

Análise numérico-computacional de lajes mistas de aço e concreto (*steel deck*) em situação de incêndio

Francine Barcellos da Silva¹, Fabrício Longhi Bolina²

¹Unisinos / Engenheira Civil / barcellosfrancine@gmail.com

²Unisinos / Professor curso pós-graduação em Projeto de Estruturas / fabriciolb@unisinos.br

Resumo

A utilização de estruturas mistas de aço e concreto é condicionada ao bom desempenho mecânico de ambos os materiais. Uma das soluções de elementos estruturais mistos são as lajes do tipo *steel deck*. Este trabalho busca avaliar o desempenho destas lajes mistas submetidas às altas temperaturas pela NBR 14323 (ABNT, 2013), correlacionando-as o projeto a temperatura ambiente, com base na NBR 8800 (ABNT, 2008), NBR 14762 (ABNT, 2010) e normas complementares. A curva de aquecimento empregada foi a da ISO 834 (ISO, 1999). A distribuição das temperaturas na seção da laje foi obtida segundo o software Ansys. Os modelos computacionais foram calibrados com os resultados fornecidos por norma e extrapolados para outros cenários de projeto, tais como diferentes geometrias e espessuras de chapas perfiladas, além de espessuras efetivas da camada de concreto. Ao término, foram propostos ábacos de verificação destes elementos. Como resultados, foi notado que as chapas perfiladas com reentrâncias apresentaram melhor desempenho em relação às trapezoidais, tanto em situação de incêndio quanto em temperatura ambiente, sendo a espessura da camada de concreto a variável preponderante no comportamento destas lajes submetidas às altas temperaturas, visto sua maior estabilidade térmica.

Palavras-chave

Segurança contra incêndio. Lajes mistas. Aço. Concreto.

Introdução

As lajes mistas de aço e concreto possuem algumas vantagens. Elas oferecem uma plataforma de trabalho durante a execução da estrutura, velocidade de construção, aumento da estabilidade local e global da estrutura de aço, redução da altura das vigas e do peso próprio da estrutura (CRAVEIRO, 2010; LIANG, 2015). Apesar de ser uma solução bastante empregada, sua sensibilidade ao fogo do aço exige maior atenção em projeto (LI; WANG, 2013).

Apesar da inalação de fumaça e a exposição ao calor serem as principais causas de mortes (VARGAS E SILVA, 2005), o dimensionamento ao fogo dos elementos que compõem um sistema estrutural deve ser realizado e é obrigatório pela Lei Complementar n° 14.376 de 2013 no Rio Grande do Sul e a Lei Complementar n° 1257 de 2015 de São Paulo, além de normas técnicas como a NBR 15200 (ABNT 2012) e NBR 14323 (ABNT 2013).

Este trabalho visa analisar o comportamento de lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio, abordando a influência da geometria da forma de aço no tempo de resistência ao fogo da laje, calculando a temperatura da mesma de forma numérica e

computacional segundo o Ansys, tomando como base os critérios de dimensionamento e de verificação de normas brasileiras e europeias.

Desempenho das lajes mistas de aço e concreto em altas temperaturas

Durante os estudos no edifício Cardington, entre 1995 e 2003, foi constatado que a geometria da chapa de aço tem papel importante na distribuição da temperatura na laje, influenciando sua resistência ao fogo (LI, ZANGH, JIANG, 2017). A nervura da chapa faz com que a umidade do concreto neste local demore mais a evaporar, diminuindo a temperatura geral do concreto. A espessura da chapa de aço, por sua vez, não influencia na distribuição da temperatura na laje, uma vez que sua pequena dimensão faz com que a sua temperatura média seja praticamente igual em todos os casos, com valores médios semelhantes (LI, WANG, 2013).

O concreto também tem grande influência sobre o comportamento das lajes mistas expostas a incêndios. Devido sua baixa condutividade térmica, quanto maior a espessura de sua camada, menor é consequência das altas temperaturas na laje, que apresenta uma maior resistência ao fogo (LI, WANG, 2013). Ainda, o efeito de membrana se torna mais desenvolvido nestes casos. O *spalling* do concreto tende a ser mitigado nestas lajes, haja visto a barreira propiciada pela chapa perfilada (COSTA et al, 2002; WANG, 2002).

Projeto de Lajes Mistas em Situação de Incêndio

A verificação de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio é feito pela NBR 14323 (ABNT 2013), com forte inspiração no EN 1994-1-2 (EN, 2005). Ela especifica que o projeto destas estruturas em alta temperatura deve ser feito no ELU, não sendo necessária verificação no ELS. A norma propõe que o dimensionamento pode ser feito através do resultado de ensaios ou por métodos analíticos de cálculo.

A verificação estrutural das lajes em altas temperaturas passa por três critérios: estanqueidade, isolamento térmico e capacidade resistente, sendo que a NBR 14323 (ABNT 2013) considera o critério de estanqueidade atendido com a presença da chapa de aço. O critério do isolamento térmico é determinado pela espessura efetiva da laje. Sua capacidade resistente é determinada através de análise plástica global, considerando os momentos positivos e negativos gerados pelo carregamento especificado e obtidos através do diagrama de momentos fletores.

Segundo a norma, a contribuição proporcionada pela chapa de aço no momento resistente é calculada pelo somatório da contribuição de cada elemento que compõe a chapa, conforme Equação 1, sendo A_{efi} a área efetiva da parte i em cm^2 , d_i a distância do centro de gravidade da parte i até a linha neutra da seção da laje em cm, F_{yk} a resistência ao escoamento do aço utilizado em kN/cm^2 e k_{y,θ_i} o coeficiente de redução da resistência do aço conforme a temperatura indicada para aquele elemento, que é calculada através de coeficientes indicados na norma para TRRF de 60, 90 e 120 minutos. Para o cálculo da posição linha neutra em relação à face superior da laje é utilizada a Equação 2, onde F_{ck} é a resistência a compressão do concreto em kN/cm^2 ,

$k_{c,\theta}$ é o coeficiente de redução da resistência do concreto conforme a temperatura e b_w é a largura da laje.

$$M_{Rd,faço} = \sum A_{efi} d_i F_{yk} k_{y,\theta i} \quad (1)$$

$$y_p = \frac{\sum A_{efi} F_{yk} k_{y,\theta i}}{0,85 F_{ck} k_{c,\theta} b_w} \quad (2)$$

A contribuição proporcionada pelo concreto é calculada conforme a Equação 3, onde $A_{ef,c}$ é a área de contribuição do concreto acima da linha neutra em cm^2 , d é a distância do centro de gravidade da área comprimida do concreto até a linha neutra em cm, F_{ck} é a resistência a compressão do concreto em kN/cm^2 e $k_{c,\theta}$ é o coeficiente de redução da resistência do concreto conforme a temperatura, sendo indicado em norma para TRRF de 60, 90 e 120 minutos.

$$M_{Rd,c} = A_{ef,c} d F_{ck} k_{c,\theta} \quad (3)$$

O momento resistente final da laje é a calculado como a soma dos momentos resistentes da chapa de aço e do concreto. O cálculo do cisalhamento não é considerado por esta norma, motivo pelo qual não será realizada a sua avaliação neste trabalho.

Metodologia

A verificação numérica foi feita com base nas equações normativas da NBR 8800 (ABNT, 2008), NBR 14323 (ABNT, 2013), NBR 15200 (ABNT, 2012) e Eurocodes correspondentes. Como a NBR 14323 (ABNT, 2013) apresenta orientações limitadas de projeto para diferentes TRRF, foi necessário realizar uma análise computacional para extrapolação dos resultados, através do software Ansys, utilizando a curva de incêndio padrão definida pela ISO 834 (ISO, 1999) conforme requerido pela NBR 14323 (ABNT, 2013) para análises destas estruturas em altas temperaturas.

As variáveis de resposta propostas são a espessura da camada de concreto, a geometria e espessura da chapa. A avaliação foi feita de forma a explorar os valores de uma variável enquanto as outras duas tem seus valores fixos. Foram avaliadas espessuras efetivas de concreto de 80 mm, 90 mm, 100 mm, 110 mm, 120 mm, 130 mm, 140 mm e 150 mm. Entre as geometrias das chapas estudadas, foram escolhidas duas trapezoidais e uma com reentrâncias, conforme Figura 1 e as espessuras de chapas estudadas foram de 0,80 mm, 0,95 mm e 1,25 mm.

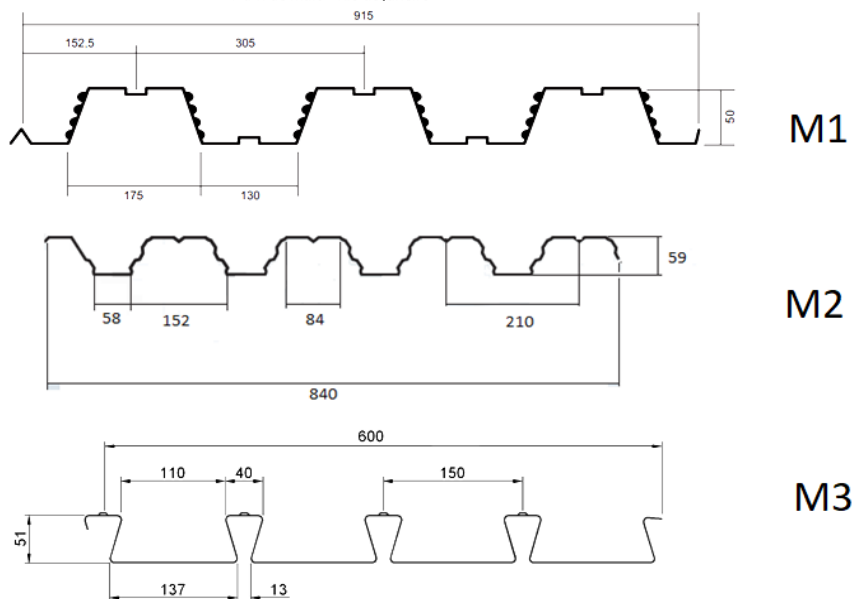


Figura 1 - Modelos de chapa estudados

Para denominação dos modelos estudados, foi escolhida a ordem da nomenclatura onde primeiro é o modelo de chapa, depois a espessura da chapa e por último a espessura efetiva do concreto. A Figura 2 mostra um exemplo da montagem da nomenclatura utilizada neste trabalho.

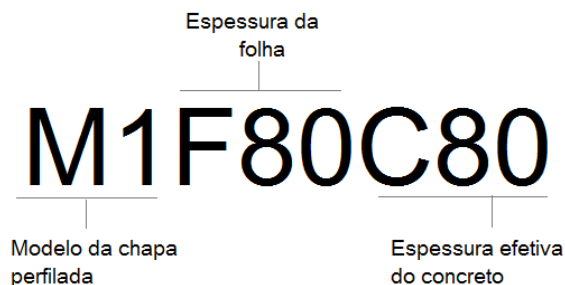


Figura 2 – Nomenclatura dos modelos estudados

Como variáveis de controle, para análise das lajes consentidas neste estudo, foram adotados os valores do aço e do concreto em altas temperaturas conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do aço e do concreto em altas temperaturas

	Propriedades do aço	Propriedades do concreto
Resistência Característica	Escoamento - Conforme Tabela 1 da NBR 14323 (ABNT, 2013)	Conforme Tabela 1 da NBR 15200 (ABNT, 2012)
Coefficiente de Poisson	0,3	0,15
Módulo de Elasticidade	Conforme Tabela 1 da NBR 14323 (ABNT, 2013)	Conforme EN 1994-1-2 (EN, 2005)
Condutividade térmica	Conforme item E.4 do Anexo E da NBR 14323 (ABNT, 2013)	Conforme item C.3 do Anexo C da NBR 15200 (ABNT, 2012)
Calor específico	Conforme item E.43 do Anexo E da NBR 14323 (ABNT, 2013)	Conforme item C.2 do Anexo C da NBR 15200 (ABNT, 2012)
Densidade	7850 kg/m ³	2500 kg/m ³

O modelo de laje estudado é unidirecional e bi-apoiado, formando elementos isostáticos, de largura 1 m e vão de 3 m. Os apoios foram considerados perpendiculares às nervuras. Não há formação de forças de compressão do efeito membrana devido à vinculação do modelo, que por ser apoiado não restringe a movimentação horizontal. Também não foi considerada a análise construtiva para lajes mistas, onde a chapa deve suportar a totalidade das cargas durante o processo de cura do concreto. Não foi considerada a utilização de armaduras de flexão negativa nos modelos adotados, e a armadura positiva foi constituída pela chapa perfilada de aço, sendo que o colapso do modelo estudado se dá por rótula plástica sob momento positivo na seção central.

Os Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF) estudados foram de 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150 e 180 minutos. Como a NBR 14323 (ABNT, 2013) fornece os coeficientes para cálculo da temperatura da chapa de aço somente para os TRRF de 60min, 90min e 120min, foi utilizado o software Ansys para obtenção da temperatura dos elementos os TRRF não abrangidos pela norma, calibrando as extrapolações com os valores apresentados por norma.

O Ansys utiliza o método dos elementos finitos em sua análise, com a formação de malhas e análise de seus pontos de interseção. A ferramenta foi empregada para analisar a distribuição de temperatura na seção, exposta à curva padronizada de incêndio da ISO 834 (ISO, 1999). O coeficiente de convecção utilizado foi de 25 W/m².K. Não foi considerada a emissividade térmica dos materiais. A coleta da temperatura foi feita através da ferramenta *Temperature Probe* do Ansys. Para medir a temperatura da chapa perfilada, foram selecionadas faces expostas ao fogo, adotando como ponto de medida o plano médio do respectivo elemento que compõe a chapa. Na medição das temperaturas do concreto foi admitida apenas a parcela comprimida da seção.

Resultados

Os gráficos da Figura 3, Figura 4 e Figura 5 mostram a temperatura média da face superior do concreto, acima da linha neutra. Percebem-se nos gráficos apresentados que somete aos 60 min de exposição a variação de temperatura é maior e mais significativa

nas quatro primeiras espessuras, ultrapassando 100°C e comprometendo sua resistência. Aos 180 min, somente o modelo M1 com espessuras de 14 e 15 cm, o modelo M2 com espessura de 15 cm e o modelo M3 com espessuras de 13 a 15 cm não atingiram 100°C. Nas demais espessuras, as temperaturas chegaram a 494,5°C, tendo um coeficiente de redução de 0,61. Este comportamento de isolamento térmico do concreto pode ser explicado pela sua baixa condutividade térmica e alto calor específico, o que faz com que em face de uma exposição ao fogo necessite de alta temperatura e duração para que o calor seja transferido ao longo de sua espessura.

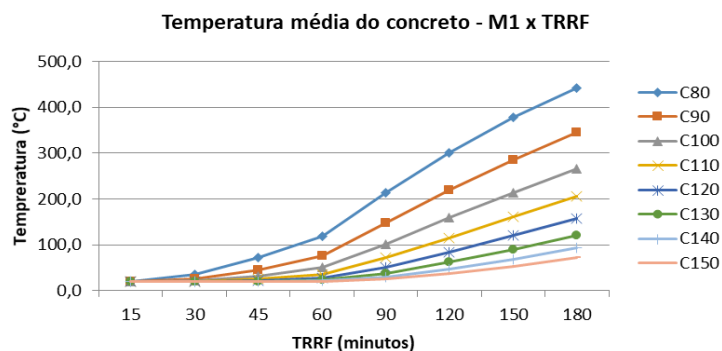


Figura 3 - Temperatura média concreto com chapa M1

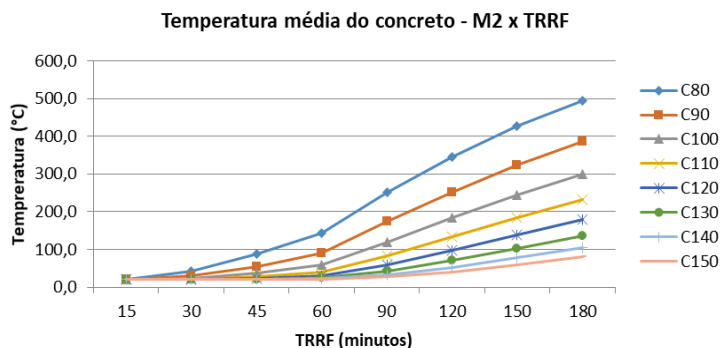


Figura 4 - Temperatura média concreto com chapa M2

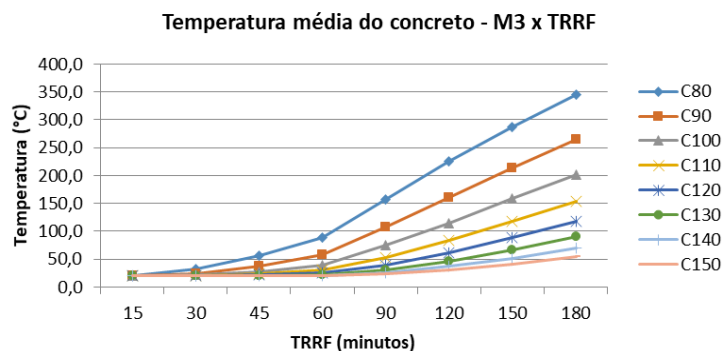


Figura 5 - Temperatura média concreto com chapa M3

Analisando a temperatura da chapa quando analisada a sua geometria na exposição às altas temperaturas, são obtidas temperaturas muito semelhantes para a mesa inferior e alma, o que era de se esperar, haja visto a elevada condutividade térmica do aço. São apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5 os fatores de redução de resistência ao escoamento das diferentes partes da chapa. A geometria de chapa do modelo M3 tem a maior variação de temperatura nos elementos, apresentando as menores temperaturas de mesa superior e as maiores temperaturas de mesa inferior e alma entre os modelos estudados. Como consequência, estas chapas possuem maiores fatores de redução na mesa superior e os menores na mesa inferior e alma. Esta variação fica dentro de uma faixa de 133°C e é influenciada pela área e forma de exposição da mesma, que por causa do modelo com reentrâncias, acaba isolando a mesa superior e deixando uma área maior de exposição na mesa inferior, que é transferida para a alma.

Tabela 2 – Fator de redução de resistência ao escoamento da mesa superior

Modelo	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
M1	1,00	0,72	0,42	0,25	0,12	0,08	0,06	0,05
M2	1,00	0,79	0,47	0,30	0,15	0,09	0,08	0,07
M3	1,00	0,89	0,64	0,43	0,22	0,13	0,10	0,09

Tabela 3 – Fator de redução de resistência ao escoamento da mesa inferior

Modelo	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
M1	1,00	0,65	0,34	0,20	0,09	0,06	0,05	0,04
M2	1,00	0,61	0,28	0,16	0,08	0,05	0,05	0,05
M3	1,00	0,52	0,24	0,14	0,07	0,05	0,05	0,04

Tabela 4 – Fator de redução de resistência ao escoamento da alma

Modelo	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
M1	1,00	0,65	0,34	0,20	0,09	0,06	0,05	0,04
M2	1,00	0,61	0,28	0,16	0,08	0,05	0,05	0,05
M3	1,00	0,52	0,24	0,14	0,07	0,05	0,05	0,04

A temperatura da chapa não sofreu variação significativa com a mudança de espessura, atribuído a elevada condutividade térmica do aço e as dimensões reduzidas da espessura da chapa. No modelo de cálculo da NBR 14323 (ABNT, 2013), somente a geometria do modelo de chapa influencia na variação da temperatura, sendo que ela é

igual para todas as espessuras de um mesmo modelo. Este procedimento foi confirmado com a verificação no Ansys, pois a variação não ultrapassa 1% entre espessuras.

Correlacionando as variáveis que influenciam na resistência da laje em altas temperaturas (geometria da chapa e a espessura da camada de concreto) e fazendo uma média em função destes valores com a espessura da chapa, pode-se afirmar que as diferenças de temperatura em função da geometria são mais significativas nas menores espessuras de concreto, diminuindo conforme o aumento da espessura, conforme ilustrado no gráfico da Figura 6. Apesar disto, sempre apontando a vantagem do modelo M3 em relação aos outros modelos. Com o aumento do TRRF, a diferença de temperatura relativa a espessura da camada de concreto vai diminuindo.

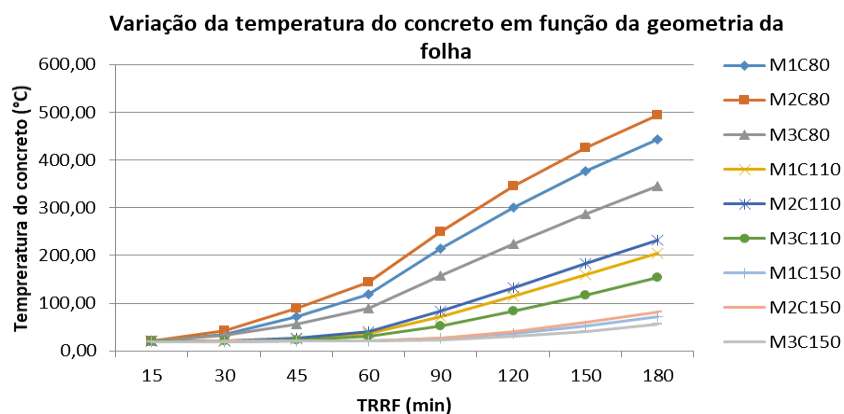


Figura 6 - Variação da temperatura do concreto em função da geometria da chapa

O modelo M1 tem uma geometria semelhante ao modelo M2 conforme mostram as Figuras 7 e 8, o que faz com que a variação de temperatura entre estes dois modelos seja menor. A variação mais significativa é entre a geometria do modelo M2 e do modelo M3, sendo que o primeiro tem sempre a maior temperatura e o segundo a menor temperatura entre os modelos estudados. Isto se deve ao fato de que a geometria do modelo M2 expõe mais a sua mesa superior, facilitando com que a temperatura atinja valores mais altos no concreto. A geometria do modelo M3 é com reentrâncias, o que permite que o calor se concentre na mesa inferior da chapa e dificulta o acesso do ar quente na mesa superior, conforme mostra a Figura 9. As isotermas mostram também a forma como a temperatura avança nas lajes, sendo que no modelo M3 elas se comportam de forma constante, formando linhas retas, enquanto nos outros dois modelos elas formam ondas.

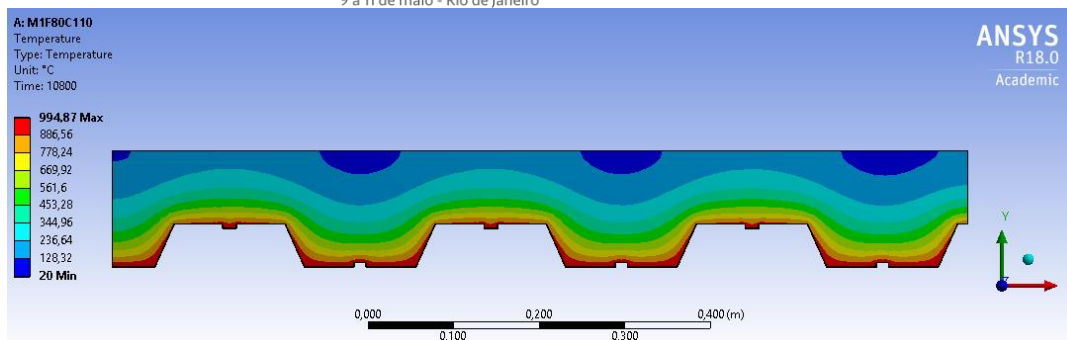


Figura 7 – M1F80C110 com TRRF de 180 minutos

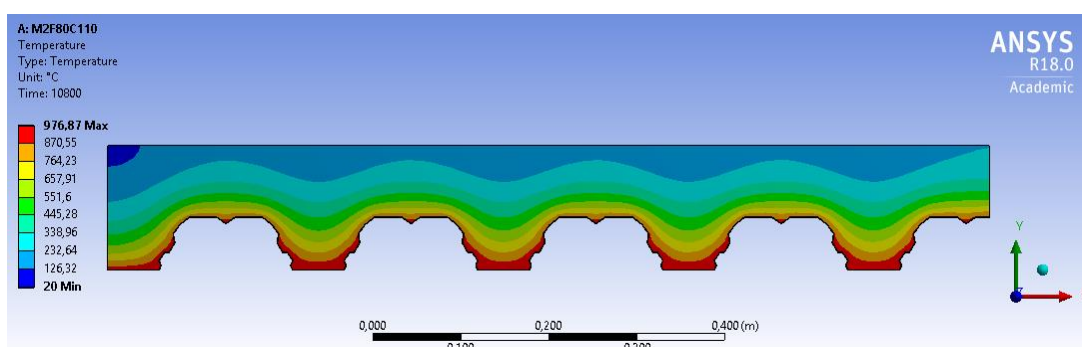


Figura 8 – M2F80C110 com TRRF de 180 minutos

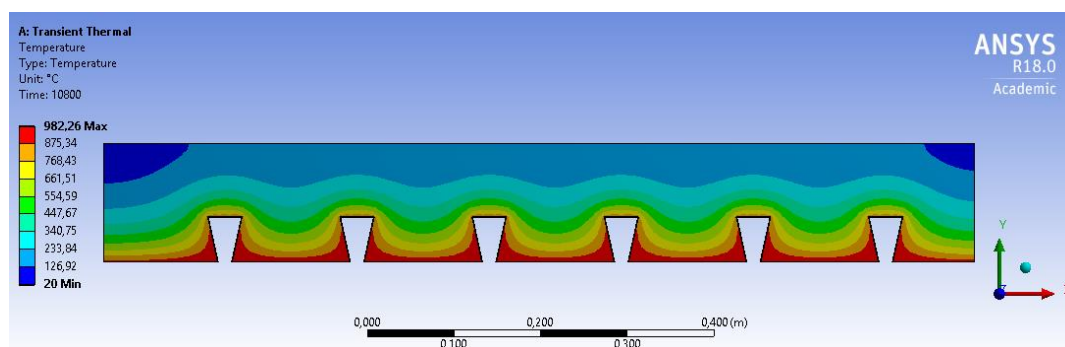


Figura 9 – M3F80C110 com TRRF de 180 minutos

Conclusão

A variável que mais influenciou a temperatura foi a geometria da folha de aço, com o modelo M3, com reentrâncias, tendo o melhor desempenho entre os estudados. Isto se deve a maior área de aço unitária destes elementos, e maior consumo de concreto – de maior estabilidade térmica – nas nervuras.

A espessura efetiva da camada de concreto também se mostrou influente. Pelo concreto ter condutividade térmica baixa, quanto maior sua espessura menor foi a temperatura da parcela resistente à compressão da laje, local onde o concreto

efetivamente atua no momento resistente. O inconveniente desta solução é o aumento do peso da estrutura.

A partir dos 30 minutos de exposição ao incêndio, o coeficiente de redução da folha de aço mostra que a mesma não tem mais participação estrutural, deixando o concreto não armado submetido à flexão. Sendo assim, nas análises numéricas concebidas com base nas equações normativas, é necessária a utilização de armadura positiva para evitar a ruptura brusca do concreto em altas temperaturas. Todavia, os estudos experimentais têm nos mostrado que estas lajes possuem uma resistência ao fogo intrínseca, haja visto o efeito de membrana que se forma, difícil de ser previsto numericamente.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8800: Projeto de Estruturas De Aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

CRAVEIRO, Hélder David da Silva. Análise do comportamento estrutural de lajes mistas aço-betão com reforço transversal. 2010. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na Especialidade de Mecânica Estrutural) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra, Coimbra, 2010.

LI, Guoqiang; WANG, Peijun. Advanced Analysis and Design for Fire Safety of Steel Structures. China: Zhejiang University Press, Springer, 2013.

LIANG, Qing Quan. Analysis and Design of Steel and Composite Structures. New York: CRC Press, 2015.

VARGAS, Mauri Resende; SILVA, Valdir Pignatta e. Resistência ao fogo das estruturas de aço. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

LI, G.; ZHANG, N.; JIANG, J. Experimental investigation on thermal and mechanical behaviour of composite floors exposed to standard fire. Fire Safety Journal. n. 89, p. 63-76, 2017.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; PIGNATTA, V. O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 44., 2002. Anais eletrônicos... Belo Horizonte: IBRACON, 2002.

WANG, Y. C. Steel and Composite Structures: Behaviour and Design for Fire Safety. 1 ed. London: Rolla Press, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (EN), EN 1994-1-2: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – structural fire design: Eurocode 4. Bruxelas, 2005.