

Otimização de lajes mistas contínuas via algoritmo bonobo
I. O. M. Silva; M. O. Teixeira; É. C. Alves; A. F. G. Calenzani..... 412

Pilares tubulares preenchidos com concreto de seção circular compacta e semicompacta sob flexo-compressão
G. A. Miranda; A. F. G. Calenzani; W. G. Ferreira..... 422

SITUAÇÃO DE INCÊNCIDO

Análise numérica de conexões metálicas em estruturas de madeira em situação de incêndio
M. M. Fianco; G. C. A. Martins; F. M. Rocha..... 432

Comportamento ao fogo de lajes mistas com chapa de aço colaborante
P. A. G. Piloto; C. Balsa; E. K. G. Lucca 441

SUSTENTABILIDADE

Análise da utilização da cinza de eucalipto e sua viabilidade como adição à composição do concreto
A. Milchert; G. G. C. Oliveira; O. A. Sakai..... 451

Análise das propriedades do concreto com uso de rejeito de minério de ferro
H. C. B. Ferreira; L. T. S. Ramos; F. S. J. Poggiali; E. D. Reis; A. B. Mourão; I. B. Moraes..... 458

Avaliação das propriedades do concreto celular espumoso produzido com substituição parcial do cimento por cinzas de casca de arroz
J. C. Abdala; A. B. Mourão; J. N. Paula; L. T. S. Ramos; I. B. Moraes 468

Comportamento mecânico de alvenarias confeccionadas com tijolos ecológicos
F. L. Casas; F. Valim; D. Nascimento; S. Giarola; L. Santos; W. Santos 477



COMPORTAMENTO AO FOGO DE LAJES MISTAS COM CHAPA DE AÇO COLABORANTE

FIRE BEHAVIOUR OF COMPOSITE SLABS WITH COLLABORATING STEEL DECK

Paulo A. G. Piloto*^a, Carlos Balsa^b, Erica Kimura^c e Gabriel Lucca^d

^a GICoS, Instituto Politécnico de Bragança
E-mail: ppiloto@ipb.pt

^b Instituto Politécnico de Bragança
E-mail: balsa@ipb.pt

^c Universidade Tecnológica Federal do Paraná
E-mail: ekimura@professores.utfpr.edu.br

^d Instituto Politécnico de Bragança
E-mail: a57032@ipb.pt

*Autor correspondente

RESUMO

Na construção de edifícios de grande altura com elementos mistos, o tempo de construção é crucial. A construção mista, como aplicação de lajes mistas com chapa de aço colaborante é uma alternativa viável, amplamente adotada nos EUA e Europa, acelerando o processo construtivo. Testes à escala real, como os do BRE, demonstram a resiliência ao incêndio das estruturas mistas, atendendo aos requisitos de segurança do Eurocódigo através de testes laboratoriais dispendiosos. O Método dos Elementos Finitos (MEF) surge como uma alternativa, depois da validação dos modelos. Este estudo comparou o resultado das simulações térmicas com ensaios experimentais, com o objetivo de avaliar a capacidade portante em condições de incêndio. A laje foi modelada no software ANSYS, reflete as características da laje experimental, composta por chapa de aço galvanizado, lã de rocha, concreto e barras de reforço em aço. Este trabalho permitiu desenvolver um modelo numérico, validando a sua eficácia na simulação do comportamento de isolamento térmico do elemento misto.

Palavras-chave: Construção mista; Segurança contra incêndio; Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

During the construction of high-rise buildings with composite elements, construction time is crucial. Composite construction, such as the application of composite slabs with collaborating steel decks, is a viable alternative, widely adopted in the USA and Europe, accelerating the building process. Full-scale tests, such as BRE, demonstrate the fire resilience of composite structures, when compared to Eurocode safety requirements through expensive laboratory tests. The Finite Element Method (FEM) appears as an alternative, after validation of the models. This study compared the results of thermal simulations with experimental tests, to evaluate the ability to sustain the load under fire conditions. The composite slab was modelled with ANSYS software, reflecting the characteristics of the experimental slab, protected by a galvanized steel deck, rock wool, concrete and steel reinforcement bars. This work allowed the development of a numerical model, validating its accuracy in simulating the thermal insulation behaviour of the composite element.

Keywords: Composite construction; Fire safety; Finite Element Method.



1. INTRODUÇÃO

Durante o desenvolvimento de um edifício, é crucial considerar a eficiência temporal, especialmente no que diz respeito à construção de andares tipo. Nesse contexto, a utilização de construção mista surge como uma alternativa viável em comparação com os métodos tradicionais (Johnson, 2004). As estruturas mistas já são utilizadas em larga escala em diversos tipos de edifícios. Este método de construção tornou-se popular, inicialmente nos Estados Unidos e posteriormente ganhou popularidade no Reino Unido e na Europa (Hamerlinck, 1991). Habitualmente, este elemento é definido com uma altura variável entre 100 e 150mm com vãos entre 2.5 e 3.6 m e espessura de chapa de aço variável entre 0.7 e 1.5 mm (Cooke, 1988). A utilização deste tipo de elementos desempenha um papel fundamental na aceleração do processo construtivo. Este sistema atua como uma cofragem para o betão, mas também se integra ao sistema estrutural por meio de geometrias mais comuns em formato trapezoidal e reentrante, (Queiroz, 2012).

Para que um elemento possa ser utilizado, é necessário que atenda aos requisitos das normas técnicas relacionadas a incêndios, como é o caso do Eurocódigo 1994-1-2 (2005) na Europa. Esses critérios exigem uma série de testes em laboratórios, com elevado custo e que necessitam de um longo período para serem executados. Para atingir esses requisitos de segurança contra incêndio exigidos pela norma, os elementos são submetidas a experimentos laboratoriais utilizando a curva padrão de incêndio ISO 834 (1999), que avalia os resultados em relação a capacidade de carga (R), integridade (E) e isolamento (I).

A capacidade de suporte de carga é definida como a capacidade em sustentar a carga definida (fator de carga) sem sofrer o colapso, por deformação ou taxas de deformação excessivas. Para avaliar a capacidade, são definidos dois critérios, limite de deslocamento vertical ($D=L^2/400d$ [mm]) e taxa de deslocamento vertical ($dD/dt=L^2/9000d$ [mm/min]), sendo “L” o vão livre e “d” a distância da extremidade da fibra da zona de compressão do elemento a frio para a extremidade da fibra da zona de tração do projeto a frio da seção estrutural.

A característica do elemento para sustentar a passagem de gases quentes ou chama é definida por “integridade” do elemento, sendo necessário verificar a ignição de uma almofada de algodão na face não exposta e a utilização de medidores de folga.



A resistência ao fogo por isolamento, utiliza o critério de verificação da temperatura média da laje, na face não exposta, para que não ultrapasse 140 K acima da temperatura média inicial, ou nenhum ponto da face não exposta ultrapasse os 180 K, acima da temperatura média inicial.

Um dos testes em escala real mais significativos realizados em estruturas compostas de aço em condições de incêndio foi conduzido pelo *Building Research Establishment (BRE)* em Cardington, Reino Unido, em 1990. Os resultados deste teste demonstraram que a estrutura do piso composto foi capaz de suportar níveis de carga de flexão significativamente mais altos do que inicialmente previsto (Newman, 2000).

Tendo em consideração a dificuldade para ensaiar este tipo de elementos, foram desenvolvidos métodos alternativos de projeto para minimizar a necessidade desses testes realizados à escala real, em particular foram desenvolvidos métodos simplificados e métodos avançados de cálculo. O MEF está enquadrado nos métodos avançados de cálculo e prescreve uma subdivisão de um domínio contínuo de integração em pequenas regiões, chamadas de elementos finitos. Nesse procedimento, o domínio contínuo é tratado como um domínio discreto (Assan, 2020). O MEF tem sido amplamente utilizado para a análise térmica e mecânica de elementos estruturais, incluindo elementos de laje mistos. Um exemplo é o modelo proposto por Piloto et al (2019) para a avaliação da temperatura crítica em lajes mistas trapezoidais. Este modelo estudou o comportamento térmico e mecânico considerando variações na espessura da laje, utilizando o software ANSYS.

O objetivo deste estudo é desenvolver um modelo numérico capaz de prever o campo de temperatura em resposta a uma ação térmica de um incêndio. O modelo foi criado com base em uma laje comercial que possui uma camada de lã mineral integrada na estrutura com fins de isolamento térmico e acústico. Nas extremidades, a laje apresenta uma interface de betão em contato direto com chapa de aço, utilizando a geometria como meio de conexão, ver **Fig. 1**. Foi realizado um ensaio experimental à escala real, onde foram testadas duas chapas enformadas a frio, ligadas entre si. Esta ligação faz aparecer um espaço livre com, aproximadamente 2 mm, que acaba por permitir a entrada de calor. Para a obtenção dos resultados foram utilizados termopares, onde foram registradas as temperaturas em vários pontos para avaliar o desempenho térmico. Para a validação, os resultados obtidos através da simulação foram

comparados, selecionando nós do modelo que correspondem à mesma localização e características dos pontos equipados com termopares. Este estudo faz a comparação, buscando validar e aprofundar a compreensão do comportamento térmico do elemento misto.

A laje modelada no software ANSYS (**Fig. 2**) é composta por uma chapa de aço galvanizado com espessura de 1mm, lã mineral com densidade de 50 kg/m^3 , betão para suportar esforços de compressão, e barras de aço de 10 mm e 5.5 mm para suportar esforços de flexão positiva e negativa, respectivamente. A **Fig. 1** apresenta a laje que foi utilizada no estudo em laboratório.



Fig. 1: Laje ARCELOR utilizada no ensaio.

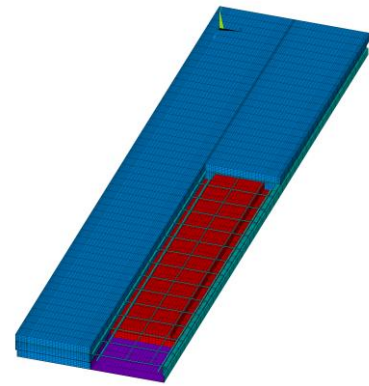


Fig. 2: Modelo de elementos finitos da laje (ANSYS).

2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

2.1. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

As propriedades térmicas do betão e do aço foram obtidas a partir da norma prEN 1992-1-2 (2021), fundamentais para entender e simular o comportamento dos materiais a temperaturas elevadas. Tais propriedades são ilustradas na **Fig. 3** e **Fig. 4**, respectivamente. O modelo inclui uma camada de ar para representar o efeito da separação entre os materiais e a chapa de aço, observado por muitos investigadores durante os ensaios experimentais. As propriedades térmicas do ar foram determinadas da bibliografia (CENGEL, 2014) e estão representadas na **Fig. 5**. Por fim, as propriedades térmicas da lã mineral, foram obtidas a partir da pré norma EN 1995-1-2 (2022) e estão representadas na **Fig. 6**.

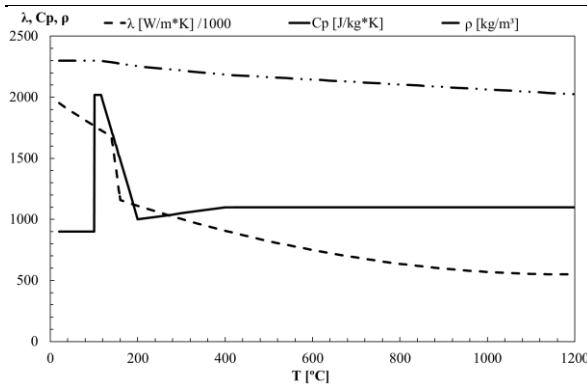


Fig. 3: Propriedades térmicas do betão.

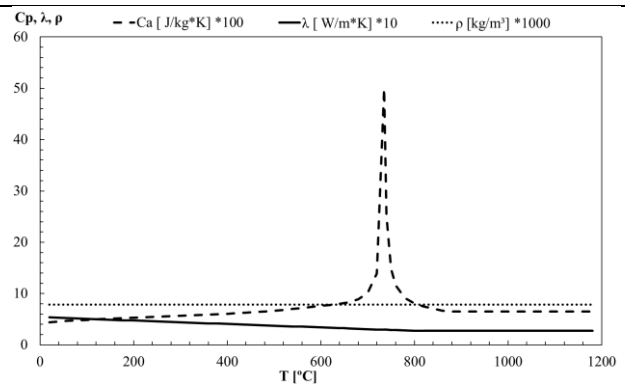


Fig. 4: Propriedades térmicas do aço.

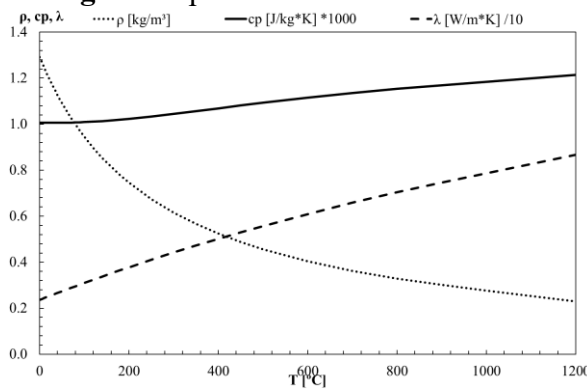


Fig. 5: Propriedades térmicas do ar.

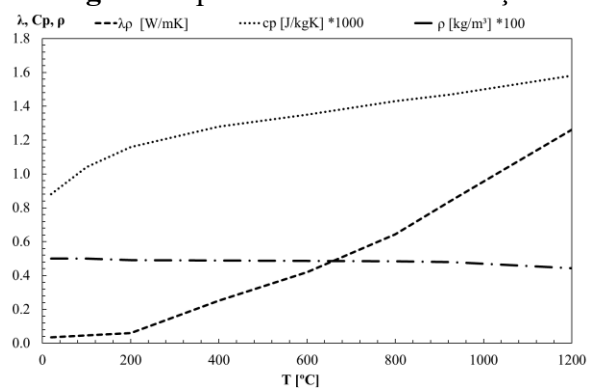


Fig. 6: Propriedades térmicas lâ mineral.

2.2. ELEMENTOS FINITOS

A simulação térmica foi realizada no software de elementos finitos ANSYS Mechanical APDL e, foram escolhidos três tipos de elementos finitos 3D para a simulação. O elemento Shell 131 é utilizado para a representação da chapa de aço. Este elemento possui até 32 graus de liberdade, variando de acordo com o número de camadas. O elemento utiliza funções de interpolação lineares no plano com o método de integração completa de Gauss (2x2), além de interpolação linear com três pontos de Gauss em sua espessura. Tratado-se de um elemento de casca, é possível implementar e simular a camada de ar formado pelo descolamento entre o betão e a chapa de aço durante o incêndio, o chamado *air gap*. O elemento Solid 70 é utilizado para a representação da lâ mineral (*rockwool*), utilizada para proteção da laje. Este elemento também é utilizado para fazer a representação do betão. O elemento Solid 70 possui oito nós, sendo que cada nó possui um único grau de liberdade. Este elemento utiliza uma função de interpolação linear e um esquema de integração completa de Gauss (2x2x2). Por fim, para a representação dos reforços e a malha de aço (200x200mm), foi utilizado o elemento Link 33.



Este elemento de barra é sobreposto na malha de betão, repartindo os mesmos nós. Permite a transferência de calor 3D, possui dois nós com apenas um grau de liberdade em cada nó.

2.3. MODELO DE CÁLCULO

O modelo térmico utiliza uma análise térmica transiente não linear 3D, o software calcula a transferência de calor com base na **Eq. (01)** e **Eq. (02)**. As equações estão representadas na forma diferencial, permitindo simular a condução de calor nos materiais. As condições de fronteira estão definidas pela igualdade entre o fluxo de calor que chega à superfície por convecção e radiação.

$$k\nabla^2 T + q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (01)$$

$$k\nabla T \vec{n} = \alpha_c(T - T) + \phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma (T_G^4 - T^4) \quad (02)$$

Sendo k a condutividade térmica, p a massa específica, C o calor específico do material, q a taxa de transferência de calor, T a temperatura, t o tempo, ε_m e ε_f sendo a emissividade do material e do fogo, respectivamente, σ representa a constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} W/m²K⁴) e ϕ o fator de vista do elemento sujeito a radiação. O tempo t representado na **Eq. (01)** obriga a utilização de uma solução incremental.

2.4. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Para a parte inferior da chapa de aço, foi utilizado um valor de emissividade da chama de $\varepsilon_f=1.0$. No entanto, para o espaço criado pela ligação das duas chapas, onde a transferência de calor é limitada devido à geometria, adotou-se um valor de ε_f . $\phi = 0,5$ para garantir que o que os resultados numéricos se aproximem dos resultados experimentais.

Para os parâmetros de convecção, os valores recomendados foram extraídos da norma EN 1991-1-2 (2002). Portanto, o coeficiente de convecção aplicado à superfície não exposta é $\alpha_c = 9$ [W/m²K] e o coeficiente de convecção para transferência de calor na face exposta, afetado pela curva de calor ISO 834, é $\alpha_c = 25$ [W/m²K]. Essas condições fronteira estão representadas na **Fig. 7**.

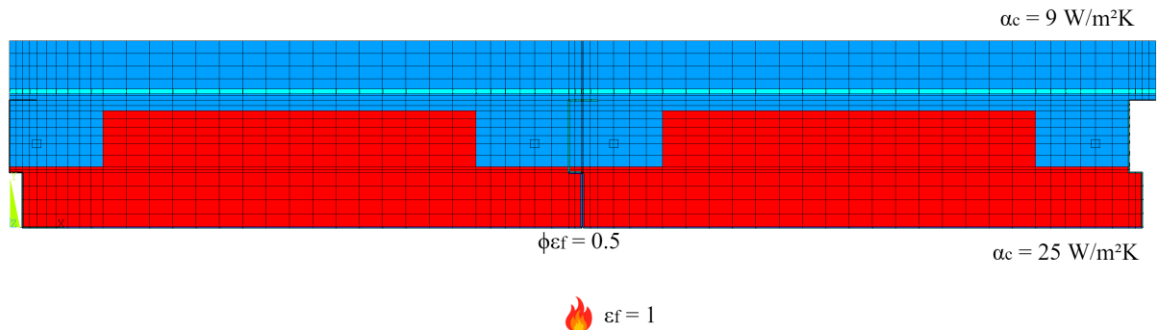


Fig. 7: Representação das condições de fronteira.

2.5. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

O tempo de análise foi configurado para 7200 segundos, equivalente a 2 horas, refletindo o ensaio de laboratório. Para a solução incremental foi definido passo de tempo de 60 (s), com um mínimo de 1 (s) e um incremento máximo de 60 (s). Para os parâmetros de convergência do processo iterativo foi adotado o fluxo de calor com tolerância de 0.001 e valor mínimo de referência de $1\text{E-}6$ (W).

3. RESULTADOS

Os resultados no software ANSYS foram comparados com os determinados no ensaio laboratorial, procurando a localização mais próxima em relação ao ponto de medição experimental. Para comparação da evolução dos resultados no tempo foi utilizado o erro quadrático médio (RMSE). Os pontos analisados tem suas localizações representadas na **Fig. 8** e seus resultados são representados graficamente na **Fig. 9**. O ponto T1 teve um RMSE de 66,16 °C. O ponto T2 teve um RMSE de 132,55 °C. Os pontos T3 e T4 exibiram RMSE de 30,26 °C e 24,21 °C, respectivamente. O ponto T5, na barra de reforço, registrou um RMSE de 94,86 °C. Os pontos T6 e T7, na malha de aço, apresentaram RMSE de 40,20 °C e 36,95 °C, respectivamente. O ponto T8 apresentou um RMSE de 16,51 °C, e, por fim, os pontos T9 e T10 apresentaram um RMSE de 5,56 °C e 12,50 °C, respectivamente. O campo de temperatura ao fim de 7200 segundos pode ser observado na **Fig. 10**.

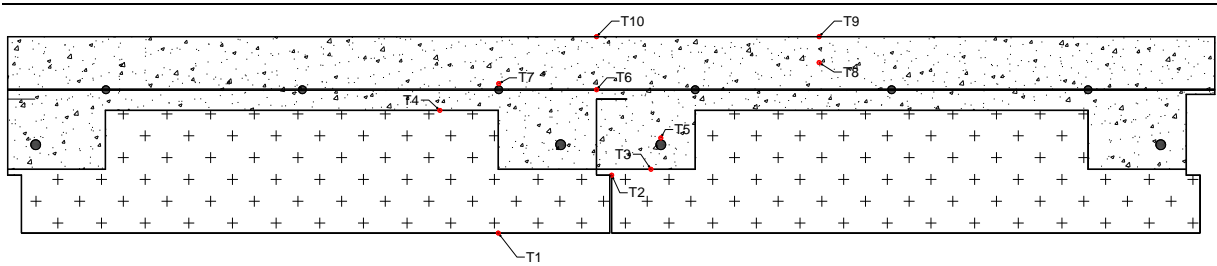


Fig. 8: Localização termopares.

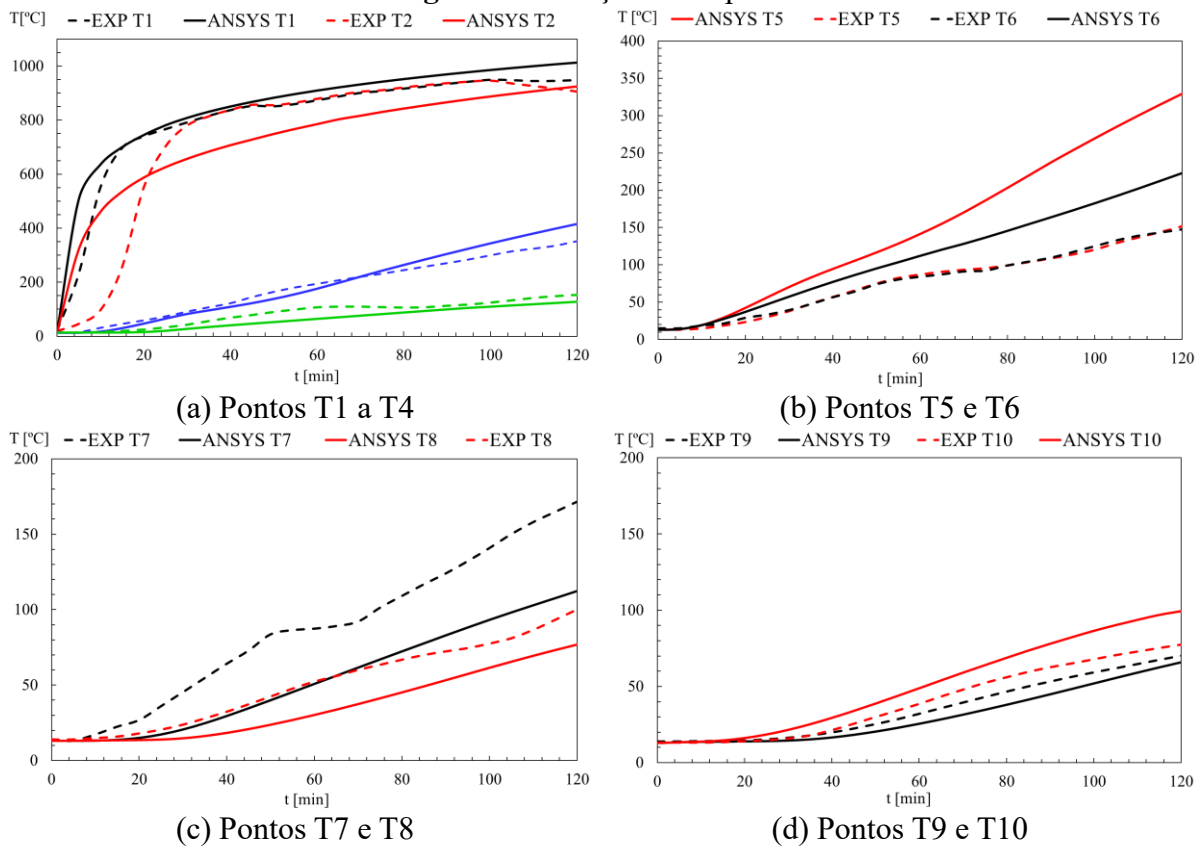


Fig. 9: Comparação de resultados.

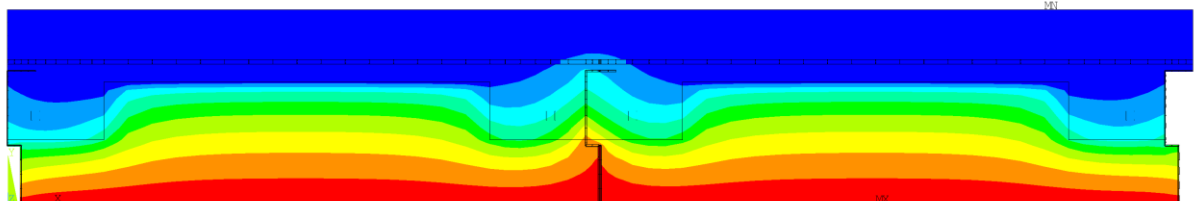


Fig. 1: Campo de temperatura a 7200s.

CONCLUSÕES

O estudo apresentou a elaboração de uma simulação térmica realizada com elementos finitos para a validação de um ensaio experimental. De acordo com a prEN 1994-1-2, o critério



de isolamento, que exige que o aumento da temperatura média no lado não exposto não ultrapasse 140K acima da temperatura média inicial, foi cumprido, uma vez que os pontos T9 e T10 atingiram temperaturas máximas de 65,79 °C e 99,50 °C, respectivamente. É possível observar que o resultado obtido pelo software difere do experimental no início do ensaio (5 a 15 min) e ao longo do tempo. Notou-se que o fator de vista da abertura de 2 mm foi um parâmetro importante para que a temperatura da simulação seja próximo da temperatura experimental nesta região. O modelo térmico é possível de ser utilizado para estudos paramétricos com o uso adequado das propriedades dos materiais e corretos parâmetros de simulação. Estão a ser realizadas mais simulações computacionais, com não linearidade material e geométrica, para determinação da capacidade portante à temperatura ambiente e resistência ao fogo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assan, Aloisio Ernesto. **Método dos elementos finitos: primeiros passos**. 3. ed. revista e ampliada. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2020
- CEN, pr EN 1992-1-2: **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design**. Brussels, Sep. 2021.
- CEN, pr EN 1994-1-2: **Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design**. Brussels, Aug. 2005.
- CEN, pr EN 1995-1-2: **Eurocode 5 – Design of timber structures**. Brussels, Dec. 2022.
- CENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Heat and mass transfer: fundamentals and applications**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 991 p. ISBN: 0077654765.
- CEN, EN1991-1-2: **Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire**. English. Supersedes ENV 1991-2-2:1995. Brussels, Nov. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.3403/00071057>.
- ISO, **ISO 834: Fire-resistance tests** — Elements of building construction. Geneva: ISO, 1999.
- JOHNSON, R. **Composite Structures of Steel and Concrete**. 3. ed. Blackwell Publishing, 2004. 230 p.
- PÍLOTO, P. A. G. et al. **Three-Dimensional Numerical Modelling of Fire Exposed Composite Slabs with Steel Deck**. MATTER: International Journal of Science and Technology, v. 5, n. 2, p. 48-67, 2019.
- NEWMAN, G. **Fire-safe design**. *Research Focus*, n. 43, p. 8, 2000.
- QUEIROZ, Gilson; PIMENTA, Roberval José; MARTINS, Alexander Galvão. **Estruturas mistas. Volume 1**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012.
- RACKHAM, J. W.; COUCHMAN, G. H.; HICKS, S. J. **Composite slabs and beams using steel decking: Best practice for design and construction**. Metal Cladding & Roofing Manufacturers Association in partnership with the Steel Construction Institute, 2009.