0 [8]: massa específica igual a 1600 kg/m³, calor específico igual a 840 J/kg°C e condutividade térmica igual a 0,7 W/m°C.

4. Propriedades mecânicas do aço e do concreto

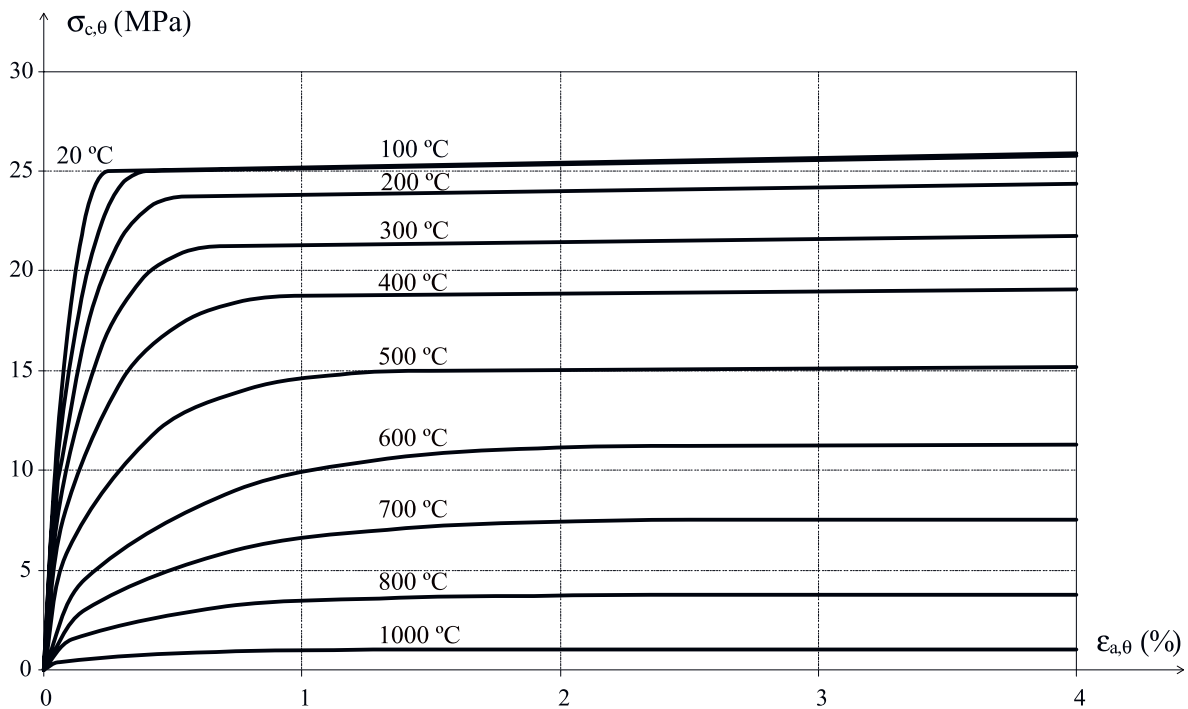
À temperatura ambiente, as propriedades mecânicas do aço do perfil adotadas na modelagem computacional, foram resistência ao escoamento igual a 300 MPa e módulo de elasticidade igual a 205000 MPa. Na análise estrutural de elementos de aço em altas

temperaturas, os efeitos da ação térmica são considerados por meio de coeficientes de redução das propriedades mecânicas em função da temperatura, fornecidos pela NBR 14323:1999[1] e pelo EN 1993-1-2:2005 [9]. A relação constitutiva adotada para o aço

Tabela 1 - Parâmetros para obtenção da relação constitutiva do concreto em função da temperatura

θ (°C)	k_c	k_{ec}	ϵ_{c0}
20	1	1	0,0025
100	1	0,875	0,004
200	0,95	0,73	0,0055
300	0,85	0,58	0,007
400	0,75	0,42	0,01
500	0,6	0,27	0,015
600	0,45	0,12	0,025
700	0,3	0,08	0,025
800	0,15	0,06	0,025
900	0,08	0,05	0,025
1000	0,04	0,03	0,025
1100	0,01	0,02	0,025
1200	0	0	0

Figura 3 – Relação tensão x deformação adotada para o concreto



foi aquela proposta pelo EN 1993-1-2:2005 [9], apresentada na figura 2, para temperaturas variando de 20 a 1100 °C. A resistência à compressão em temperatura ambiente adotada para o concreto foi igual a 25 MPa. O módulo de elasticidade adotado foi o secante, obtido de acordo com a NBR 6118:2003[10], com valor igual a 23.800 MPa. O valor da resistência à tração do concreto é assumido igual a 0,12 daquele valor referente à resistência à compressão. 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 [7], em que se considera como simplificação, regime plástico perfeito após a ruptura, tanto por tração quanto por compressão. O trecho plástico tem inclinação de 1/1000 para se evitar problemas de instabilidade numérica quando da execução do código. A escolha, para o concreto, de relações constitutivas sem a consideração do amolecimento (softening) se fez em função de problemas de instabilidade numérica

Figura 4 – Condições de exposição ao fogo e modelo para análise térmica: caso U5-VLA9-EIT

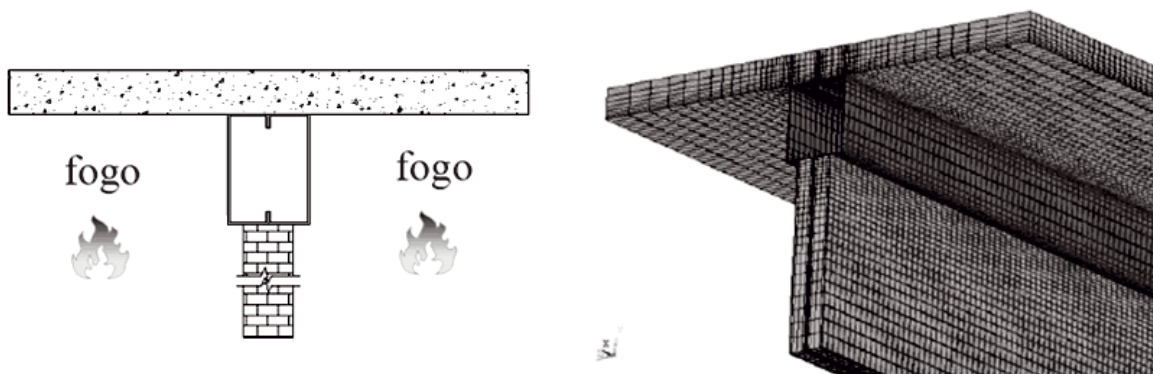
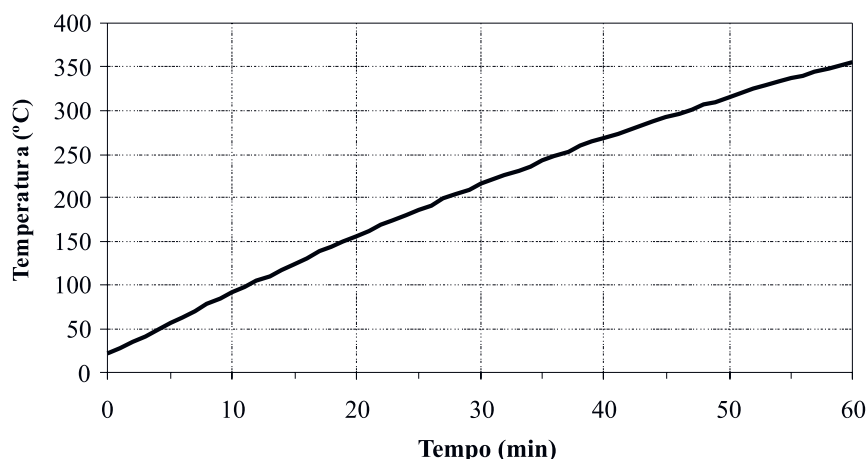


Figura 5 - Elevação de temperatura na laje, de acordo com prescrições estabelecidas pela NBR 14323:1999



quando da consideração do ramo descendente da curva. Tendo em vista ser o comportamento em situação de incêndio objeto de estudo do presente trabalho, tal instabilidade passou a se amplificar quando da consideração da penalização da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em função da temperatura. Pelas razões descritas, somando-se ainda o caráter exploratório da presente análise, optou-se por desconsiderar o ramo descendente com vistas a considerá-lo em pesquisas futuras, inclusive com avaliação no campo experimental.

Os parâmetros para obtenção da relação constitutiva do concreto em função da temperatura são apresentados na tabela 1, em que k_{fc} é coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto, k_{Ec} é o coeficiente de redução do módulo de elasticidade do concreto e ϵ_{c0} é a deformação linear específica de início do esmagamento do concreto. Tendo em vista que o EN 1992-1-2 [7] não fornece os valores do redutor do módulo de elasticidade, k_{Ec} , foi proposto neste trabalho aqueles valores indicados na tabela 1, com base no ANSI/AISC 360-05 com alguns ajustes. Para se levar em conta material com comportamento diferenciado na tração e na compressão foi utilizado o modelo constitutivo de HJELM (Cast Iron Plasticity) disponível na biblioteca de materiais do programa ANSYS. A relação constitutiva (tensão x deformação) do concreto em função da temperatura é apresentada na figura 3.

5. Considerações referentes a análise térmica

A ação térmica foi considerada proveniente da elevação de temperatura dos gases em situação de incêndio conforme o incêndio-padrão ISO 834 (eq. 1), em que θ_g é a temperatura dos gases em grau Celsius e t o tempo em minutos.

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

O fator de emissividade resultante chama-material adotado, por simplificação, é único e igual a 0,5 para os materiais aço, concreto e alvenaria. O coeficiente de transferência de calor por convecção adotado foi igual a 25 W/m²°C.

Por meio da análise térmica foi determinado o campo de temperatura na seção transversal mista em função da elevação da temperatura dos gases ao longo do tempo. Nessa fase, a laje de concreto e a alvenaria atuaram como absorvedores de calor. Para representação numérica do perfil de aço, da laje de concreto e da alvenaria na análise térmica foi utilizado o elemento finito SO-

Figura 6 - Vista geral do modelo numérico

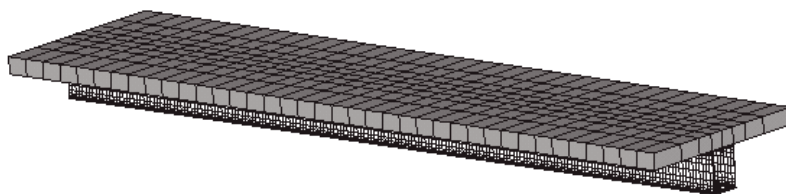
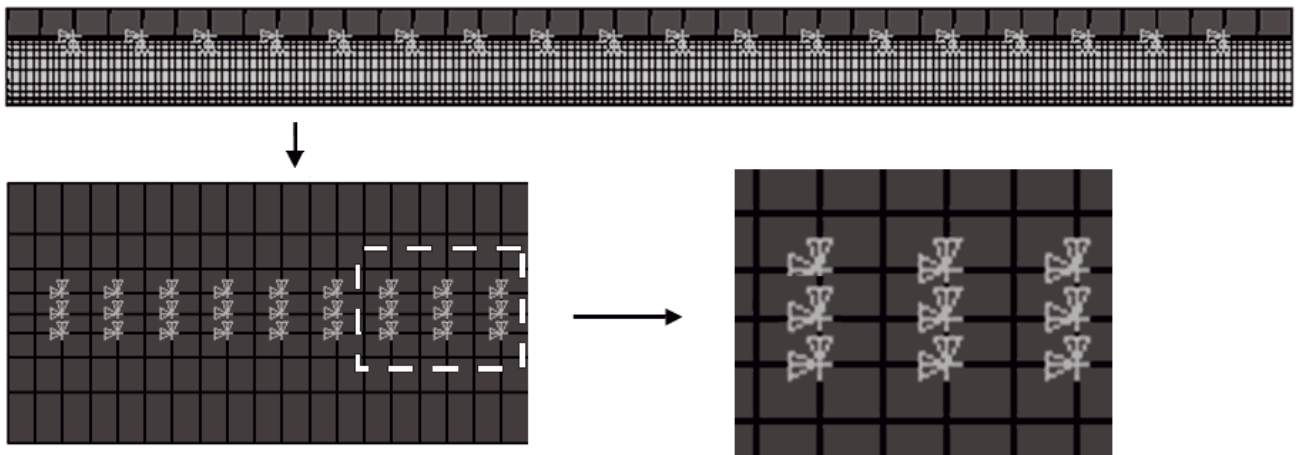


Figura 7 - Ligação Viga-Laje no modelo numérico: posição dos acoplamentos dos graus de liberdade para representar os conectores de cisalhamento



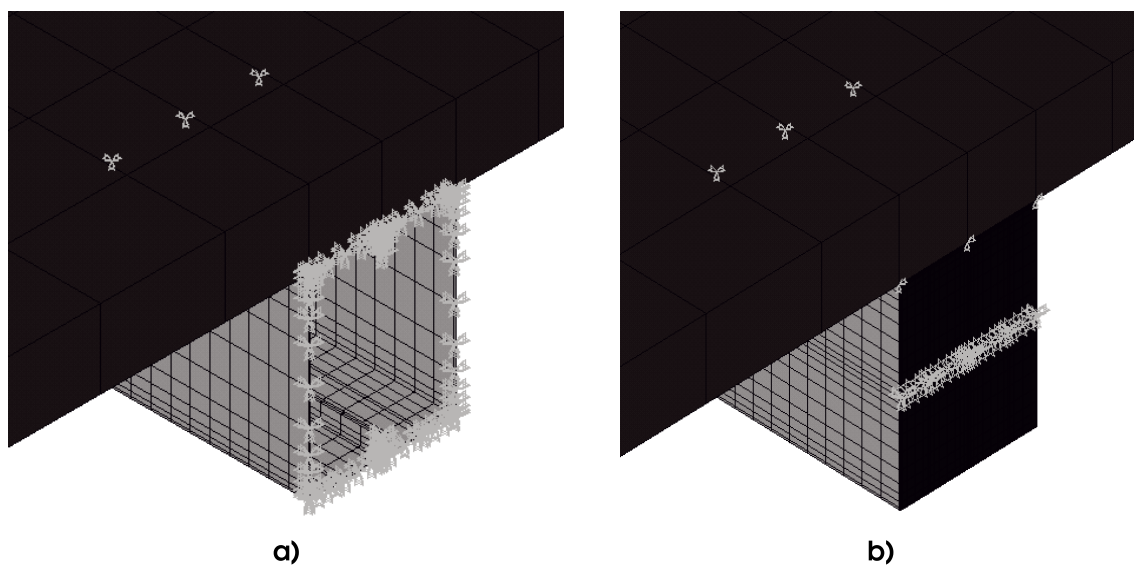
LID70. Foi utilizado ainda o elemento SURF152 para geração das superfícies de “convecção” e de “radiação” nas faces expostas ao incêndio. Tais elementos possuem apenas a temperatura como grau de liberdade por nó. Na figura 4, são esquematizadas as condições de exposição ao fogo e a discretização do modelo numérico, aqui denominado U5-VLA9-EIT, construído para fins de análise térmica.

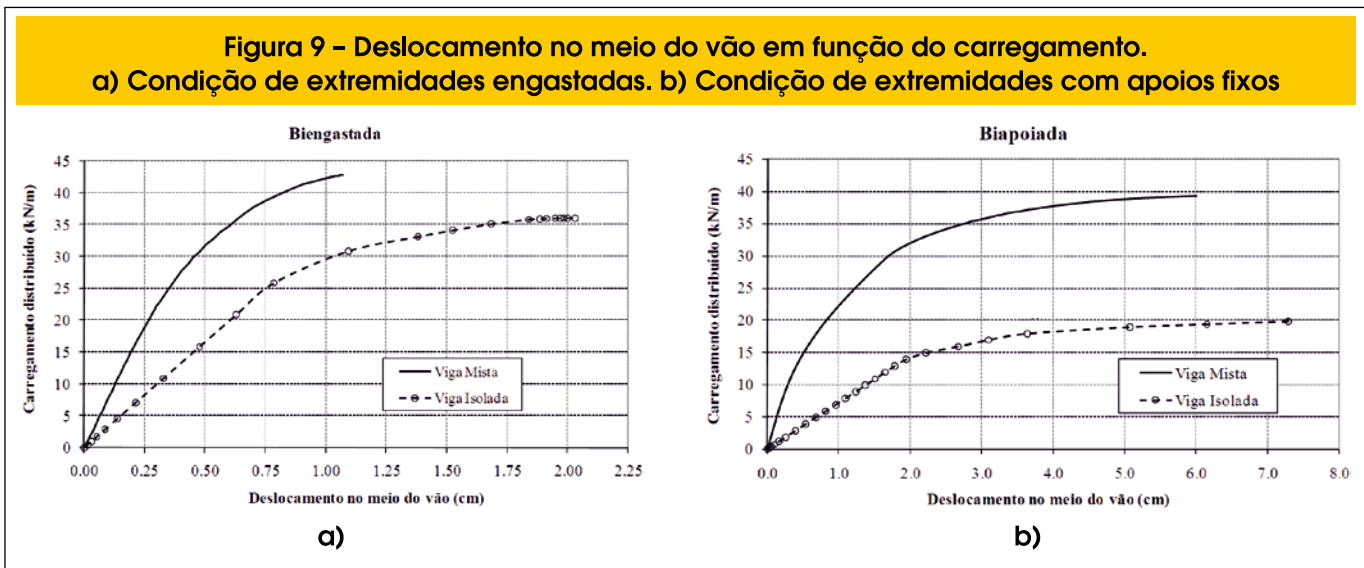
Para a laje de concreto, na análise estrutural, foi considerada uma variação de temperatura, uniforme ao longo da espessura, obtida por meio de procedimento simplificado da NBR14323:1999[1],

com curva de elevação de temperatura em função do tempo conforme figura 5. Isso se deve à discretização da laje com elementos do tipo casca na análise estrutural, tendo em vista problemas de convergência quando do emprego de elementos sólidos para discretização da laje.

Além disso, vale ressaltar que a laje de concreto não foi modelada com elemento do tipo casca na análise térmica tendo em vista que dentro do mecanismo de funcionamento do código computacional ANSYS v10, aqui adotado como ferramenta numérica, o campo de temperaturas obtido com o elemento de casca na análise térmica

Figura 8 - Detalhe da vinculação na extremidade do perfil. a) Vinculação para o caso de engaste fixo. b) Vinculação para o caso de apoio fixo



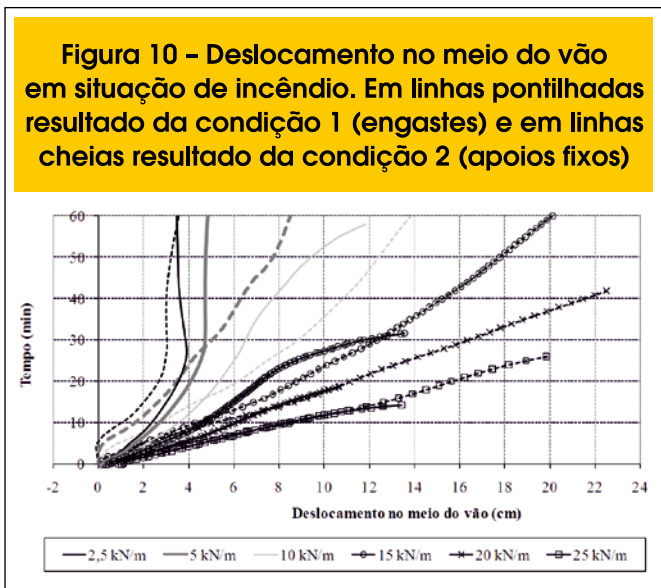


só pode ser utilizado posteriormente, para fins de análise estrutural, se o modelo térmico e o estrutural forem totalmente construídos com elementos do tipo casca.

6. Considerações referentes à análise estrutural

A determinação dos campos de temperatura foi viabilizada com elementos do tipo sólido, o qual, para fins estruturais, se mostrou adequado à viga de aço, tendo em vista o fato de esse material não apresentar problemas de convergência numérica em função das suas propriedades e relações constitutivas adotadas.

Por outro lado, o concreto enquanto material, apresentou problemas de instabilidade numérica, pois suas relações constitu-

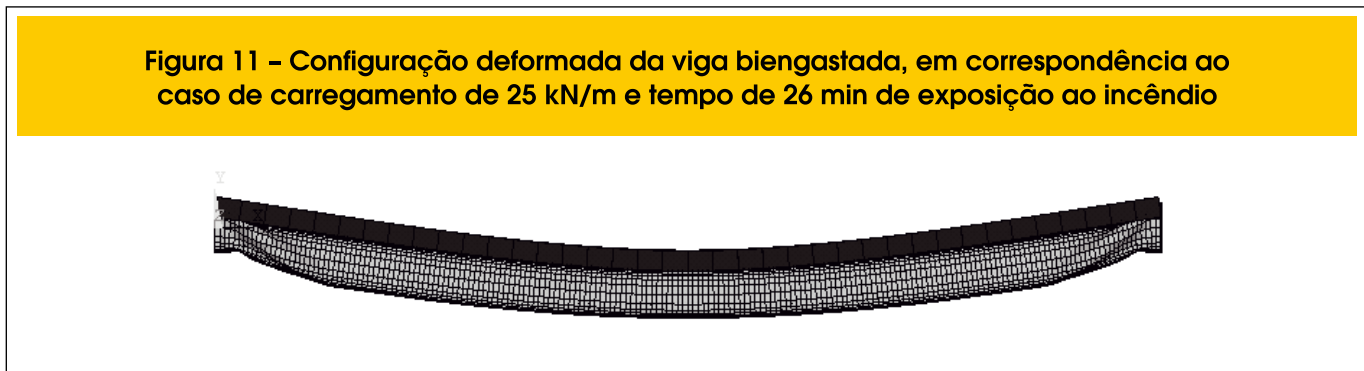


tivas e critérios de ruptura não responderam adequadamente à compatibilização de deslocamentos para elementos do tipo sólido, razão pela qual, para a laje de concreto, adotou-se elementos do tipo casca, os quais possuem funções de forma mais adequadas para elementos fletidos. Nesse caso, por hipótese, a temperatura na laje foi adotada constante (média) ao longo da espessura e variável com o tempo.

O perfil metálico foi modelado utilizando-se o elemento SOLID45, cujos graus de liberdade em cada nó correspondem às translações nas direções x, y e z.

A laje de concreto foi modelada utilizando-se o elemento

SHELL181, cujos graus de liberdade em cada nó correspondem às translações e rotações nas direções x, y e z. A análise estru-



tural foi realizada aplicando-se carregamento uniformemente distribuído sobre a viga. A figura 6 apresenta uma visão geral do modelo de elementos finitos gerado no programa ANSYS. A figura 7 apresenta uma vista lateral e outra superior do modelo, permitindo uma 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.

As condições de vinculação das extremidades da viga mista de aço e concreto no modelo numérico são apresentadas na figura 8. Na figura 8a têm-se a vinculação correspondente à condição 1, de engastamento fixo em ambas as extremidades. Na figura 8b têm-se a vinculação correspondente à condição 2, de apoio fixo em ambas as extremidades. Para a condição 2, figura 8b, 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.

7. Resultados e discussões

Inicialmente apresentam-se os resultados obtidos para a viga em temperatura ambiente. Na figura 9 têm-se os deslocamentos no meio do vão em função do carregamento para a condição de extremidades engastadas e condição de apoio fixo, figuras 9a e 9b respectivamente. A influência do deslocamento da viga na parede que a protege termicamente em sua face inferior, somente poderá ser avaliada com precisão em análise experimental, que se pretende realizar no futuro. Neste trabalho, admitiu-se que a proteção se mantém em incêndio.

Na análise da figura 9b (modelo biapoiado) verifica-se a influência significativa da laje na obtenção do carregamento de colapso do elemento; a tendência assintótica das curvas de carregamento vs. deslocamento no meio do vão conduz a um aumento de cerca de 100% no carregamento último. Um ganho menor (cerca de 20 a 30%) ocorre para o modelo biengastado, já que nas regiões de momento máximo (próximo dos engastes) 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.

Na figura 10, têm-se os deslocamentos obtidos para as vigas biengastada e biapoiada considerando-se um determinado nível de carregamento e o tempo de exposição do elemento ao aquecimento determinado pela curva de incêndio-padrão ISO 834.

Por meio de análise da figura 10, pode-se notar que, em geral, os deslocamentos da viga biengastada resultam menores se comparados àqueles obtidos para a viga biapoiada para baixos tempos (baixas temperaturas). Em seguida, os deslocamentos passam a ser superiores para voltar a serem inferiores quando se aproxima o colapso (em caráter numérico) da viga biapoiada. 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 biapoiada, 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 biapoiada, 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. As considerações aqui apresentadas, referentes à figura 10, podem ser encaradas como formas de sinalização de resultados, em vista do ineditismo deste trabalho e de seu caráter ainda exploratório. Futuras análises, inclusive experimentais, devem contribuir para avaliar essas considerações.

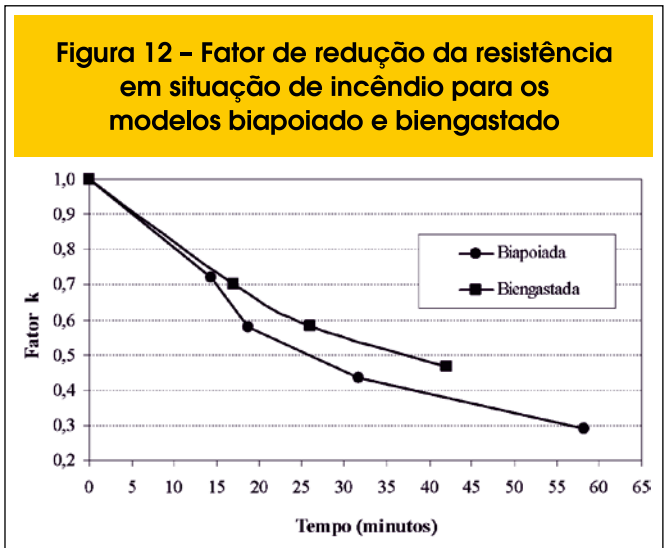
A título de ilustração, a figura 11 apresenta a configuração deformada do modelo biengastado para o caso de carregamento de 25 kN/m e para o tempo de 26 min (tempo de colapso). O deslocamento no meio do vão é de aproximadamente 20 cm.

Tomando-se o carregamento último igual àquele que provoca uma tendência “assintótica” na curva *Tempo vs Deslocamento*, para um determinado carregamento, pode-se, ainda que em caráter preliminar, determinar um fator de redução da resistência do elemento em situação de incêndio. Esse fator, denominado fator k, resulta da relação entre o carregamento máximo em situação de incêndio e à temperatura ambiente (eq. 2).

$$k = \frac{p_{Sk,fi}}{p_{Sk}} \tag{2}$$

Na a equação (2), $p_{Sk,fi}$ é o valor característico do carregamento máximo aplicável em situação de incêndio e p_{Sk} é o valor característico do carregamento máximo aplicável à temperatura ambiente (kN/m). Na figura 12 são apresentados os fatores de redução obtidos para os modelos biengastado e biapoiado.

Por meio de análise da figura 12, nota-se que o modelo de viga mista biapoiada apresenta fatores de redução mais severos que aqueles obtidos para a viga do modelo 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.

8. Conclusões

Neste trabalho foi abordada a influência da condição de vinculação de um sistema composto por viga mista de aço e concreto, em situação de incêndio, em que se considera um perfil de aço formado a frio, com seção transversal tipo caixão, sobre alvenaria.

Para as análises das vigas em temperatura ambiente, verifica-se a influência significativa da laje na obtenção do carregamento de colapso do modelo biapoiado. Um menor ganho ocorre para o modelo biengastado, já que nas regiões de momento máximo (próximo dos engastes) o concreto se encontra tracionado e, por isso, contribui menos para a resistência da viga mista.

O ponto de aplicação da resultante de reação horizontal no apoio, no modelo biengastado, varia ao longo da altura da viga em função do gradiente térmico.

Com a estratégia de modelagem adotada, constatou-se para um mesmo nível de carregamento que o tempo de colapso obtido para o modelo biengastado foi maior do que o obtido para o modelo biapoiado. Em vista de que essa constatação depende fortemente do modelo empregado para a ligação, existe a necessidade de se estudar novos modelos e, quando viável, analisá-los experimentalmente.

Em vista da dificuldade de modelagem de forma realística do concreto em situação de incêndio, objetivo ainda não alcançado em nível internacional, neste artigo, impuseram-se diversas hipóteses simplificadoras para o concreto. Em trabalhos a serem elaborados a seguir, pretende-se incluir a presença da armadura negativa, considerar o efeito de membrana, fissuração, entre outros.

9. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à Cosipa, ao CBCA e à FAPESP, pelo apoio à pesquisa.

10. Referências bibliográficas

- [01] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimento. NBR 14323, Rio de Janeiro, 2000.
- [02] BUCHANAN, A., MOSS P., SEPUTRO J., WELSH R., The effect of stress-strain relationships on the fire performance of steel beams. *Engineering Structures*. V. 26. p. 1505-1515. 2004.
- [03] MOURÃO, Hellen Reis, SILVA, Valdir Pignatta. On the behaviour of single-span steel beams under uniform heating. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. , v.29, p.115 - 122, 2007.
- [04] REGOBELLO, R. MUNAIAR NETO, J. , SILVA, Valdir Pignatta. Análise termestrutural de vigas biengastadas constituídas por perfis formados a frio em situação de incêndio. XXVIII CILAMCE - Congresso Ibero-latino Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia. Porto, Portugal, 2007.
- [05] REGOBELLO, R. MUNAIAR NETO, J. , MALITE, M. , SILVA, Valdir Pignatta. Análise numérica de vigas mistas de concreto e perfis formados a frio em situação de incêndio. 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves, Brasil, 2007.
- [06] KHOURI, G. A. Fire and concrete: from materials behaviour to application. *International Workshop Fire Design of Concrete Structures*. Fib/University of Coimbra. Coimbra. 2007.
- [07] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.2: General Rules – Structural Fire Design. EN 1992-1-2, Brussels, 2004.
- [08] UNIVERSITÉ DE LIÈGE, DÉPARTEMENT M&S. Ozone V2.0: The design fire tool OZone V2.0 – Theoretical description and validation on experimental fire tests. Liège, 2001.
- [09] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design. EN 1993-1-2 , Brussels, 2005.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado - Procedimento. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2000.