



Avaliação Numérica do Comportamento Térmico de Lajes Lisas Protendidas Expostas a Incêndios com Hidrocarbonetos

Gabriela Dalfollo Brackmann¹, René Quispe Rodríguez²

¹ Doutoranda em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, gabrielabrackmann@gmail.com

² Professor Doutor, Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia Mecânica, rene.rodriguez@ufsm.br

Resumo

As prescrições de dimensões mínimas do Método Tabular da ABNT NBR 15200 (2024) se destinam apenas as lajes expostas à curva de aquecimento-padrão da ISO 834 (1999). Entretanto, as lajes lisas protendidas já são amplamente utilizadas em diversas tipologias construtivas que possuem ocupações e usos variados, sendo assim expostas ao risco de incêndio com materiais combustíveis diversos, entre eles os hidrocarbonetos. Desse modo, torna-se importante verificar a aplicabilidade das prescrições da ABNT NBR 15200 (2024) quando lajes lisas protendidas são expostas à curva de incêndio de hidrocarbonetos. A modelagem computacional, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), tem sido muito utilizada no estudo do comportamento de elementos estruturais em situação de incêndio. Nesse sentido, o presente trabalho se propõe a desenvolver um modelo numérico, no programa computacional ABAQUS, que simule o comportamento térmico de lajes lisas protendidas submetidas a incêndios com hidrocarbonetos, a fim de verificar a aplicabilidade das prescrições de dimensões mínimas do Método Tabular da ABNT NBR 15200 (2024). Para realizar esta análise foi utilizado um modelo numérico já validado, simulando-se a exposição de uma laje lisa protendida a um incêndio com hidrocarbonetos durante 240 minutos. Foram analisadas a evolução da temperatura com o tempo nas posições da face quente, eixo dos cabos de protensão, meia altura da laje e face fria. A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que as prescrições do Método Tabular sobre a distância c_1 são insuficientes para limitar a temperatura máxima dos cabos de protensão em 350°C durante a exposição à curva de hidrocarbonetos. Para tanto, seria necessário aumentar os valores de c_1 recomendados pela normativa em 10 mm para tempos de aquecimento de 90 e 120 minutos. Não foi possível determinar os valores de c_1 necessários para tempos de exposição maiores devido às características geométricas do modelo desenvolvido.

Palavras-chave

Análise numérica; comportamento térmico; lajes lisas protendidas; modelo em elementos finitos, hidrocarbonetos.

1. Introdução

Para compreender o comportamento das estruturas expostas às altas temperaturas é necessário conhecer as características do cenário de incêndio à que os elementos estruturais estão submetidos, sendo a principal delas a curva que descreve a variação da temperatura em função do tempo. A partir da temperatura máxima atingida pelos gases do ambiente pode-se estimar a temperatura máxima experimentada pelos elementos estruturais, o que torna possível analisar a capacidade resistente da estrutura em situação de incêndio, bem como avaliar a capacidade resistente residual pós-incêndio.

Para facilitar os procedimentos de ensaios de resistência ao fogo e projeto de estruturas, convencionou-se adotar incêndios padronizados, nos quais a elevação da temperatura em função do tempo é representada por uma equação ou tabela, e cuja aplicação é direta e generalizada a qualquer compartimento, independente do cenário de incêndio (COSTA, 2008). Para materiais celulósicos a ABNT NBR 14432 (2001), a ABNT NBR 16965 (2021) e o Eurocode 1 (EN 1991-1-2, 2002) recomendam a utilização da curva de incêndio-padrão da ISO 834 (1999) para determinar a resistência ao fogo de elementos estruturais. A elevação da temperatura em função do tempo é dada pela Equação (1). Para incêndios que envolvam a queima de hidrocarbonetos, o Eurocode 1 (EN 1991-1-2, 2002) apresenta a "Curva H", cujo aumento da temperatura com o tempo é obtido com a Equação (2), que tem origem na curva de incêndio de hidrocarbonetos da ASTM Test Method E1529 (1993).

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1), \quad (1)$$

$$\theta_g = \theta_0 + 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}), \quad (2)$$

sendo: t = tempo (min); θ_g = temperatura dos gases (°C) no instante t ; e θ_0 = temperatura do ambiente (°C) antes do início do aquecimento.

Para avaliar a influência do regime de aquecimento no desempenho estrutural de lajes lisas, Hawileh e Kodur (2018) desenvolveram um modelo em elementos finitos para simular o comportamento termomecânico de lajes lisas em concreto armado. Foram realizadas análises paramétricas considerando a exposição das lajes à diferentes cenários de incêndio, que incluíram as curvas-padrão de aquecimento da ISO 834 (1999) e de hidrocarbonetos (ASTM E1529, 1993). Hawileh e Kodur (2018) destacaram que o critério de falha determinante para as lajes submetidas ao incêndio de hidrocarbonetos foi a deflexão máxima no meio do vão ($l/20$). Dessa forma, os critérios de falha convencionais relacionados à temperatura, como a temperatura máxima da armadura e da face não-exposta ao fogo, poderiam não ser adequados para determinar a falha dessas lajes em incêndios com hidrocarbonetos. Além disso, os cobrimentos exigidos pelas normas atuais podem não ser suficientes para garantir um Tempo de Resistência ao Fogo (TRF) adequado para lajes expostas à incêndios com hidrocarbonetos, uma vez que as prescrições normativas atuais se baseiam em curvas de incêndio-padrão para materiais celulósicos, como a ISO 834 (1999).

No caso da ABNT NBR 15200 (2024), as prescrições de dimensões mínimas do Método Tabular se destinam apenas às lajes expostas a curva de aquecimento-padrão da ISO 834 (1999). Entretanto, é necessário levar em consideração o risco de incêndio com hidrocarbonetos a que esses elementos serão expostos, visto que as lajes lisas protendidas são largamente utilizadas em diversas tipologias construtivas que possuem ocupações e usos variados. Incêndios com queima de hidrocarbonetos podem envolver o gás natural (metano), usado para abastecer residências e veículos; o gás de cozinha (propano e butano); a gasolina; o diesel; o querosene; *etc.*, todos combustíveis de uso comum.

Desse modo, o presente trabalho se propõe a desenvolver um modelo numérico que simule o comportamento térmico de lajes lisas protendidas submetidas a incêndios com hidrocarbonetos, a fim de verificar a aplicabilidade das prescrições de dimensões mínimas do Método Tabular da ABNT NBR 15200 (2024). Para realizar esta análise será utilizado um modelo numérico já validado, simulando-se a exposição de uma laje lisa protendida a um incêndio com hidrocarbonetos durante 240 minutos. Serão analisadas a evolução da temperatura com o tempo nas posições da face quente, eixo dos cabos de protensão, meia altura da laje e face fria. O tempo de resistência ao fogo das lajes será determinado conforme os critérios detalhados na seção 2.3.

2. Metodologia de análise e modelagem

2.1 Programa experimental de referência

Como referência para validar o modelo térmico foi utilizado o programa experimental conduzido por Ali *et al.* (2011), em que foram ensaiadas lajes lisas em concreto armado com 1,20 m de largura, 3,30 m de comprimento total, 3,00 m de vão entre apoios, 20 cm de espessura e cobrimento de 40 mm. A armadura principal das lajes consistiu em 6 barras de 12 mm espaçadas em 22 cm, e a armadura secundária em 13 barras de 10 mm, espaçadas em 30 cm. As lajes foram submetidas a dois regimes de aquecimento: a curva de aquecimento da ISO 834 (1999) e a curva de incêndio de hidrocarbonetos. Apenas a face inferior da laje, no vão central de 3,00 m, foi exposta ao aquecimento. As temperaturas desenvolvidas na seção transversal foram monitoradas em três profundidades: na superfície exposta (face quente), na posição da armadura passiva (situada a uma distância de 40 mm da superfície exposta ao aquecimento), e na meia altura da laje (100 mm da superfície exposta).

2.2 Descrição dos modelos numéricos desenvolvidos

Para representar a laje de concreto, as barras de aço da armadura passiva, os cabos de protensão e as placas de ancoragem foi utilizado o elemento sólido linear tridimensional de transferência de calor de 8 nós DC3D8, disponível no programa ABAQUS. Apenas um quarto das lajes foi modelado pois foi utilizada a técnica de simetria nas duas direções para otimizar o esforço computacional. Nenhuma condição de contorno ou restrição foi definida nos planos de simetria, uma vez que não pode haver fluxo de calor através do plano simétrico.

A temperatura no ambiente antes do início do aquecimento foi inserida no modelo numérico em um passo inicial, de acordo com a temperatura medida no programa experimental. Na face inferior das lajes foi aplicada uma curva de aquecimento que, na fase de validação dos modelos, consistiu na curva de elevação da temperatura do forno que consta nos resultados experimentais de Ali *et al.* (2011).

Como mecanismos de transferência de calor entre as chamas e a laje, e da laje para o ambiente, foram considerados a convecção e a radiação. Os coeficientes de transferência de calor por convecção utilizados nos modelos foram extraídos do Eurocode 1 (2002), sendo iguais a 25 e 50 W/m².K para a face exposta da laje à curva ISO 834 (1999) e à curva de hidrocarbonetos, respectivamente, e igual a 4 W/m².K para a face não-exposta da laje em ambos os regimes de aquecimento. A transferência de calor por radiação foi incorporada no modelo por meio da emissividade do concreto e da constante de Stefan-Boltzmann. De acordo com o Eurocode 1 (2002) a constante de Stefan-Boltzmann é equivalente a 5,67.10⁻⁸ W/m².K⁴ e, para a emissividade, foi utilizado o valor de 0,7 para as duas faces da laje, seguindo a recomendação do Eurocode 2 (2004).

Para analisar a resposta térmica das lajes foi realizada uma análise térmica transiente para o aumento da temperatura e as propriedades termofísicas dos materiais foram inseridas no modelo numérico. Para o aço considerou-se o calor específico e a condutividade térmica variando com a temperatura, conforme o Eurocode 2 (2004), enquanto a densidade do material foi considerada constante e independente da temperatura. Para a condutividade térmica do concreto foi utilizado o limite superior até o concreto atingir 140°C e depois o limite inferior, como recomendado pelo Apêndice Francês do Eurocode 2 (2004). A densidade do concreto variou com a temperatura de acordo com o Eurocode 2 (2004). O calor específico do concreto foi considerado como constante, independente do teor de umidade do material e do aumento da temperatura, e igual a 1100 J/kg°C.

2.2.1 Laje lisa em concreto armado

A Figura 1 apresenta a geometria das armaduras passivas, que foram modeladas considerando o diâmetro real das barras e cujo posicionamento seguiu o detalhado por Ali *et al.* (2011). As dimensões dos elementos finitos foram definidas após uma análise de convergência da malha, partindo-se de uma malha com elementos de dimensão aproximada de 25 mm (*mesh seed*). A Figura 2 ilustra a configuração final da malha do modelo. Nas regiões próximas às barras da armadura passiva a malha foi refinada de modo a melhorar a convergência do modelo (detalhe na Figura 2). Ao final desse processo, a malha de elementos finitos totalizou 53.872 elementos e 59.273 nós.

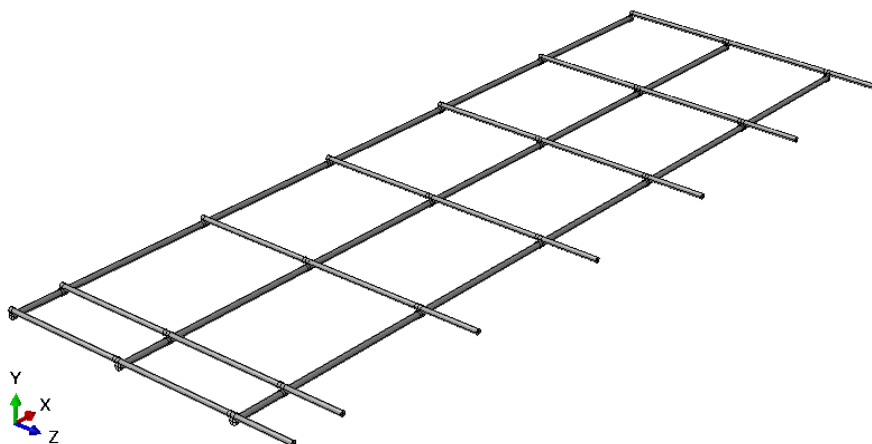


Figura 1 – Geometria da armadura passiva.

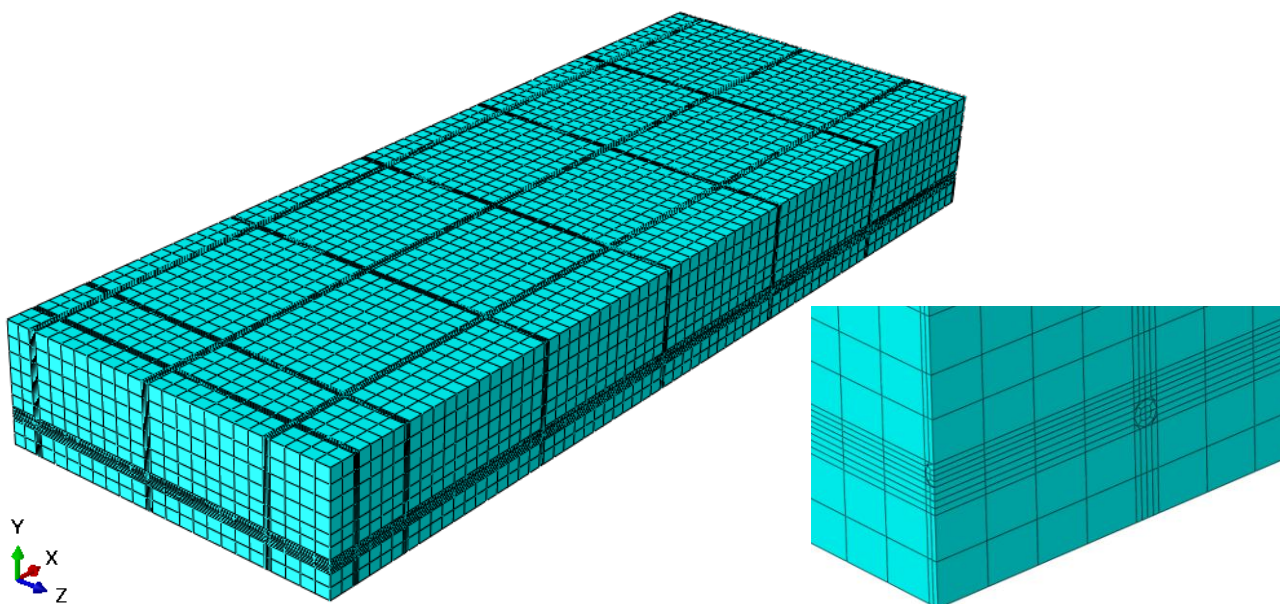


Figura 2 – Malha em elementos finitos da laje lisa em concreto armado e detalhe do refinamento da malha na região das armaduras passivas.

2.2.2 Laje lisa protendida

A laje lisa protendida modelada possuía 1,60 m de largura, 4,30 m de comprimento e 16 cm de espessura, com três cabos monocordoalha de 15,7 mm de diâmetro, 150 mm² de área, em traçado

parabólico e com cobrimento mínimo dos cabos de 34 mm. Nenhuma armadura passiva de flexão foi utilizada. A Figura 3 apresenta a geometria da laje, na qual a região em cinza simboliza o concreto e as regiões em azul representam os cabos de protensão e as placas de ancoragem. Os cabos de protensão foram inseridos no modelo com seu diâmetro nominal.

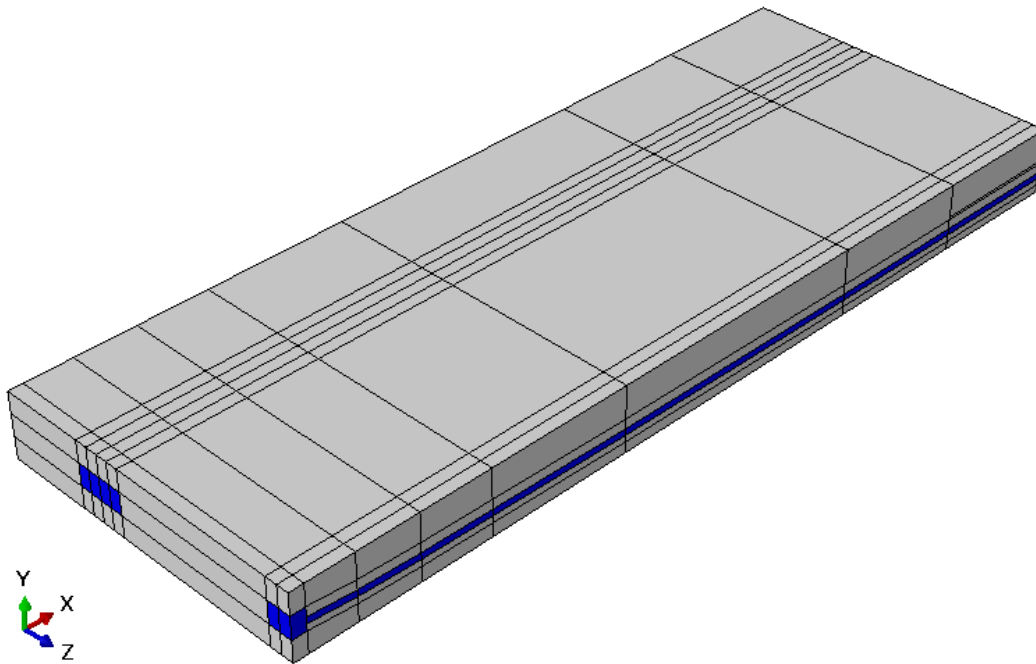


Figura 3 – Geometria da laje de concreto com os cabos de protensão e ancoragens.

O traçado parabólico dos cabos de protensão, somado à presença das placas de ancoragem na extremidade da laje, criaram uma certa complexidade no refinamento da malha em elementos finitos. Devido a geometria dos cabos foi necessário dividir a laje em várias partes, em seções verticais e horizontais, com comprimentos e inclinações compatíveis com a parábola descrita pelos cabos de protensão. Esse processo de refinamento resultou em uma malha em elementos finitos com diferentes dimensões, como pode ser visto na Figura 4. As dimensões dos elementos finitos foram definidas após uma análise de convergência da malha, que totalizou 9.546 elementos e 11.220 nós. Não foi possível testar uma configuração de malha mais refinada pois malhas mais finas apresentaram problemas de incompatibilidade.

2.3 Critérios de avaliação

Considerou-se a ocorrência de falha nas lajes lisas pretendidas quando um dos critérios a seguir fosse atingido:

- a temperatura da face não-exposta aumentar mais de 140°C, na média, em relação à temperatura inicial (ABNT NBR 16965, 2021 e ASTM Test Method E119, 2002);
- a temperatura da face não-exposta aumentar mais de 180°C, em qualquer ponto, em relação à temperatura inicial (ABNT NBR 16965, 2021 e ASTM Test Method E119, 2002);
- a temperatura dos cabos de protensão exceder a temperatura crítica de 350°C (EN 1992-1-2, 2004);
- a temperatura do aço das armaduras passivas exceder a temperatura crítica de 500°C (EN 1992-1-2, 2004).

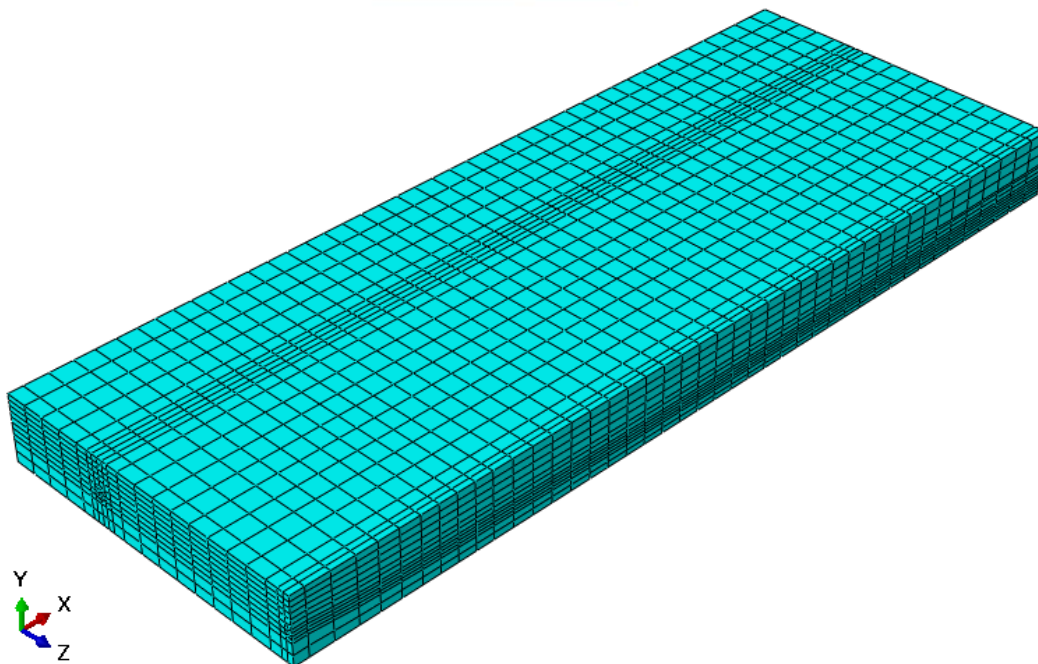


Figura 4 - Malha em elementos finitos da laje lisa protendida.

3. Resultados

3.1 Validação do modelo numérico

3.1.1 Curva ISO 834

O modelo em elementos finitos foi validado com os resultados experimentais de Ali *et al.* (2011) utilizando a laje denominada como "S2". Na laje existiam três pontos de controle da temperatura em função do tempo de aquecimento, referenciadas como "EXP Face quente", "EXP Armadura" e "EXP Meia altura da laje". A variação da temperatura em função do tempo foi extraída do modelo numérico nos mesmos pontos, na seção do meio do vão. Como dado de *input* no modelo foi utilizada a curva temperatura-tempo registrada no forno durante o ensaio da laje S2, que buscou acompanhar a curva ISO 834 (1999) e teve duração total de 60 minutos.

A Figura 5 apresenta as curvas temperatura-tempo medidas experimentalmente (EXP) e as obtidas pelo MEF. De modo geral é possível observar uma boa convergência das curvas em todos os pontos de controle, em especial na meia altura da laje. A Tabela 1 apresenta um comparativo entre as temperaturas obtidas pelo modelo numérico e as temperaturas medidas experimentalmente nos três pontos de controle da laje ao final da fase de aquecimento. Dos dados da tabela nota-se uma boa aproximação dos resultados do modelo numérico com as temperaturas medidas experimentalmente, com uma diferença de 4,61% na face quente e 15,32% na meia altura da laje.

Tabela 1 – Temperaturas obtidas pelos modelos numérico e experimental para a exposição da laje lisa em concreto armado à curva ISO 834.

Posição	Temperatura (°C)		Diferença	
	Modelo Numérico	Experimental	(°C)	(%)
Face quente	907,96	951,80	43,84	4,61
Armadura	169,97	137,30	32,67	23,79
Meia altura da laje	66,68	78,74	12,06	15,32

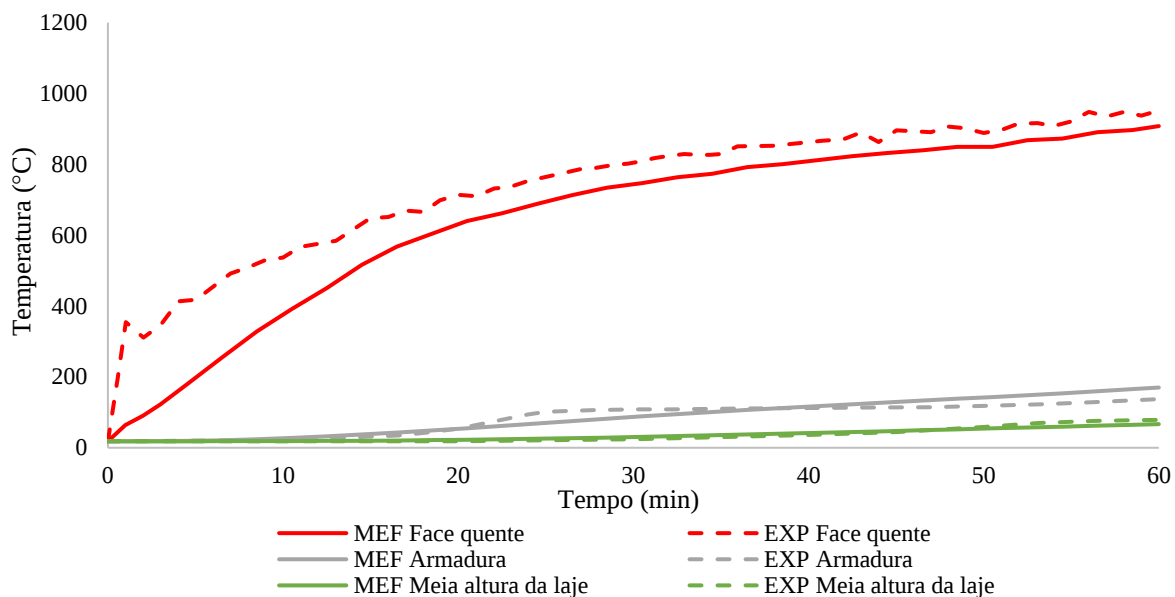


Figura 5 – Curvas temperatura-tempo medidas experimentalmente e previstas pelo modelo numérico para a laje exposta à curva ISO 834.

3.1.2 Curva de Hidrocarbonetos

O modelo em elementos finitos foi validado com os resultados experimentais de Ali *et al.* (2011), utilizando a laje denominada como "S5". Na laje existiam três pontos de controle da temperatura em função do tempo de aquecimento, referenciadas como "EXP Face quente", "EXP Armadura" e "EXP Meia altura da laje". A variação da temperatura em função do tempo foi extraída do modelo numérico nos mesmos pontos na seção do meio do vão. Como dado de *input* no modelo foi utilizada a curva temperatura-tempo registrada no forno durante o ensaio da laje S5, que buscou acompanhar a curva de hidrocarbonetos (ASTM Test Method E1529, 1993) e teve duração total de 60 minutos.

A Figura 6 apresenta as curvas temperatura-tempo medidas experimentalmente (EXP) e as obtidas pelo MEF. De modo geral é possível observar uma boa convergência das curvas em todos os pontos de controle, em especial na armadura passiva e na meia altura da laje. A Tabela 2 apresenta um comparativo entre as temperaturas obtidas pelo modelo numérico e as temperaturas medidas experimentalmente nos três pontos de controle da laje ao final da fase de aquecimento. Dos dados da tabela nota-se uma boa aproximação dos resultados do modelo numérico com as temperaturas medidas experimentalmente, com uma diferença de 3,28% na face quente e 10,26% na posição da armadura passiva.

Tabela 2 – Temperaturas obtidas pelos modelos numérico e experimental para a exposição da laje lisa em concreto armado à curva de hidrocarbonetos.

Posição	Temperatura (°C)		Diferença (°C) (%)	
	Modelo Numérico	Experimental		
Face quente	1072,63	1109,00	36,37	3,28
Armadura	217,55	197,30	20,25	10,26
Meia altura da laje	80,21	92,60	12,39	13,38

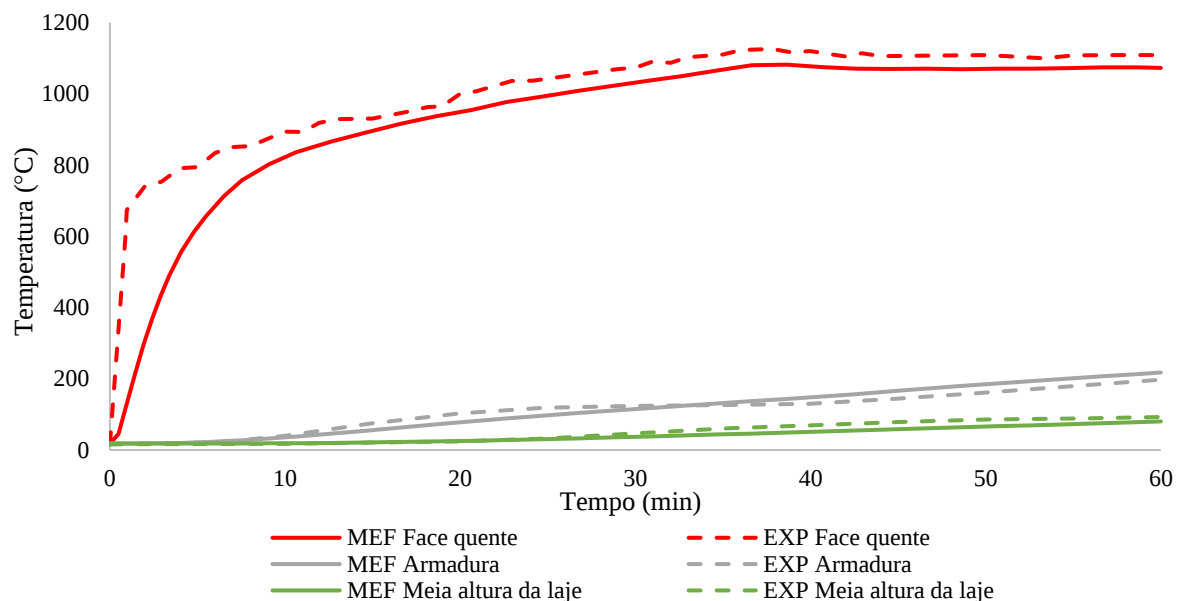


Figura 6 – Curvas temperatura-tempo medidas experimentalmente e previstas pelo modelo numérico para a laje exposta à curva de hidrocarbonetos.

3.2 Verificação da aplicabilidade das prescrições da NBR 15200 para lajes lisas protendidas expostas à curva de hidrocarbonetos

A Figura 7 apresenta as curvas temperatura-tempo previstas pelo modelo em elementos finitos para uma laje lisa protendida submetida à curva de hidrocarbonetos, detalhando a evolução da temperatura nos pontos de controle.

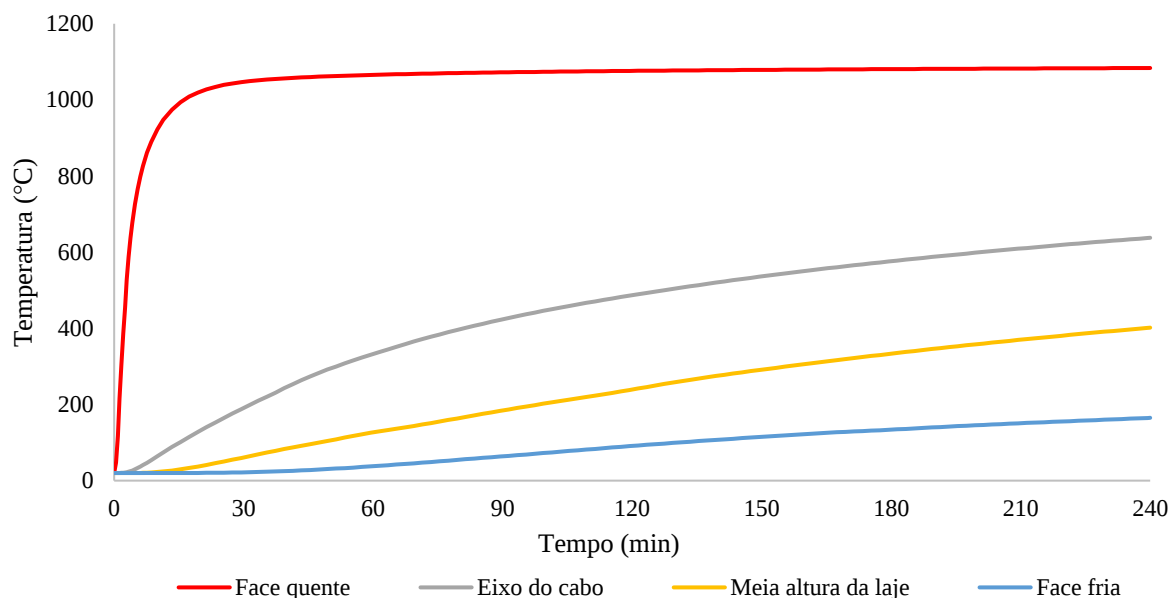


Figura 7 – Curva temperatura-tempo prevista pelo modelo numérico para a laje protendida exposta à curva de hidrocarbonetos.

Os resultados da verificação dos critérios de falha constam na Tabela 3. De acordo com os critérios de falha por isolamento térmica, a falha da laje ocorreu apenas para o tempo de aquecimento de 240 minutos. Considerando o critério que diz respeito à temperatura crítica dos cabos de protensão, houve falha da laje para tempos de aquecimento iguais ou maiores que 90 minutos. A temperatura dos cabos de protensão excederam a temperatura crítica em 21,1% (73,83°C) para 90 min, 39,1% (137,00°C) para 120 min, 64,7% (226,33°C) para 180 min e 82,2% (287,83°C) para 240 min. Dessa forma, de acordo com os critérios de falha verificados na Tabela 3, o TRF da laje simulada é de 65 minutos. A falha é caracterizada pelos cabos de protensão atingindo a temperatura crítica de 350°C. Para suportar tempos maiores de exposição à curva de hidrocarbonetos, a distância c_1 deveria seguir os valores indicados na Tabela 4.

Tabela 3 – Verificação dos critérios de falha.

Tempo de aquecimento (min)	Temperatura do cabo (°C)	Temp. do cabo excedeu a temp. crítica? (S/N)	Temp. aumentou mais que 140°C na média? (S/N)	Temp. aumentou mais que 180°C em algum ponto? (S/N)
30	191,27	N	N	N
60	332,73	N	N	N
90	423,83	S	N	N
120	487,00	S	N	N
180	576,33	S	N*	N
240	637,83	S	S	S*

* Nota: excedeu a temperatura nos apoios, na posição acima das placas de ancoragem.

Tabela 4 – Resultados da análise da distância c_1 .

Tempo de aquecimento (min)	Temperatura do cabo* (°C)	c_1 necessário (mm)
30	191,27	-
60	332,73	-
90	423,83	51
120	487,00	60
180	576,33	> 66
240	637,83	> 66

* Nota: com $c_1 = 42$ mm.

Em relação aos valores mínimos de c_1 recomendados pela ABNT NBR 15200 (2024) para fios e cordoalhas expostos a curva de incêndio-padrão da ISO 834 (1999), a análise do valor de c_1 necessário indicou que, para limitar a temperatura máxima dos cabos em 350°C durante a exposição à curva de hidrocarbonetos, seria necessário aumentar os valores de c_1 recomendados pela normativa em 10 mm, para tempos de aquecimento de 90 e 120 minutos. Para tempos de exposição maiores não foi possível determinar os valores de c_1 necessários devido às características geométricas do modelo desenvolvido. Para a obtenção desses dados seria preciso realizar novas simulações numéricas.

4. Conclusões

As análises realizadas com o modelo numérico desenvolvido nesse trabalho levam às seguintes conclusões:

- as prescrições de espessuras mínimas para lajes lisas que constam no Método Tabular da ABNT NBR 15200 (2024) cumpriram os critérios de isolamento térmica da ABNT NBR 16965 (2021) durante a exposição à curva de hidrocarbonetos;
- o critério de falha relativo à temperatura crítica dos cabos de protensão foi decisivo em determinar a falha da laje, cujo TRF foi de 65 minutos;
- em relação aos valores mínimos de c_1 recomendados pela ABNT NBR 15200 (2024) para fios e cordoalhas, a análise do valor de c_1 necessário indicou que, para limitar a temperatura máxima dos cabos em 350°C durante a exposição à curva de hidrocarbonetos, seria necessário aumentar os valores de c_1 recomendados pela normativa em 10 mm, para tempos de aquecimento de 90 e 120 minutos;
- para tempos de exposição maiores não foi possível determinar os valores de c_1 necessários devido às características geométricas do modelo desenvolvido. Para a obtenção desses dados seria preciso realizar novas simulações numéricas.

Referências

- ALI, F.; NADJAI, A.; ABU-TAIR, A. Explosive spalling of normal strength concrete slabs subjected to severe fire. *Materials and Structures*, v.44, p. 943-956, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16965: Ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos – Diretrizes gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASTM TEST METHOD E119. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, 2002.
- ASTM TEST METHOD E1529. Standard Test Methods for Determining Effects of Large Hydrocarbon Pool Fires on Structural Members and Assemblies. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, 1993.
- COSTA, C. N. Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- EN 1991-1-2. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General rules – Actions on structures exposed to fire. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
- EN 1992-1-2. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- HAWILEH, R. A.; KODUR, V. K. R. Performance of reinforced concrete slabs under hydrocarbon fire exposure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 77, p. 177-187, 2018.
- ISO 834-1-1999. Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part I: General requirement. International Organization for Standardization: Geneva, 1999.