

## NUMERICAL ANALYSIS OF PARTIALLY ENCASED STEEL AND CONCRETE COMPOSITE BEAMS IN FIRE USING THE FINITE ELEMENT METHOD

**José Victor Villela Carlos Pinto**

**Prof. Fabio Martin Rocha**

*j.victor.camera@gmail.com*

*fabio.rocha@ufim.edu.com*

*Dept. of Civil Engineering, Universidade Federal do Triângulo Mineiro*

*Avenida Doutor Randolpho Borges Júnior, 1400, 38064200, Uberaba – MG, Brasil*

**Prof. Jorge Munaiar Neto**

*jmunaiar@sc.usp.br*

*Dept. of Engineering Structures, University of São Paulo*

*Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, 13566590, São Carlos –SP, Brasil*

**Abstract.** It is known that unprotected steel elements perform poorly when exposed to high temperatures. However, when the concrete is associated with steel elements, there is a gain in both the structural and thermal aspects. Thus, in this paper, the numerical results of the thermal elevation - obtained by the finite element method - are compared with the experimental results described in Felício [1] for partially encased composite beams in a fire. For this, a transient analysis was used to determine the thermal gradient in the studied sections in order to obtain results closer to those observed in the reference tests. The numerical results showed good approximation, accurately representing the experimental model. From that point on, new analysis were carried out in order to compare the numerical results with those obtained by national normative codes. It was verified that the normative methods are not able to predict with precision the elevation of temperature in partially encased steel and concrete composite sections, being necessary to use alternative methods found in the literature.

**Keywords:** finite element method, partially encased composite beams, transient analysis, thermal gradient.

## 1 Introdução

O incêndio é um fenômeno que, quando não controlado, pode causar grandes perdas, tanto no que diz respeito ao patrimônio, quanto à vida. Segundo Wang [2], sabe-se que as medidas de combate e prevenção ao incêndio estão evoluindo a cada ano, já que as grandes perdas ao longo da história com esse fenômeno geram discussões recorrentes.

No que diz respeito à segurança das estruturas em situação de incêndio, os elementos de aço são particularmente afetados quando em altas temperaturas. Isso acontece devido ao aço ser um excelente condutor de calor e as seções metálicas serem usualmente bastante delgadas. Tais características em uma seção exposta ao fogo levam a um acelerado aumento da temperatura, resultando na rápida degradação de suas propriedades mecânicas.

Uma das formas para aprimorar a resistência ao fogo de vigas metálicas é o seu revestimento, que pode ser de materiais isolantes específicos para este fim. Porém, no caso específico do revestimento de concreto em perfis metálicos, nota-se que o concreto é uma boa opção para garantir o aumento da resistência dos elementos estruturais tanto em temperaturas ambientes quanto em situações de incêndio. Devido à baixa condutividade térmica do concreto, em relação ao aço, e por tornar os elementos estruturais mais espessos, as estruturas mistas de aço e concreto necessitam de um tempo maior para se aquecerem em detrimento das estruturas formadas por perfis puramente metálicos. Ou seja, no caso de um revestimento parcial entre as mesas do perfil, como mostrado na Fig. 1, o concreto atua como uma camada protetora envolvendo a alma do perfil, desacelerando o aumento de temperatura e, conseqüentemente, aumentando o tempo de resistência ao fogo.

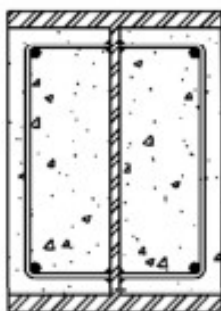


Figura 1. Exemplo de um perfil misto parcialmente revestido. Fonte: Fabrizzi [3]

No Brasil, o assunto é tratado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da Norma Brasileira (NBR) 14323 [4] onde segue basicamente os preceitos das normas europeias EUROCODE 3 e 4 Parte 1-2 [5,6]. A ABNT NBR 14323 [4] é a norma brasileira que especifica projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Porém, ela apenas apresenta método para cálculo da temperatura em perfis puramente metálicos. Enquanto que no caso de perfis mistos de aço e concreto com revestimento parcial, essa variação de temperatura não pode ser calculada explicitamente.

As normas europeias supracitadas, especificamente no Anexo F do EUROCODE 4 [6], possui um método capaz de relacionar o tempo de exposição ao fogo de perfis mistos de aço e concreto parcialmente revestidos com a sua capacidade resistente. Porém, não é explicitado um método para o cálculo da temperatura de diferentes partes do perfil misto em função do tempo.

Em Regobello [7], afirma-se que os resultados obtidos pelas prescrições normativas levam, na maioria dos casos, a projetos inflexíveis e antieconômicos, por conduzirem a resultados conservadores. Portanto, o avanço ocorrido em âmbito global, no que diz respeito ao entendimento de estruturas submetidas a altas temperaturas, vem estimulando os estudos referentes ao desempenho de estruturas em situação de incêndio.

Os métodos numéricos são uma boa solução para obtenção desses resultados, mas é importante

ressaltar que não são de fácil uso no meio técnico. Portanto o método simplificado de cálculo é válido, quando devidamente validado por resultados numéricos e experimentais. Todavia os ensaios experimentais são caros e necessitam de equipamentos específicos. Sendo essa mais uma justificativa para o uso de modelos numéricos.

Tendo em vista os tópicos discutidos, o presente trabalho consta do desenvolvimento de um modelo numérico térmico para uma viga puramente metálica e outra mista de aço e concreto parcialmente revestida, validado por meio de resultados experimentais de Felício [1] e Piloto *et al.* [8]. A partir do modelo validado, foram desenvolvidas novas análises numéricas em seções mistas parcialmente revestidas e puramente metálicas. Com esses novos modelos, foram verificadas as prescrições normativas da ABNT NBR 14323 [4] e no EUROCODE 4 [6], comparando as temperaturas teóricas e numéricas para os casos metálicos e misto.

## 2 Modelo experimental de referência

Para desenvolver uma modelagem numérica consistente, é importante que o modelo numérico esteja validado a partir de um estudo experimental de referência, com características similares àquelas que se quer modelar. Para a validação do resultado numérico aqui apresentado, utilizaram-se os resultados experimentais descritos em Piloto *et al.* [8], realizados no Instituto Politécnico de Bragança, e os resultados experimentais descritos em Felício [1], realizados no Laboratório de Engenharia de Estruturas da EESC/USP.

O programa experimental realizado por Piloto *et al.* [8] consistiu em realizar ensaios de vigas mistas de aço e concreto parcialmente revestidas com o concreto entre as mesas do perfil metálico, sendo escolhido para o ensaio o perfil laminado IPE 100, como apresentado na Fig. 2. Esse ensaio permitiu analisar diretamente a influência do concreto entre as mesas no comportamento termomecânico do elemento, quando comparado uma viga metálica sujeita a flexão.

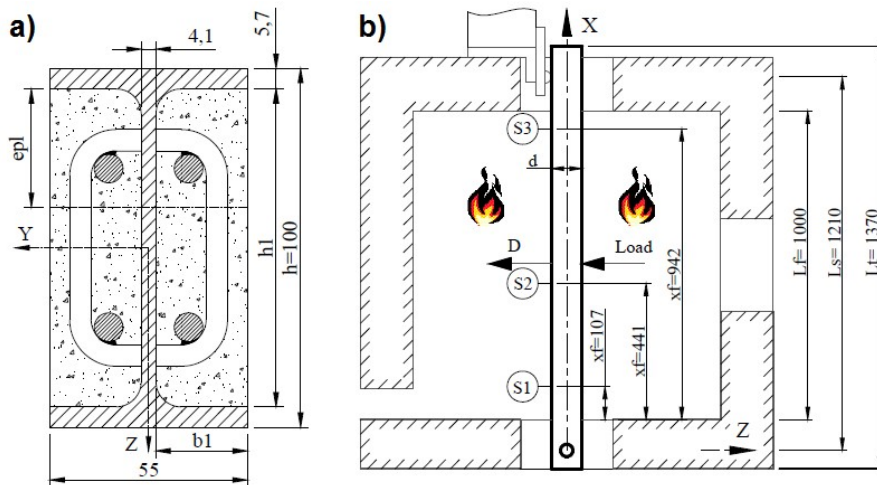


Figura 2. Seção e esquema utilizado no ensaio em Piloto *et al.* [8]. Fonte: Piloto *et al.* [8]

O ensaio apresentado em Piloto *et al.* [8] foi feito com um perfil de dimensões reduzidas e em posição vertical, com o carregamento sendo aplicado horizontalmente. O aquecimento nesse caso foi nas quatro faces do perfil. O ensaio foi realizado por 30 minutos, quando se observou a falha por deslocamentos excessivos.

Outro estudo experimental de referência é o apresentado em Felício [1], onde o programa experimental consistiu do ensaio de 6 vigas, sendo 3 vigas de aço e as outras 3 vigas mistas de aço e concreto. Vale ressaltar que o estudo numérico desenvolvido no presente trabalho baseou-se nos resultados de um dos ensaios de vigas puramente metálicas e em um dos ensaios de vigas mistas de aço e concreto, ambos os casos em situação de incêndio.

Destacando as vigas utilizadas no ensaio experimental, todas as vigas ensaiadas apresentavam 6000 mm de comprimento e 5100 mm de vão, sendo o perfil laminado escolhido para o ensaio o W 250 x 32,7. Os ensaios foram distribuídos em duas etapas, primeiramente realizou o ensaio de vigas submetidas à temperatura ambiente e posteriormente ensaios à temperatura elevada. A Fig. 3a e 3b representam as características das seções e o equipamento utilizado no ensaio, respectivamente.

A primeira etapa consistiu em determinar a capacidade de carga do elemento estrutural à temperatura ambiente, além da caracterização dos materiais em estudo, no caso o aço e o concreto. Vale ressaltar que para o desenvolvimento do modelo numérico a primeira etapa não foi utilizada.

Para a segunda etapa, o ensaio em temperatura elevada foi possível, devido ao forno utilizado para simular a elevação térmica dos gases em situação de incêndio. O forno em questão possui o seu funcionamento a gás e pode atingir uma temperatura máxima de 1260°C. Outro ponto importante a ser destacado é que o aquecimento dos gases acontece de forma controlada, ou seja, estabeleceu-se a curva padronizada prevista pela ISO 834 [9], denominada como curva de incêndio padrão.

A Eq. 1 é a responsável por descrever a curva do incêndio padrão descrita anteriormente, prescrita pela ISO 834 [9].

$$T = 345 \cdot \log(8t + 1) + 20. \quad (1)$$

Onde T indica a temperatura média do forno (°C) e t o tempo em minutos.

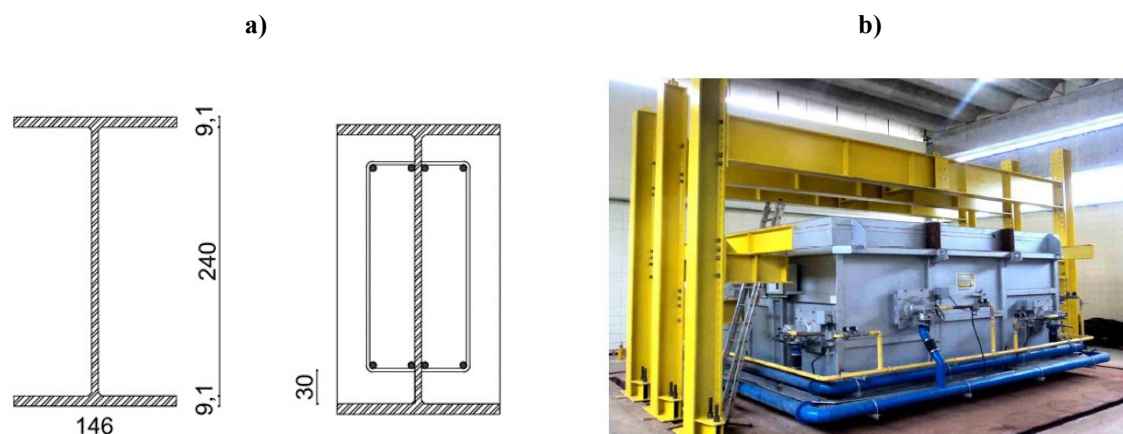


Figura 3. a) Características da geometria das seções das vigas analisadas; b) Sistema de ensaio. Fonte: Felício [1].

Para a realização da segunda etapa, foram realizadas medidas de algumas grandezas básicas ao longo do ensaio, como a temperatura em diversos pontos de seções das vigas, os deslocamentos em pontos de interesse e a força aplicada ao longo do ensaio, sendo a avaliação da elevação da temperatura em diversos pontos de seções das vigas, o enfoque para a validação do modelo numérico.

O perfil é exposto ao incêndio por todos os lados, exceto a face superior, que foi revestida com uma manta cerâmica para o isolamento térmico e para proteção dos equipamentos responsáveis por colher os resultados da elevação térmica (termopares).

Algumas recomendações são indicadas pela ISO 834 [9] a respeito dos critérios de parada. Sendo estes o deslocamento limite e a taxa de deslocamento limite. O ensaio da viga puramente metálica teve uma duração de aproximadamente 7 minutos de aquecimento, onde foi observado um deslocamento na ordem de 92 mm no centro do vão e uma excessiva rotação nos apoios. Já o ensaio com as vigas mistas de aço e concreto teve duração de aproximadamente 30 minutos de elevação térmica. Vale ressaltar que nos ensaios em temperatura elevada, foi considerada a aplicação de uma carga equivalente a 30% da capacidade resistente à temperatura ambiente.

As Fig. 4a e 4b trazem uma representação do esquema da seção transversal da viga puramente metálica e da viga mista de aço e concreto. Nela estão indicados os pontos onde foram colocados os

termopares ao longo da seção nos ensaios experimentais, sendo eles os responsáveis pela leitura das temperaturas. Neles estão representados a terminologia TX.Y, onde o X indica a seção da viga ao longo de todo o seu comprimento, enquanto o Y indica a numeração do termopar.

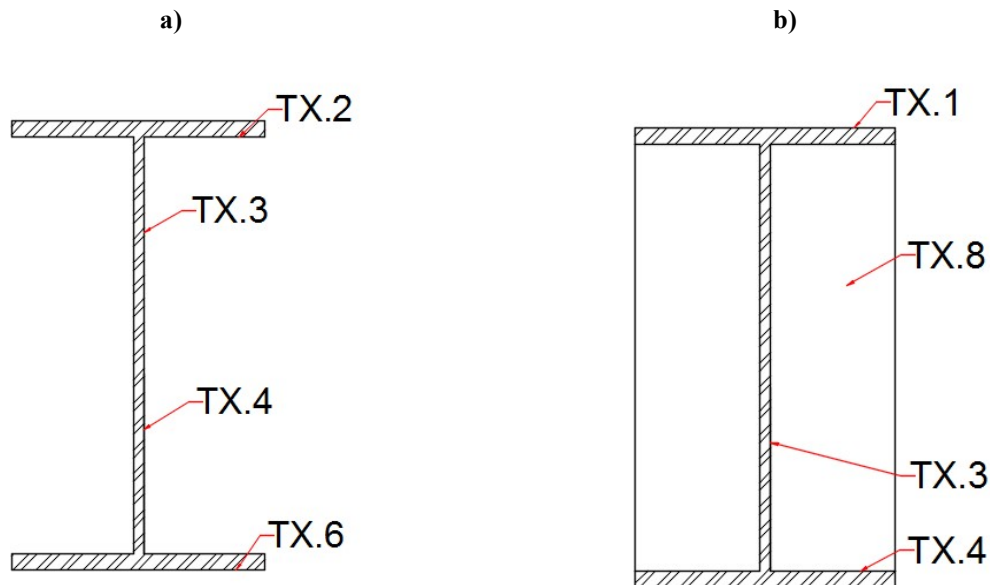


Figura 4. Instrumentação do ensaio experimental a) Viga puramente metálica; b) viga mista de aço e concreto parcialmente revestido

As temperaturas foram mensuradas em três seções, conforme apresentado na Fig. 5. A apresentação dos resultados e a validação numérica do modelo proposto serão feitas tomando como referência a seção 1 para o perfil metálico e a seção 2 para o perfil misto de aço e concreto, como apresentado na figura 5, devido à boa leitura da elevação térmica feita pelos termopares nestas seções.



Figura 5. Seção de análises das vigas. Fonte: Felício [1]

### 3 Detalhamento do Modelo Numérico Proposto

#### 3.1 Características Gerais

As análises apresentadas no presente trabalho foram realizadas por meio do pacote computacional ANSYS, o qual disponibiliza em sua biblioteca uma série de ferramentas possibilitando a análise de problemas de diversas áreas da engenharia. No caso específico do trabalho aqui apresentado, foi utilizado o ANSYS para determinar os campos térmicos de perfis submetidos à ação do fogo.

A Fig. 6 define a notação empregada no que se refere às características geométricas dos perfis estudados no presente trabalho. Na Tabela 1, apresentam-se as dimensões referentes a cada perfil estudado. Vale ressaltar que os perfis IPE 100 e W 250 x 32,7 foram utilizados para a validação do modelo, enquanto que os perfis W 310 x 44,5 e W 360 x 64 foram utilizados como seções adicionais

para a comparação dos métodos normativos.

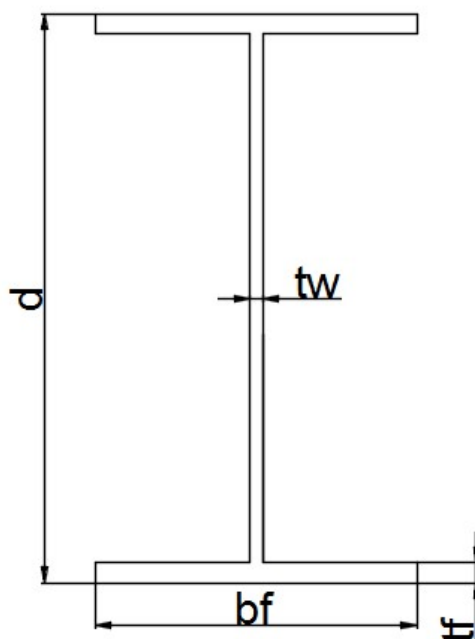


Figura 6. Notação empregada para descrever a geometria dos modelos utilizados

Tabela 1. Dimensões dos perfis. Fonte: Gerdau [10] (Adaptado).

|                     | <b>Massa Linear<br/>(kg/m)</b> | <b>d<br/>(mm)</b> | <b>bf<br/>(mm)</b> | <b>tw<br/>(mm)</b> | <b>tf<br/>(mm)</b> |
|---------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>W 250 x 32,7</b> | 32,7                           | 258               | 146                | 6,1                | 9,1                |
| <b>W 310 x 44,5</b> | 44,5                           | 313               | 166                | 6,6                | 11,2               |
| <b>W 360 x 64,0</b> | 64,0                           | 347               | 203                | 7,7                | 13,5               |
| <b>IPE 100</b>      | 8,1                            | 100               | 55                 | 4,1                | 5,7                |

A necessidade do entendimento dos mecanismos de transferência de calor dos gases para elementos estruturais, quando imersos em um ambiente em situação de incêndio se deve ao fato do aumento da temperatura desses mesmos elementos, provocarem perdas quanto às propriedades mecânicas do material, como a própria resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade, levando a diminuições em suas capacidades resistivas.

O ANSYS permite executar o modelo numérico desenvolvido através da análise térmica transiente. Ou seja, é possível determinar a temperatura e outras grandezas térmicas em função do tempo.

A base para análise térmica realizada pelo ANSYS é a equação diferencial do balanço de energia em um volume de controle. A solução pelo Método dos Elementos Finitos permite calcular as temperaturas em cada nó, ou seja, utilizar as temperaturas nodais para obter o gradiente térmico do elemento de interesse.

O ANSYS possibilita considerar as três formas básicas de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Como descrito em Regobello [7], o problema envolvendo a condução de calor, tem o seu início através da troca de calor entre o ambiente em incêndio e a estrutura, pelo processo de radiação e convecção. Para solucionar o problema de condução, deve fornecer ao ANSYS algumas propriedades físicas, sendo elas: a densidade, a condutividade térmica e o calor específico.

Como citado em Kimura [11], o problema relacionado à convecção é trabalhado através da transferência de calor devido à aplicação da superfície de convecção em relação a maior parte da temperatura do fluido incidente na superfície do elemento.

Por fim, para o problema de radiação, utilizou-se elemento de superfície (SURF 152) que

sobrepõem o elemento sólido (SOLID 70), que são capazes tanto em emitir quanto receber a radiação entre uma superfície e um ponto.

A seguir serão apresentados os parâmetros utilizados para o desenvolvimento do modelo, assim como demais considerações que sejam pertinentes ao processo de modelagem.

### 3.2 Elementos Finitos

Visando a elaboração dos métodos avançados de cálculos, utilizou-se da análise térmica tridimensional transiente, para tanto, foi necessário o uso de dois tipos de elementos finitos: o primeiro foi o elemento SOLID 70, elemento tridimensional, capaz de se adequar a malhas regulares e retilíneas, já o segundo elemento utilizado foi o SURF 152, esse elemento tem a capacidade de sobrepor aos elementos tridimensionais (no caso do presente trabalho, o SOLID 70), além de permitir o efeito da radiação entre uma superfície e o nó extra.

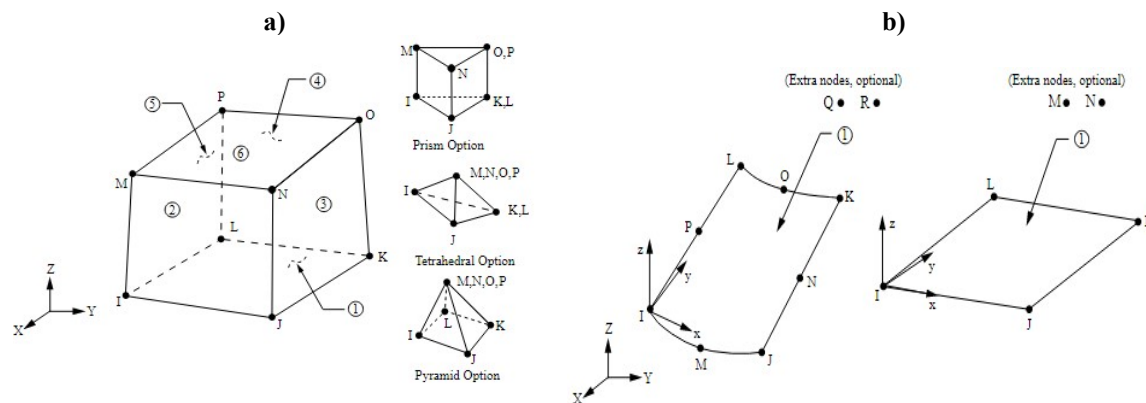


Figura 7. (a) Elemento Finito SOLID 70 e (b) Elemento Finito SURF 152. Fonte: ANSYS Inc. [12]

Para aplicação dos efeitos térmicos, o elemento SURF 152 é utilizado com a sua opção de nó extra. Aplicando a temperatura diretamente no nó extra, é possível representar a elevação da temperatura em relação ao tempo, assim como acontece em um incêndio.

A malha de elementos finitos considerada no ANSYS do modelo numérico desenvolvido, tanto para o perfil puramente metálico, quanto para o perfil misto de aço e concreto parcialmente revestido, estão sendo indicadas nas Fig. 8 e 9, respectivamente. Vale ressaltar que para as regiões de intersecção entre a alma e o perfil, percebeu-se a necessidade de um melhor detalhamento da malha, promovendo uma maior divisão dos elementos e consequentemente uma melhor adequação da malha para o problema de estudo.

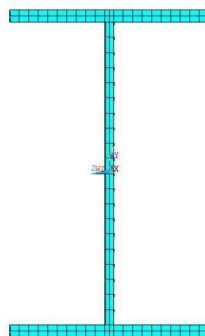


Figura 8. Malha de elementos finitos do perfil puramente metálico W 250 x 32,7

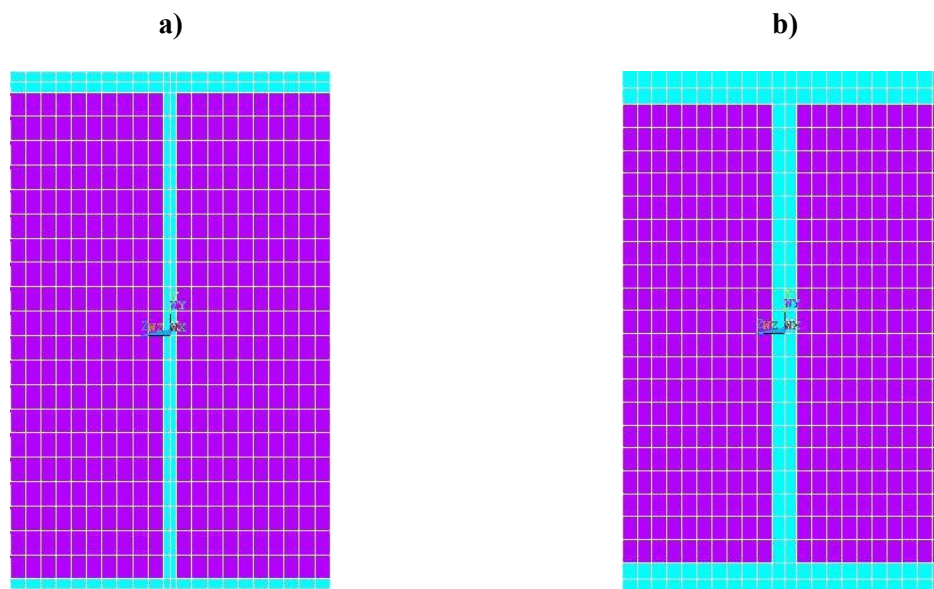


Figura 9. Malha de elementos finitos do perfil misto de aço e concreto parcialmente revestido: a) Seção W 250 x 32,7 e b) Seção IPE 100

### 3.3 Propriedades dos Materiais

Os dados de entrada referentes às propriedades térmicas e aos mecanismos de transferência de calor são comuns para todas as modelagens realizadas no presente trabalho, com exceção da própria geometria do perfil em questão. Tais parâmetros, estão de acordo com aqueles descritos nos códigos normativos, sendo eles o EUROCODE 2 [13], o EUROCODE 3 [5] e a ABNT NBR 14323 [4].

Para a massa específica do aço adotou-se o valor de  $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$  e para a massa específica do concreto adotou-se o valor de  $\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ . O coeficiente de transferência de calor por convecção adotado foi de  $25 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , para as faces expostas ao fogo. Para a emissividade resultante o valor estabelecido foi de 0,5 (ABNT NBR 14323 [4]), tanto para o aço quanto para o concreto. A condutividade térmica e o calor específico adotado para o aço são aqueles descritos na ABNT NBR 14323 [4], já para o concreto a condutividade térmica e o calor específico adotou-se aqueles que estão descritos no EUROCODE 2 [13].

Por fim, para os efeitos de radiação térmica é necessário informar ao ANSYS a constante de *Stefan-Boltzmann* ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ), o fluxo de calor devido à radiação e o fator de configuração, neste caso podendo adotar o valor da unidade para o fator de configuração. Vale ressaltar que houve a correção de unidade de temperatura, indicando a diferença entre o zero da escala Celsius e o zero absoluto da escala Kelvin.

## 4 Resultados e Discussões

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio de análises numéricas desenvolvidas através do software ANSYS, referentes ao gradiente térmico de elementos estruturais puramente metálicos e de elementos estruturais mistos de aço e concreto parcialmente revestidos, quando submetidos às condições de incêndio.

Tendo em vista a estratégia de modelagem, abordada nos itens anteriores, o modelo numérico desenvolvido para as vigas de aço e para as vigas mistas de aço e concreto foram validados por meio da comparação com os resultados experimentais encontrados nos trabalhos de Felício [1] e Piloto *et al.* [8].

Posteriormente, compararam-se os resultados numéricos validados com os métodos simplificados de cálculos prescritos pela ABNT NBR 14323 [4] e o EUROCODE 4 [6].

#### 4.1 Validação dos Resultados Numéricos frente ao Experimental

O processo de validação dos resultados numéricos, por meio de comparação com os resultados experimentais apresentados em Felício [1] e Piloto *et al.* [8], foi dividido em duas etapas, sendo a primeira a comparação com os resultados experimentais de Felício [1] da elevação térmica para o perfil puramente metálico e a segunda, a comparação com os resultados experimentais de Felício [1] e Piloto *et al.* [8] da elevação térmica para os perfis mistos de aço e concreto parcialmente revestidos.

Iniciando com os resultados da análise térmica do perfil puramente metálico, na Fig. 10 é apresentada a variação de temperatura, obtidas numérica e experimentalmente, na seção perto do apoio da viga ensaiada, já a Fig. 11 apresenta o campo térmico para aproximadamente 7 minutos de exposição ao incêndio obtido via ANSYS.

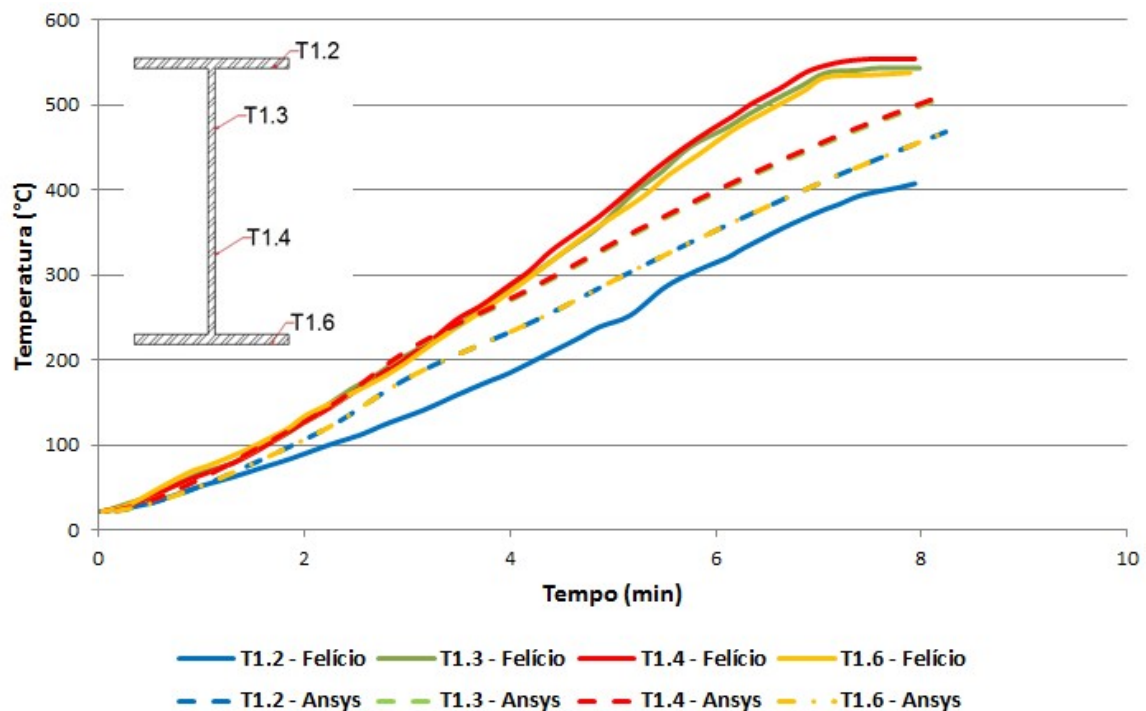


Figura 10. Curva evolução temperatura versus tempo obtida via ANSYS para o perfil W 250 x 32,7, puramente metálico e os resultados obtidos experimentalmente

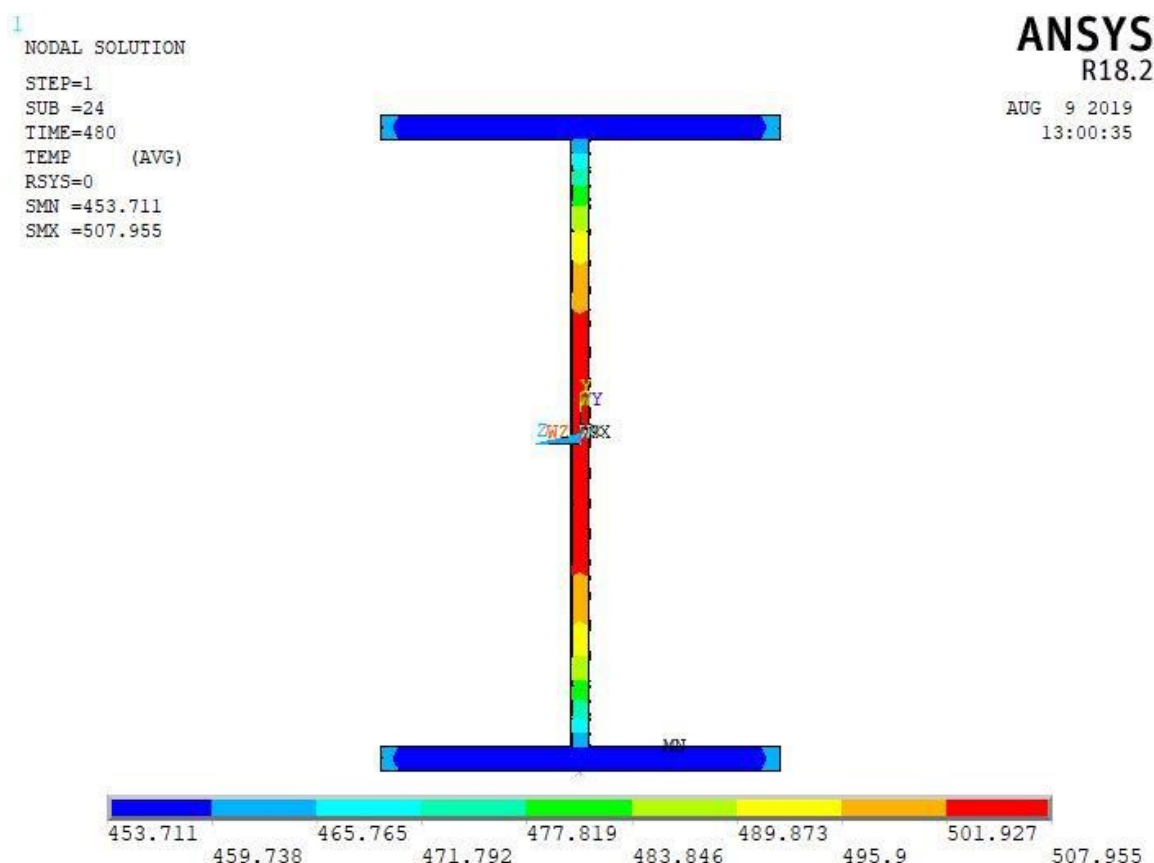


Figura 11. Campo térmico, em °C, obtido por meio das simulações para o perfil W 250 x 32,7 para o tempo de 7 minutos

Para o caso da viga puramente metálica, apenas quatro pontos foram utilizados para a validação, sendo uma para a mesa superior (T1.2), outro para a mesa inferior (T1.6) e outros dois para a alma (T1.3 e T1.4). Como observado, a temperatura na seção é praticamente uniforme, há apenas uma diferença de temperatura entre a alma e as mesas, onde a alma possui temperaturas mais elevadas devido a possuir a maior área de troca de calor e devido a sua maior esbeltez. Nota-se também que as temperaturas calculadas numericamente apresentam boas aproximações das medidas experimentais.

Para o caso da viga mista de aço e concreto parcialmente revestida, nas Fig. 12 e 13 são apresentadas as variações de temperatura, também obtidas de forma numérica e experimentalmente, sendo que na Fig. 12 a comparação do modelo numérico é feito em relação aos resultados obtidos na seção 2 da viga ensaiada que se encontra a 2550 mm do apoio, como descrito no trabalho de Felício [1]. Já na Fig. 13 são apresentadas as comparações da elevação térmica do modelo numérico em relação aos resultados experimentais obtidos na seção S2, localizada no meio do vão da viga ensaiada no trabalho de Piloto *et al.* [8].

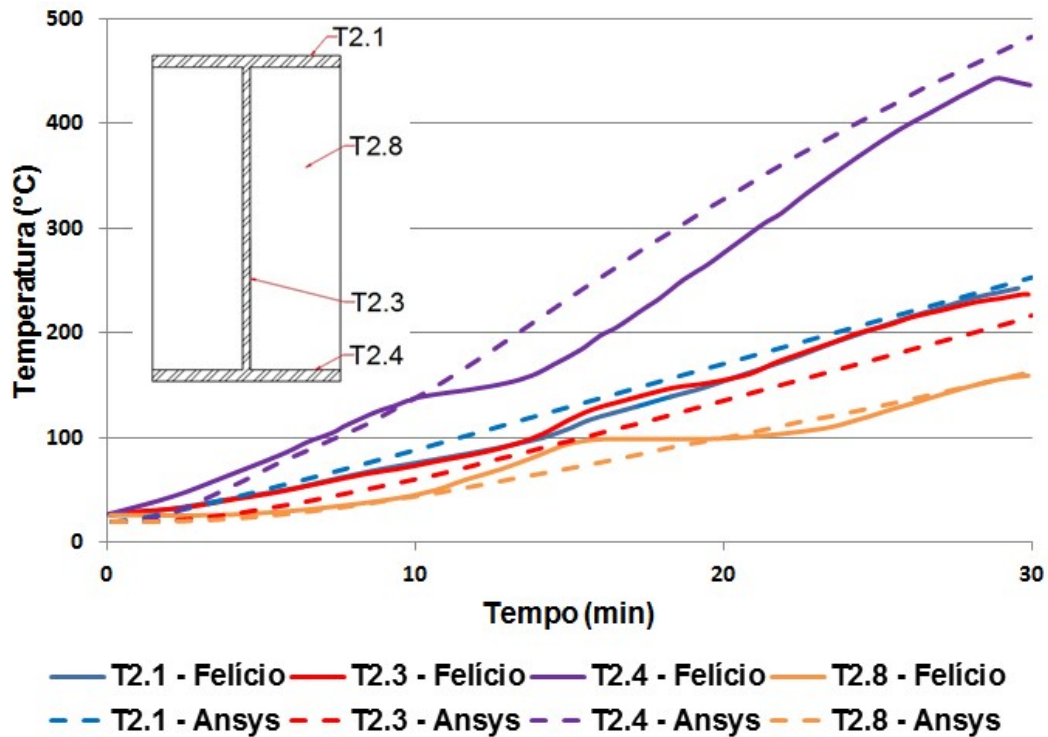


Figura 12. Curva evolução temperatura versus tempo obtida via ANSYS para o perfil misto de aço e concreto parcialmente revestido e os resultados obtidos experimentalmente para o perfil W 250 x 32,7

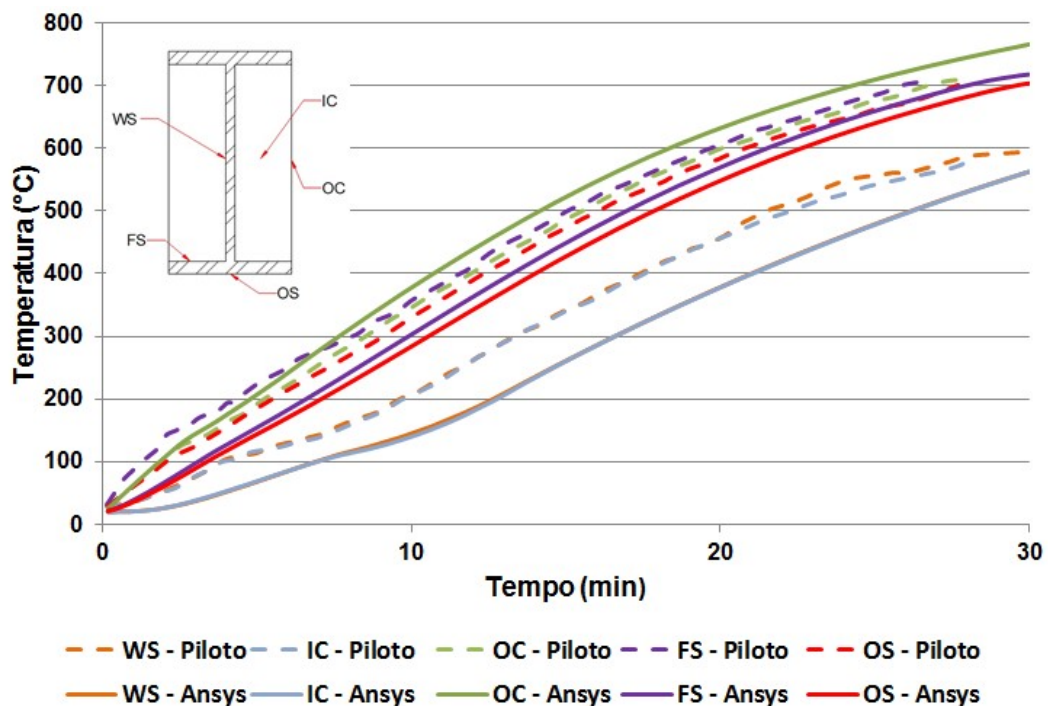


Figura 13. Curva evolução temperatura versus tempo obtida via ANSYS para o perfil misto de aço e concreto parcialmente revestido e os resultados obtidos experimentalmente para o perfil IPE 100

Em seguida as Fig. 14 e 15 apresentam o campo térmico do perfil W 250 x 32,7 e do perfil IPE 100, após 30 minutos submetidos às condições de incêndio.

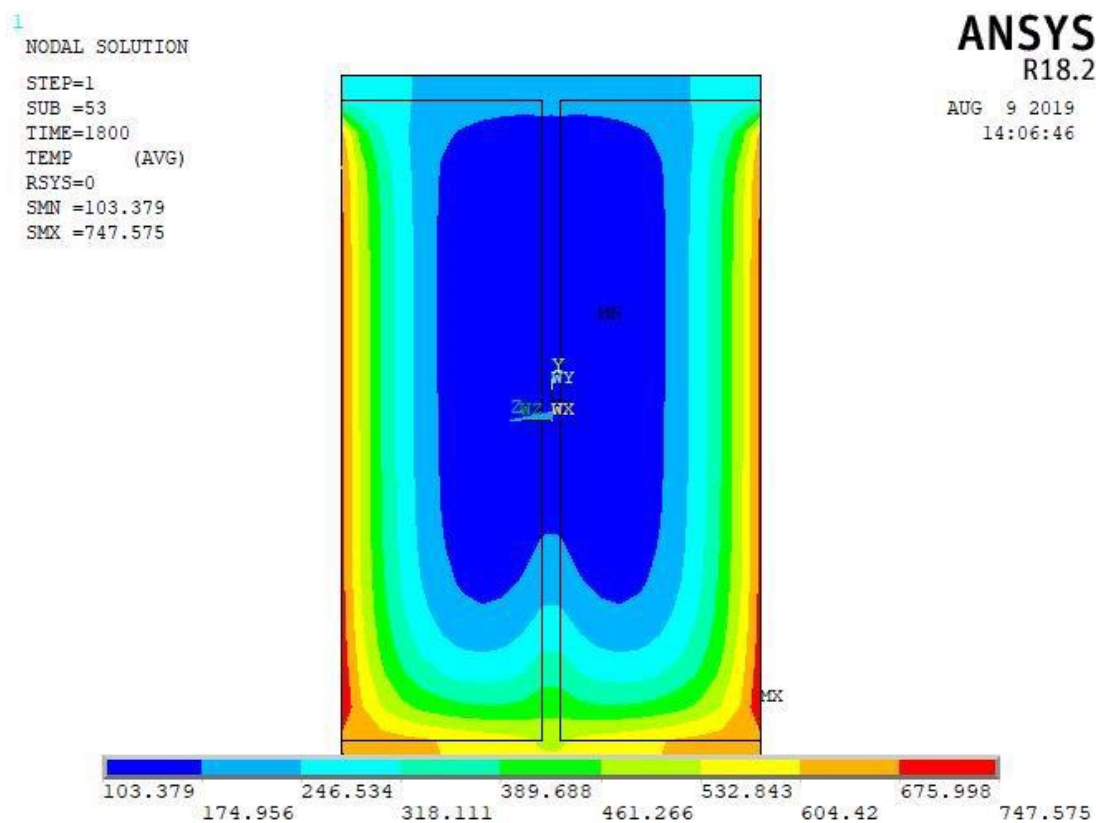


Figura 14. Campo térmico, em °C, obtido por meio das simulações para o perfil W 250 x 32,7 para o tempo de 30 minutos

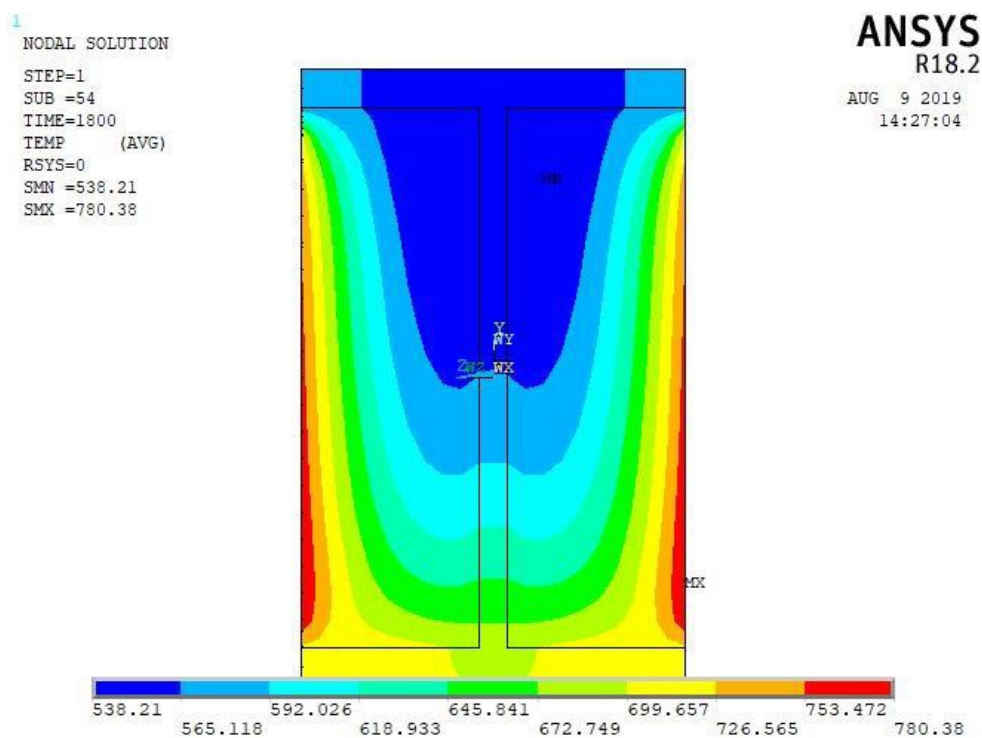


Figura 15. Campo térmico, em °C, obtido por meio das simulações para o perfil IPE 100 para o tempo de 30 minutos

No caso do perfil W 250 x 32,7, misto de aço e concreto parcialmente revestido para comparação com o ensaio experimental de Felício [1], considerou-se 4 pontos de leitura utilizados para a validação, sendo um para a alma (T2.3), outros dois para as mesas (T2.1 e T2.4) e um outro para a região do concreto (T2.8).

Analisando os valores encontrados, verifica-se que a mesa inferior foi a região que maior houve exposição ao incêndio, consequentemente, foi a quem mais sofreu com a elevação térmica, apresentando temperaturas na casa dos 450°C para o tempo de exposição ao incêndio de 30 minutos. Para a região da mesa superior e a alma, finalizaram o ensaio com temperaturas mais baixas, na casa dos 200°C, ou seja, sem sofrer deterioração das propriedades mecânicas. Por fim, a temperatura no concreto ficou próxima dos 150°C.

Já analisando o perfil IPE 100, misto de aço e concreto parcialmente revestido para a comparação com o ensaio experimental de Piloto *et al.* [8], considerou-se 5 pontos de leitura utilizados para posterior validação, sendo um para a alma (WS), outros dois para a mesa inferior (FS e OS) e dois pontos para o concreto (IC e OC).

A partir da análise dos valores encontrados, verifica-se que por ser um perfil com dimensões menores do que aquele avaliado anteriormente, os valores de temperatura são mais elevados. A região da mesa inferior apresentou as maiores temperaturas, de 650°C a 750°C. Já no ponto de medição da temperatura na alma (WS) e no concreto (IC), apresentaram elevações térmicas muito semelhantes, ficando próximo dos 600°C ao final do ensaio.

Logo, os resultados apresentados comprovam um efeito benéfico do revestimento de concreto ao perfil metálico, protegendo principalmente a alma dos perfis e consequentemente reduzindo os efeitos da elevação da temperatura frente às capacidades resistentes dos elementos estruturais.

Vale ressaltar também que pelas Fig. 12 e 13, pode-se notar que o modelo numérico consegue representar bem a variação de temperatura em vigas mistas parcialmente revestidas de aço e concreto.

## 4.2 Verificação dos Métodos Normativos

Depois de realizada a validação dos resultados numéricos frente aos experimentais, foi possível realizar a comparação dos cálculos numéricos em relação às equações propostas pelos métodos simplificados de cálculo.

Para perfis puramente metálicos, a ABNT NBR 14323 [4] em seu item 8.5, apresenta de forma detalhada a metodologia para o cálculo da elevação de temperatura em estruturas de aço. O método normativo considera através da Eq. 2, uma distribuição uniforme da temperatura ao longo de toda a seção transversal.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{(u/Ag)}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \varphi \cdot \Delta t. \quad (2)$$

No caso do presente trabalho, o perfil de seção W 250 x 32,7, utilizado por Felício [1], foi adotado para tal comparação. Onde o valor do fator de correção para o efeito de sombreamento ( $K_{sh}$ ) foi de 0,62, fator de massividade para elementos estruturais de aço sem revestimento ( $u/Ag$ ) foi de 210,4257  $m^{-1}$ , a massa específica do aço ( $c_a$ ) igual a 7850  $kg/m^3$ , o calor específico do aço ( $\rho_a$ ) igual a 600 ( $J/kg \cdot ^\circ C$ ), o cálculo do fluxo de calor por unidade de área ( $\varphi$ ) seguiu-se a descrição do item 8.5.1.1.3 da ABNT NBR 14323 [4] e por fim o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) foi adotado para 5 segundos. Vale ressaltar que para calcular o fator de massividade, define-se como a relação entre o perímetro exposto ao incêndio e a área da seção transversal do perfil, como descrito no item 8.5.1.1.2 da ABNT NBR 14323 [4].

A Fig. 16 apresenta a elevação da temperatura ao longo de toda a seção do perfil metálico obtida pelo método numérico em comparação com os resultados calculados através do método simplificado de cálculo descrito anteriormente.

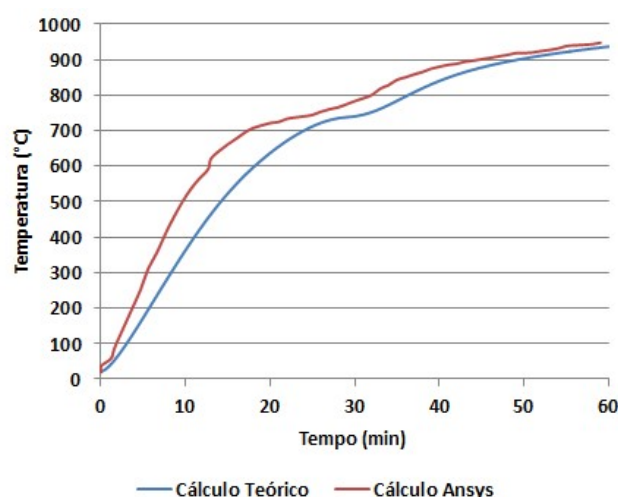


Figura 16. Curva Evolução da temperatura versus tempo obtida via ANSYS para o perfil W 250 x 32,7 puramente metálico e os resultados obtidos pela ABNT NBR 14323 [4]

No caso de perfis mistos de aço e concreto com revestimento parcial, a variação de temperatura não pode ser calculada explicitamente. Portanto, utilizou-se a metodologia descrita no Anexo F do EUROCODE 4 [6], onde permite realizar o cálculo do fator de redução da tensão de escoamento da mesa inferior ( $k_a$ ) do perfil em questão. A Fig. 17 apresenta a seção reduzida para cálculo da capacidade resistente de cada região do perfil misto de aço e concreto parcialmente revestido.

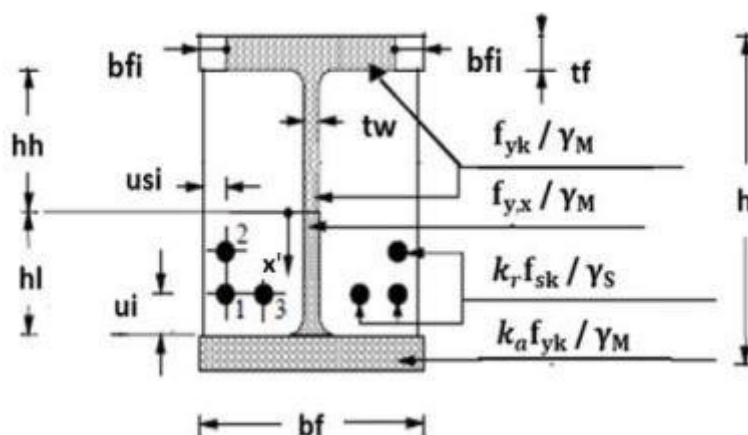


Figura 17. Seção reduzida para cálculo da capacidade resistente. Fonte: EUROCODE 4 [6]

Para algumas partes da seção, a norma europeia propõe um cálculo para a redução da área de acordo com a temperatura, já para outras partes da seção, faz-se em função do coeficiente de redução de resistência para o aço em temperatura elevada que posteriormente tem o seu valor multiplicado pela resistência. Logo, o método utilizado no presente trabalho foi verificar se os valores de  $k_a$  para a mesa inferior, calculados através do método normativo estão compatíveis com as temperaturas obtidas numericamente. É importante destacar que a mesa inferior é a região do perfil que tem a maior contribuição na capacidade resistente à temperatura ambiente e posteriormente é a região que mais sofre com o aumento da temperatura, perdendo consideravelmente a sua resistência.

Os perfis escolhidos para a verificação são aqueles apresentados em Bechara [14], onde foram calculados os resultados teóricos, sendo eles o W 250 x 32,7, W 310 x 44,5 e por fim o W 360 x 64,0.

Para o cálculo manual do fator de redução da tensão de escoamento da mesa inferior ( $k_a$ ) utilizaram-se da Tabela 2 e a Eq. 3, previstas no EUROCODE 4 [6], para os diferentes tempos de exposição ao fogo.

Tabela 2. Fator de redução da tensão de escoamento da mesa inferior. Fonte: EUROCODE 4 [6]

| Resistência ao fogo padrão | $k_a$                               | $k_{a,mínimo}$ | $k_{a,máximo}$ |
|----------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|
| <b>R30</b>                 | $[(1,12) - (84/bf) + (h/22.bf)].a0$ | 0,5            | 0,8            |
| <b>R60</b>                 | $[(0,21) - (26/bf) + (h/24.bf)].a0$ | 0,12           | 0,4            |
| <b>R90</b>                 | $[(0,12) - (17/bf) + (h/38.bf)].a0$ | 0,06           | 0,12           |
| <b>R120</b>                | $[(0,1) - (15/bf) + (h/40.bf)].a0$  | 0,05           | 0,1            |

$$a0 = 0,018.tw + 0,7 \quad (3)$$

Os valores teóricos calculados para os perfis escolhidos para posterior verificação estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de  $k_a$  calculados pelo método teórico para cada perfil. Fonte: Bechara [14]

|             | <b>W 250 x 32,7</b> | <b>W 310 x 44,5</b> | <b>W 310 x 64,0</b> |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>R30</b>  | 0,54                | 0,63                | 0,74                |
| <b>R60</b>  | 0,12                | 0,12                | 0,14                |
| <b>R90</b>  | 0,06                | 0,06                | 0,08                |
| <b>R120</b> | 0,05                | 0,05                | 0,06                |

A partir dos resultados de elevação térmica do modelo numérico desenvolvido, foi possível obter a temperatura média das mesas inferiores. A Tabela 4 apresenta os valores das temperaturas médias obtidas através do modelo numérico.

Tabela 4. Valores da temperatura média em °C

|             | <b>W 250 x 32,7</b> | <b>W 310 x 44,5</b> | <b>W 310 x 64,0</b> |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>R30</b>  | 582                 | 555                 | 532                 |
| <b>R60</b>  | 808                 | 788                 | 770                 |
| <b>R90</b>  | 932                 | 919                 | 894                 |
| <b>R120</b> | 992                 | 978                 | 965                 |

Interpolaram-se os valores médios da temperatura com a tabela dos coeficientes de redução de resistência para o aço em temperatura elevada presente no EUROCODE 4 [6], obtendo os valores do fator de redução da tensão de escoamento da mesa inferior para o modelo numérico. Portanto, compararam-se os valores de  $k_a$  obtidos a partir do modelo numérico com os valores de  $k_a$  calculados pelo método descrito no EUROCODE 4 [6]. A Tabela 5 apresenta os resultados de  $k_a$  encontrados para cada perfil em questão para a resistência ao fogo padrão em quatro classes.

Tabela 5. Valores de  $k_a$  para cada perfil

|             | <b>W 250 x 32,7</b> | <b>W 310 x 44,5</b> | <b>W 310 x 64,0</b> |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>R30</b>  | 0,52                | 0,61                | 0,68                |
| <b>R60</b>  | 0,11                | 0,12                | 0,15                |
| <b>R90</b>  | 0,04                | 0,06                | 0,08                |
| <b>R120</b> | 0,04                | 0,04                | 0,05                |

Vale ressaltar que os valores de  $k_a$  possuem restrições máximas e mínimas, fato esse que para o perfil W 250 x 32,7, para as classes de R 60, R 90 e R 120, os valores obtidos foram menores que os estabelecidos pela norma. Nota-se uma aproximação satisfatória dos resultados obtidos pelos métodos numéricos quando comparados com os métodos simplificados de cálculo para os perfis analisados.

## 5 Conclusões

No presente trabalho, avaliou-se a evolução da temperatura em vigas puramente metálicas e mistas de aço e concreto parcialmente revestidas em situação de incêndio. Com isso, estabeleceram-se metodologias de desenvolvimento de modelos numéricos que representassem os efeitos térmicos do perfil em questão.

Realizada as simulações e com os resultados em mãos, validaram-se o modelo numérico por meio dos resultados experimentais e posteriormente comparou-se com os valores teóricos apresentados na literatura, conforme citado anteriormente.

Logo, os resultados obtidos com o pacote computacional ANSYS na análise da elevação térmica nas seções transversais descritas no trabalho em questão, se apresentaram bastante eficazes. Isso pode ser corroborado de acordo com os resultados apresentados na seção anterior, onde o código desenvolvido representou fielmente o gradiente térmico dos perfis em estudo.

No que diz respeito aos métodos simplificados da norma, pode-se concluir que os valores do coeficiente de redução de resistência para o aço em temperatura elevada obtidos para os diferentes perfis estudados, assim como a elevação térmica obtida via ANSYS para o perfil puramente metálico, conseguiram se aproximar bem dos resultados obtidos pelos métodos normativos. Por fim, vale ressaltar a importância de realizar mais testes, em perfis diferentes, para avaliar até qual caso o método é representativo.

## Agradecimentos

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Triângulo Mineiro pelo apoio direcionado à realização desta pesquisa.

## Referências

- [1] V. F. Domiciano. Análise experimental de vigas de aço e mistas de aço e concreto parcialmente revestidas em situação de incêndio. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.
- [2] Y. C. Wang. Steel and Composite Structures – Behaviour and Design for Fire Safety. Spon Press, 2002.
- [3] M. A. Fabrizzi. Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos de aço-concreto. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.
- [4] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – procedimento. – NBR 14323, Rio de Janeiro, 2013.
- [5] EUROCODE. European Committee for Standardization. Eurocode 3 – Design of Steel Structures. Part 1-2: General rules – Structural Fire Design. Brussels. 2005.
- [6] EUROCODE. European Committee for Standardization. Eurocode 4 – Design of Composite steel and concrete structures. Part 1-2: General rules – Structural Fire Design. Brussels. 2005.
- [7] R. Regobello. Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.
- [8] P. A. G. Piloto, A. B. R. Gavilla, M. Zipponi, A. Marini, L. M. R. Mesquita e G. Plizzari, 2013. Experimental investigation of the fire resistance of partially encased beams. *Journal of Constructional Steel Research* 80, pp. 121 – 137.
- [9] ISO. International Standard. Fire-resistance tests – Elements of building construct – Part 1: General requirements – ISO 834, 1999.

- [10] Gerdau. Perfis Estruturais: Tabela de Bitolas. 2017. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/perfil-estrutural-tabela-de-bitolas.pdf>>. Acesso em: 26 de julho 2019.
- [11] E. F. A. Kimura. Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.
- [12] Ansys Inc. *Ansys Release 9.0*. Documentation, 2004.
- [13] EUROCODE. European Committee for Standardization. Eurocode 2 – Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings – Structural Fire Design. Brussels. 2004.
- [14] L. D. Bechara. Comparação teórica da capacidade resistente de vigas mistas de aço e concreto parcialmente revestidas à temperatura ambiente e em temperatura elevada. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2018.