

# Análise de lajes unidirecionais em situações de incêndio

Cecília Rios Ferreira de Paula (1); Vanessa Cristina de Castilho (2)

(1) *Graduanda do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia; [ceciliariosfp@hotmail.com](mailto:ceciliariosfp@hotmail.com)*

(2) *Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia; [vanessa.castilho@ufu.br](mailto:vanessa.castilho@ufu.br)*

## RESUMO

Os elementos estruturais que compõem um edifício estão sujeitos a variações de temperatura, sejam elas as que ocorrem ao decorrer do dia, ou em casos extremos quando o edifício é exposto à um incêndio. Nesse caso, os elementos são expostos a temperaturas extremas, e suas propriedades físicas, químicas e mecânicas são alteradas, causando instabilidade da estrutura, e em casos mais severos, o colapso. Desta forma, o presente estudo foi realizado com o objetivo de analisar o comportamento de lajes maciças do concreto armado, com diferentes condições de contorno e cobrimentos nominais, expostas à altas temperaturas, simulando um incêndio. Por meio do programa computacional ANSYS WORKBENCH, que utiliza o Métodos dos Elementos Finitos, foram modeladas e analisadas um total de oito lajes. A partir dos resultados obtidos verifica-se que o cobrimento e as condições de contorno alteram valores de deslocamento sob o incêndio.

**Palavras-chave:** Análise térmica, Análise termo-estrutural, Deslocamentos, Incêndio, ANSYS.

## ABSTRACT

The structural elements that make up a building are subject to temperature variations, whether they occur during the day, or in extreme cases when the building is exposed to a fire. In this case, the elements are exposed to extreme temperatures, and their physical, chemical and mechanical properties are altered, causing instability of the structure, and in more severe cases, collapse. Thus, the present study was carried out with the objective of analyzing the behavior of solid slabs of reinforced concrete, with different boundary conditions and nominal coverings, exposed to high temperatures, simulating a fire. Through the computer program ANSYS WORKBENCH, which uses Finite Element Methods, a total of eight slabs were modeled and analyzed. Based on the results obtained, it can be seen that cover and boundary conditions alter displacement values under fire.

**Key-words:** Thermal analysis, Thermo-structural analysis, Displacements, Fire, ANSYS.

# 1. INTRODUÇÃO

Estudos do comportamento de estruturas sobre ação do fogo são motivados pela perda de resistência da estrutura devido ao colapso causado pelo incêndio. Normalmente ensaios experimentais isolados têm fornecido informações importantes a fim de melhor entender a condição térmica em que as estruturas podem ser submetidas ao longo de sua vida útil. Vários estudos desenvolvidos no Brasil e internacionalmente mostram a importância do entendimento melhor do problema (VIEIRA e COELHO, 2020; PIERIN e SILVA, 2014; KADA et al, 2015).

O efeito de temperatura em condições normais gera dilatação e retração da estrutura, porém, em situações extremas como um incêndio além dos efeitos de dilatação há alterações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos elementos estruturais.

A alteração do módulo de elasticidade do material que compõe a estrutura, além da redução da sua resistência e rigidez são consequências da exposição do mesmo a altas temperaturas. No Brasil, as estruturas de concreto armado e aço são as mais utilizadas, portanto é importante ressaltar que em conjunto das alterações listadas acima, as reações químicas que ocorrem no concreto durante um incêndio também devem ser consideradas. Outro fator que deve se observar é o surgimento de novos esforços internos e deslocamentos às vezes excessivos que podem produzir torção, flechas não previstas e até mesmo redução da área da seção transversal nos elementos estruturais.

Os deslocamentos excessivos nas diversas estruturas podem ocorrer quando estão sob efeito do incêndio. Sendo assim, é de extrema importância avaliar se estes deslocamentos não ultrapassam o que foi delimitado pelas normas, a fim de garantir a estabilidade e segurança da estrutura (ABNT NBR 6118:2014).

As estruturas em concreto, sob o efeito do incêndio, apresentam perdas significativas de resistência e de diminuição da seção transversal (ABNT NBR 14432:2001). Assim, nesses elementos podem ocorrer o *spalling*, que são deslocamentos da porção de concreto que deixam a armadura exposta à ação térmica, podendo, rapidamente, acarretar a ruína da estrutura (GOMIDE, 2009). Um dos elementos estruturais suscetíveis a estes deslocamentos principalmente pela sua pequena espessura é a laje de concreto armado. Desta forma, o cobrimento adotado para a armadura nesses elementos podem afetar seu comportamento diante do incêndio.

As lajes são elementos estruturais que se assemelham a uma placa, uma vez que duas de suas dimensões (comprimento e largura) apresentam valores maiores que a terceira dimensão (espessura). As mesmas, são responsáveis por distribuir os esforços como peso próprio, carregamentos concentrados e distribuídos considerados em projetos para as vigas. Além disso, outras funções que uma laje pode desempenhar é a vedação térmica e acústica quando executadas com essa finalidade e a função de proteção, uma vez que é o elemento estrutural que impede, até certo momento, o incêndio de se propagar para o pavimento superior.

Atualmente no mercado da construção civil há diversos tipos de lajes, como por exemplo, as lajes nervuradas, treliçadas, pré-fabricadas, alveolares, cogumelo, protendidas e as lajes maciças. É importante ressaltar que cada tipo de laje apresenta características como peso próprio, modo de distribuição dos esforços, método de execução podendo apresentar características vantajosas, ou não, para a obra.

A compreensão da forma em que ocorre a distribuição e a solicitação de esforços na laje é importante para dimensionar e detalhar o elemento estrutural. Portanto, os valores adotados para a resistência do

concreto à compressão e a quantidade de armadura positiva ou negativa estão relacionados aos valores obtidos dos esforços atuantes e podem afetar seu comportamento diante a ação térmica.

Desta forma, este trabalho, irá avaliar o comportamento termo-estrutural de uma laje maciça unidirecional em situação de incêndio por meio do programa ANSYS WORKBENCH para dois tipos de condições de contorno e dois tipos de cobrimento. Além da situação de incêndio, a laje está submetida a uma pressão e ao peso próprio atuando concomitantemente. Deve-se ressaltar que a densidade, o módulo de elasticidade, a condutividade térmica e o calor específico foram considerados em função da temperatura.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Incêndio**

O incêndio é um processo que pode ser gerado devido à vários fatores como falhas ou sobrecarga das instalações elétricas do edifício, vazamento de gás, acidentes domésticos e em alguns casos pode ser caracterizado como incêndio criminoso, quando iniciado propositalmente. Além disso, um estudo da segurança desses elementos perante situações de incêndio deve ser investigado, visto que a estabilidade estrutural do edifício é afetada, podendo levar ao colapso da estrutura (COSTA, 2011).

Para que um incêndio ocorra, são necessários quatro materiais: o combustível, o comburente, o calor e a reação em cadeia. A partir dos quatro elementos citados anteriormente, forma-se a teoria do Tetraedro do Fogo, que consiste em tudo o que é necessário para manter o processo de incêndio. O combustível é uma substância encontrada em qualquer estado físico da matéria e sofrerá oxidação durante o processo de queima, que ocorrerá quando o mesmo entrar em reação com o comburente, substância líquida ou gasosa. Porém para a reação de combustão ser iniciada, é necessária uma energia mínima, que no caso é o calor. Por último, as reações em cadeia serão responsáveis por sustentar o processo de queima, enquanto houver combustível disponível para ser consumido. Sendo assim, a escolha dos materiais que compõe o edifício deve ser pensada de forma a evitar materiais inflamáveis, pois uma vez que iniciado o processo de incêndio, os mesmos servirão como combustível para queima, podendo até influenciar na intensidade do incêndio. Além disso, outras variáveis que influenciarão tanto na intensidade quanto no tempo de incêndio são: a ventilação das partes de estrutura que estão afetadas diretamente pelo fogo e as propriedades térmicas de todos os materiais que compõe a estrutura. Portanto, a preferência por materiais não inflamáveis e com baixa condutividade térmica na composição do edifício, pode garantir maior vedação e conseqüentemente resistência dos elementos estruturais.

#### **2.1.1 Mecanismos de transferência de calor**

Os efeitos que o incêndio gera nos elementos estruturais tem relação com vários fatores, dentre eles a posição de cada elemento e a forma como o calor é transferido. A transferência pode ocorrer de três maneiras, sendo elas a condução, convecção e radiação.

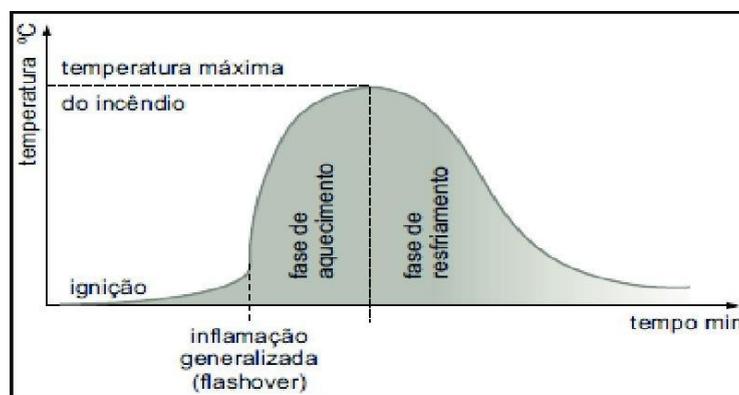
A condução é a transferência de calor devido a agitação das moléculas, sendo que a transferência de energia cinética ocorre sem o deslocamento das moléculas para as moléculas vizinhas. A convecção por sua vez ocorre em fluidos apenas, devido a diferença de densidade entre eles, sendo que nos incêndios está relacionado com os gases envolvidos no processo. Já a radiação, ocorre a partir da transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas, podendo ocorrer até mesmo no vácuo,

uma vez que sua propagação dependerá da natureza e geometria do material apenas.

### 2.1.2 Curvas de incêndio

A curva temperatura-tempo (Figura 1) é uma forma de visualizar as etapas de um incêndio, e é elaborada através de ensaios visando simular situações reais. Segundo Silva (2004), quando se refere ao estudo de estruturas, a principal característica de um incêndio é a curva que fornece a temperatura dos gases quentes em função do tempo de incêndio, uma vez que a partir dela pode-se obter o aumento de temperatura nas peças estruturais e conseqüentemente suas resistências e rigidezes nessas condições.

Figura 1: Curva Temperatura-Tempo Típica de um Incêndio Real



Fonte: VARGAS e SILVA (2005).

A partir da curva temperatura-tempo é possível determinar quatro fases do incêndio, que são ignição, *flashover*, fase de aquecimento e fase de resfriamento. A primeira fase é o início da inflamação seguido por aumento de temperatura, porém não em um nível que possa sequer gerar o colapso da estrutura. O *flashover*, ocorre quando a inflamação já está generalizada, e é o momento em que se atinge as temperaturas mais altas durante o processo de incêndio, seguido pela fase de aquecimento onde todo material combustível sofrerá combustão. É durante o *flashover* e a fase de aquecimento, que haverá mudanças significativas nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos elementos que compõe a estrutura e que estão sujeitos ao fogo. Sendo assim, é durante essas etapas que surgirão novas tensões, além de deformações e deslocamentos, apresentando então risco tanto para a vida humana quanto para a integridade e estabilidade da estrutura. Por último, ocorrerá a fase de resfriamento, que devido à toda queima do material caracterizado como combustível na etapa anterior, as temperaturas diminuirão pois não haverá mais reação de queima.

### 2.1.3 Normas relativas ao dimensionamento e verificação em situações de incêndio

As normas relacionadas a situações de incêndio foram elaboradas inicialmente na Europa após a ocorrência de um amplo incêndio na cidade de Londres. No Brasil, após os incêndios dos edifícios Joelma e Andraus, ambos localizados em São Paulo, no ano de 1975, a Associação Brasileira de Normas Técnicas recebeu a responsabilidade de elaborar normas correlacionando as estruturas e as situações de incêndio. É possível perceber, que a elaboração de normas para essas situações específicas de incêndio são recentes, sendo muitas delas baseadas nas normas europeias.

Nos dias atuais, é possível encontrar nas normas brasileiras as ABNT NBR 14432:2001 e

ABNT NBR 15200:2004 que dizem respeito, respectivamente, a exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações e ao dimensionamento de estruturas de concreto situação de incêndio. As normas europeias que influenciaram na elaboração das normas brasileiras para estruturas em situação de incêndio são EN 1991-1-2:2002, EN 1992-1-2:2004 e EN 1993-1-2:2005.

A norma ABNT NBR 14432:2001 citada anteriormente também é responsável pelas informações de verificação de TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo) que é o tempo mínimo de resistência ao fogo. O cálculo do TRRF é realizado com o intuito de garantir isolamento e estanqueidade da estrutura, para que os ocupantes do edifício tenham tempo suficiente para se retirarem e que o combate ao incêndio seja realizado em segurança, além de evitar danos as edificações vizinhas.

Para o dimensionamento das lajes, a norma ABNT NBR 6118:2014 apresenta recomendações para as armaduras positivas e negativas, seu detalhamento e o cobrimento nominal adotado em função da agressividade do meio em que o edifício é construído, além de outras verificações. A Tabela 1 apresenta os valores das classes de agressividade da norma brasileira para diferentes tipos de elementos. Nesse trabalho foram consideradas as classes de agressividade I e III com o objetivo de visualizar como o cobrimento pode influenciar na resistência do elemento estrutural sob o efeito do incêndio.

Tabela 1: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

<sup>a</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

<sup>b</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.

<sup>c</sup> Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

<sup>d</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

## 2.2 Trabalhos Publicados

Allan *et al* (2013) investigaram o comportamento de lajes unidirecionais de concreto armado expostas ao fogo por meio de diferenças finitas para três parâmetros: o cobrimento nominal, o gesso, e a taxa da sobrecarga do carregamento atuante. O estudo revelou que as lajes ainda são propensas ao colapso e o aumento da espessura do cobrimento do concreto e a presença de reboco levaram ao aumento do tempo máximo de risco. No entanto, a variação na taxa de sobrecarga quase não tem efeito sobre esse tempo.

Souza e Silva (2015) realizaram um estudo sobre as estruturas de concreto em situação de incêndio. O estudo consiste em utilizar normas nacionais e internacionais para apresentar métodos de dimensionamento de elementos estruturais de concreto armado expostos à situação de incêndio. Os *softwares* CAD e TQS foram utilizados com o intuito de verificar a segurança estrutural real, uma vez que os elementos sofreram deformações e deslocamentos devido às altas temperaturas. Através do

estudo citado acima, foi constatado que os métodos simplificados do Eurocode 2 apresentam maior precisão quando comparados aos métodos tabulares.

Delalibera *et al* (2017) desenvolveram em conjunto a análise de lajes maciças em situação de incêndio pelo método tabular da NBR 15200:2012 e pelo método de Hertz. A pesquisa envolve o dimensionamento da laje L1 utilizando os métodos citados acima, uma vez que a mesma já está dimensionada no Estado Limite Último. Os resultados obtidos foram satisfatórios para ambos os métodos uma vez que o momento atuante, principalmente o positivo, foi inferior ao momento resistente.

Filho (2018) avaliou o comportamento de lajes de concreto armado em situação de incêndio por meio de uma análise numérica no *software* ABAQUS sobre os efeitos de temperaturas elevadas em duas lajes de concreto armado. Foram realizadas tanto simulações térmicas quanto mecânicas nos elementos estruturais, com o objetivo de comparar os dados obtidos com resultados experimentais. Foram analisadas duas lajes de concreto armado uni e bidirecional. Os resultados obtidos tanto para análise térmica quanto mecânica, foram satisfatórios uma vez que quando comparados com os resultados experimentais, obteve-se erros menores que 13%.

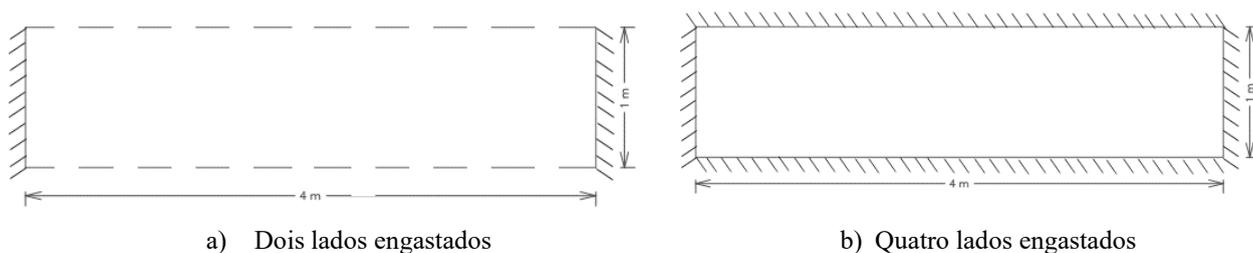
### 3. EXEMPLO NUMÉRICO

O programa ANSYS WORKBENCH foi utilizado no presente estudo para realizar as análises térmicas e estruturais. Foram desenvolvidas no total oito análises de lajes maciças compostas por concreto armado, armadas em uma direção, todas apresentando as dimensões 4,0mx1,0mx0,1m e resistência do concreto à compressão de 28MPa. A armadura das lajes foi adotada com 23 barras de bitola de 8,0mm, espaçadas a cada 18cm igualmente. As dimensões e armadura foram adotadas e adaptadas para o trabalho em questão, tendo como referência o trabalho desenvolvido por Filho (2018) que analisou uma laje unidirecional com os dois lados engastados usando o programa ABAQUS. Os materiais utilizados nas análises estão no regime linear.

Neste trabalho, foram impostas duas condições de contorno diferentes, sendo quatro lajes com dois lados engastados, ambos nas extremidades do vão (Figura 2a). Já as outras quatro lajes apresentam as quatro extremidades com engaste (Figura 2b). No programa utilizado foi considerada a condição de contorno aplicada apenas nas linhas das faces a serem engastadas.

É importante ressaltar que o próprio programa define os elementos finitos com as características adotadas nas simulações. Desta forma, os elementos para a análise térmica foi SOLID90 com 20 nós com grau de liberdade simples que incorpora a temperatura. Na análise estrutural, foi utilizado o SOLID186 para o concreto, com 20 nós tendo 3 graus de liberdade por nó, e REINF264, para a armadura incorporada.

Figura 2: Condições de contorno



Fonte: AUTOR (2023).

Para cada condição de contorno e cobrimento nominal em simulação de incêndio, foram realizadas análises, cuja nomenclatura e significado estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Nomenclatura dos tipos de lajes analisadas

Laje	Cobrimento (cm)	Temperatura (°C)	Apoio (engaste)	Caso
LA2C30T2LE	2	30	2 lados	1
LA2C90T2LE	2	90	2 lados	
LA3,5C30T2LE	3,5	30	2 lados	
LA3,5C90T2LE	3,5	90	2 lados	
LA2C30T4LE	2	30	4 lados	2
LA2C90T4LE	2	90	4 lados	
LA3,5C30T4LE	3,5	30	4 lados	
LA3,5C90T4LE	3,5	90	4 lados	

Fonte: AUTOR (2023).

Tabela 3: Legenda da nomenclatura dos tipos de lajes analisadas

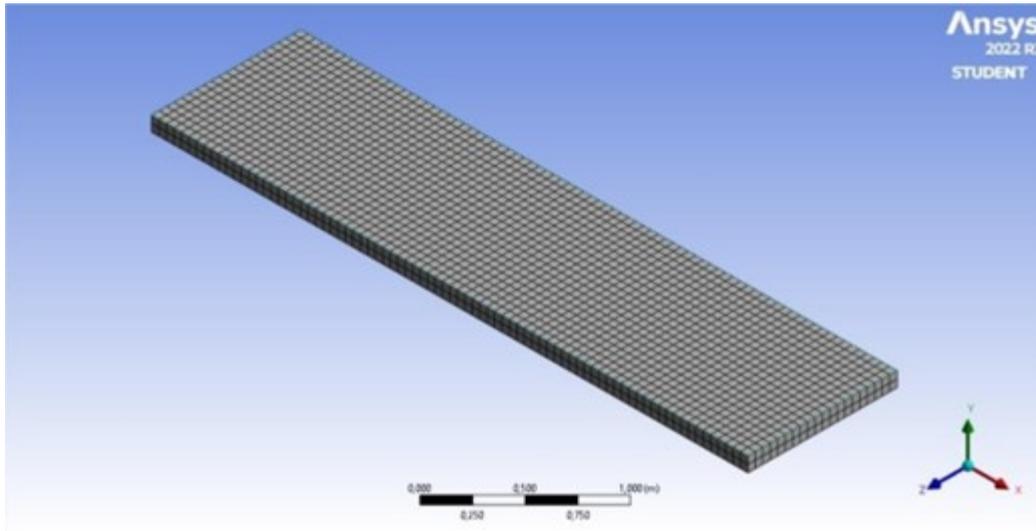
<b>LA</b>	Laje maciça de concreto armado
<b>2C</b>	2 cm de cobrimento nominal
<b>3,5C</b>	3,5 cm de cobrimento nominal
<b>30T</b>	30 min de exposição ao incêndio
<b>90T</b>	90 min de exposição ao incêndio
<b>2LE</b>	2 lados da laje engastados
<b>4LE</b>	4 lados da laje engastados

Fonte: AUTOR (2023).

Inicialmente cada caso foi avaliado através da ferramenta *Transient Thermal* e a partir dos dados obtidos na análise térmica realizou-se a análise mecânica com a ferramenta *Static Structural*. Nesse caso, foi incorporado o carregamento térmico, a força gravitacional e uma pressão de 2kN/m<sup>2</sup> aplicada na face superior da laje com o intuito de verificar deslocamentos nos elementos. Deve-se ressaltar que em todos os casos foi considerado o peso próprio da laje.

A malha dos elementos desenvolvidos no ANSYS WORKBENCH está diretamente relacionada com a precisão dos resultados das análises, uma vez que, quanto mais refinada a malha maior será a precisão que os dados obtidos apresentarão. Porém, deve-se ressaltar que quanto maior for o refinamento da malha, maior será o tempo requerido pelo *software* para realizar a análise. Além disso, em determinado momento o refinamento não gera resultados diferentes, sendo assim, torna-se ineficaz. De acordo com as informações acima, foram testadas as malhas de 0,1m, 0,5m e 0,05m e devido aos resultados apresentados, a malha utilizada em todos os casos foi de 0,05m por apresentar resultados satisfatórios nas análises das lajes. A discretização da laje está apresentada na Figura 3.

Figura 3: Malha da Laje



Fonte: AUTOR (2023).

Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades do aço utilizadas nas análises.

Tabela 4: Propriedades do aço

Propriedades	Aço
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	7850,00
Módulo de Young (Pa)	2x10 <sup>11</sup>
Coefficiente de Poisson	0,3
Coefficiente Secante Isotrópico de Expansão Térmica (°C <sup>-1</sup> )	1,2x10 <sup>-5</sup>
Condutividade Térmica (W/m.°C)	60,500
Calor Específico (J/Kg.°C)	434,00

Fonte: AUTOR (2023).

No caso do concreto, as propriedades utilizadas como a densidade, módulo de elasticidade, condutividade térmica e calor específico apresentam variação em função da temperatura. As propriedades do concreto citadas anteriormente foram, respectivamente, obtidas por meio das Equações 1 a 4 presentes na norma europeia EN 1992-1-2:2004.

$$\rho_c(\theta) = 2354 - \left( \frac{\theta_c}{100} \right) \quad (1)$$

Onde:  $\rho_c(\theta)$  é a densidade em função do tempo em Kg/m<sup>3</sup>;  
 $\theta_c$  é a temperatura em °C.

$$E = Kc^2 \times Ecs \quad (2)$$

Onde: E é o módulo de elasticidade em MPa;

Kc é o coeficiente de redução da resistência à compressão em função da temperatura para agregados calcários dada pela Tabela 5, presente na norma EN 1992-1-2:2004;

Ecs é o módulo secante em MPa.

Tabela 5: Valores do coeficiente de redução da resistência à compressão em função da temperatura  $\theta$  para agregados silicosos e calcários

Temperatura do Concreto (°C)	Agregados Silicosos			Agregados Calcários		
	fck,θ/fck	εc1,θ	εcu1,θ	fck,θ/fck	εc1,θ	εcu1,θ
100	1	0,003	0,02	1	0,003	0,02
200	0,95	0,004	0,023	1	0,004	0,023
300	0,85	0,006	0,025	0,97	0,006	0,025
400	0,75	0,007	0,028	0,91	0,007	0,028
500	0,6	0,01	0,03	0,85	0,01	0,03
600	0,45	0,015	0,033	0,74	0,015	0,033
700	0,3	0,025	0,035	0,6	0,025	0,035
800	0,15	0,025	0,038	0,43	0,025	0,038
900	0,08	0,025	0,04	0,27	0,025	0,04
1000	0,04	0,025	0,043	0,15	0,025	0,043
1100	0,01	0,025	0,045	0,06	0,025	0,045
1200	0	0,025	0,048	0,02	0,025	0,048

Fonte: (CEN, 2004).

$$\lambda_{cn} = 2 - 0,2451 \left( \frac{\theta_c}{100} \right) + 0,0107 \left( \frac{\theta_c^2}{100} \right); \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (3)$$

Onde:  $\lambda_{cn}$  é a condutividade térmica W/m.°C;

$\theta_c$  é a temperatura em °C.

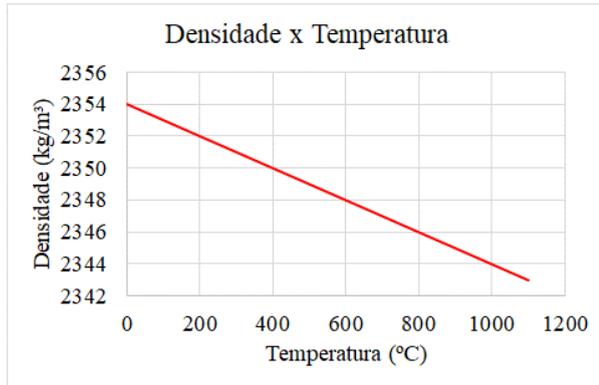
$$c_c = \begin{cases} 900; & \text{para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c < 100^\circ\text{C} \\ 900 + (\theta_c - 100); & \text{para } 100^\circ\text{C} \leq \theta_c < 200^\circ\text{C} \\ 1000 + \left( \frac{\theta_c - 200}{2} \right); & \text{para } 200^\circ\text{C} \leq \theta_c < 400^\circ\text{C} \\ 1100; & \text{para } \theta_c > 400^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

Onde:  $c_c$  é o calor específico em J/kg.°C;

$\theta_c$  é a temperatura em °C.

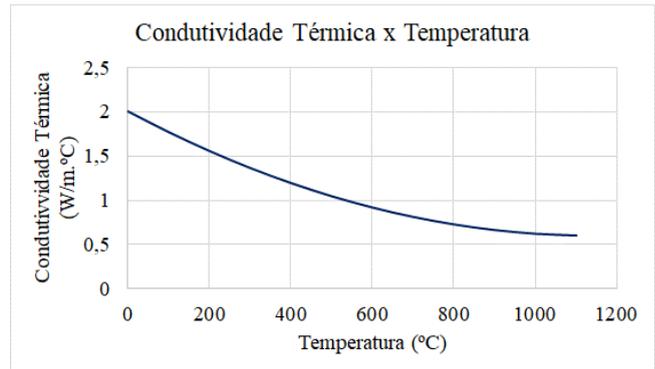
As Figuras 4 a 7 apresentam os gráficos obtidos pelas equações. Para realizar a análise térmica das lajes, foi utilizada a ferramenta *Thermal Transient* disponível no ANSYS WORKBENCH, que incorpora análises em função do tempo. Os períodos de 30 e 90 minutos, e a temperatura inicial de 20°C foram adotadas em todas as análises. A curva de incêndio utilizada neste trabalho foi a de incêndio padrão, como apresentada na Figura 8.

Figura 4: Densidade em função da temperatura



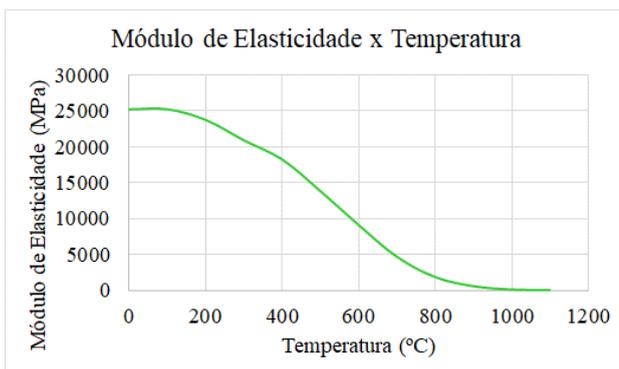
Fonte: (CEN, 2004).

Figura 5: Condutividade térmica em função da temperatura



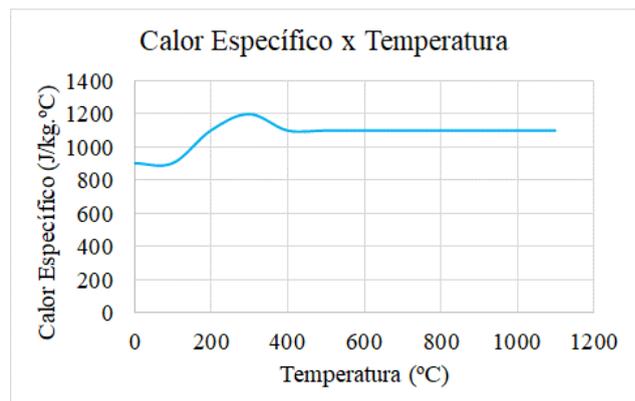
Fonte: (CEN, 2004).

Figura 6: Módulo de elasticidade em função da temperatura



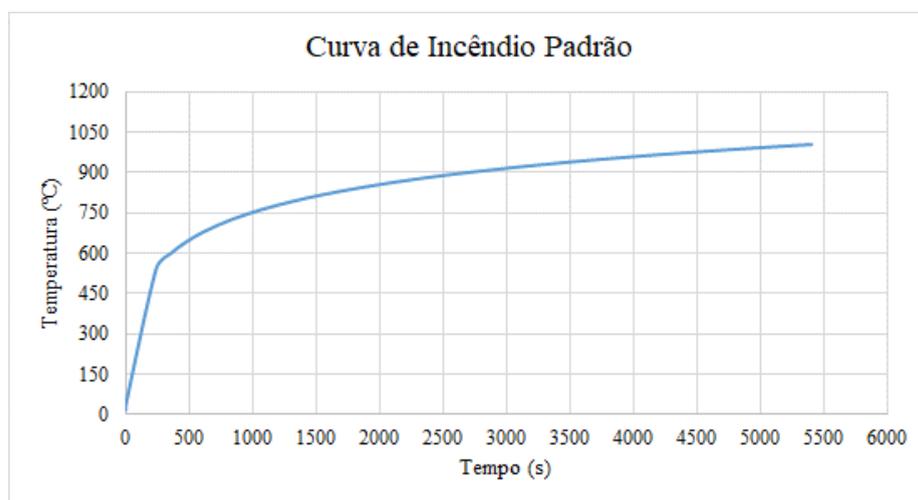
Fonte: (CEN, 2004).

Figura 7: Calor específico em função da temperatura



Fonte: (CEN, 2004).

Figura 8: Curva de Incêndio Padrão



Fonte: (CEN, 2004).

A curva de incêndio padrão foi obtida por meio da Equação 6.

$$\theta = 20 + 345 \times \log_{10}(8t + 1) \quad (6)$$

Onde:  $\theta$  é a temperatura em °C;  $t$  é o tempo em minutos.

As formas de condução de calor utilizadas na análise foram a convecção e a radiação. Na primeira etapa, as mesmas foram aplicadas nas faces em contato direto com o incêndio, ou seja, as duas faces laterais de maior dimensão e a face inferior. Os coeficientes adotados nessa etapa, apresentam valores constantes, sendo a emissividade com valor de 0,7 e transferência de calor de 25 W/m<sup>2</sup>C. O tempo do incêndio varia conforme a curva de incêndio padrão. Já na face superior, tanto a convecção quanto a radiação foram aplicadas com a finalidade de simular a troca de calor com o ambiente. Nesse caso, o coeficiente de transferência de calor foi de 4W/m<sup>2</sup>C, a emissividade foi de 0,7 e a temperatura ambiente foi constante de 20°C.

## 4. RESULTADOS TERMO-ESTRUTURAIS

São apresentados os resultados obtidos de deslocamentos por meio da simulação numérica no ANSYS WOKBENCH para os casos analisados.

### 4.1 Análise Térmica

Para a análise térmica os valores correspondem a evolução da temperatura nas lajes com cobrimento nominal de 20mm e 35mm quando submetidas a exposição da curva de incêndio padrão para 30 e 90 min.

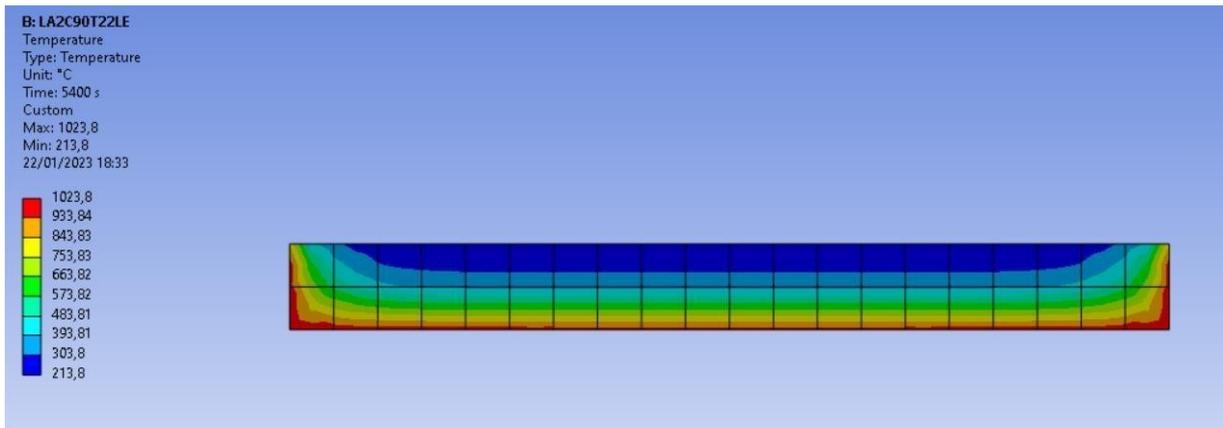
Nas Figuras 9 se 10 são apresentados os valores obtidos da temperatura em função do tempo para 30 min e 90 min, respectivamente, considerando o cobrimento de 20mm.

Figura 9: Temperatura de 30 minutos – cobrimento nominal de 20mm



Fonte: AUTOR (2023).

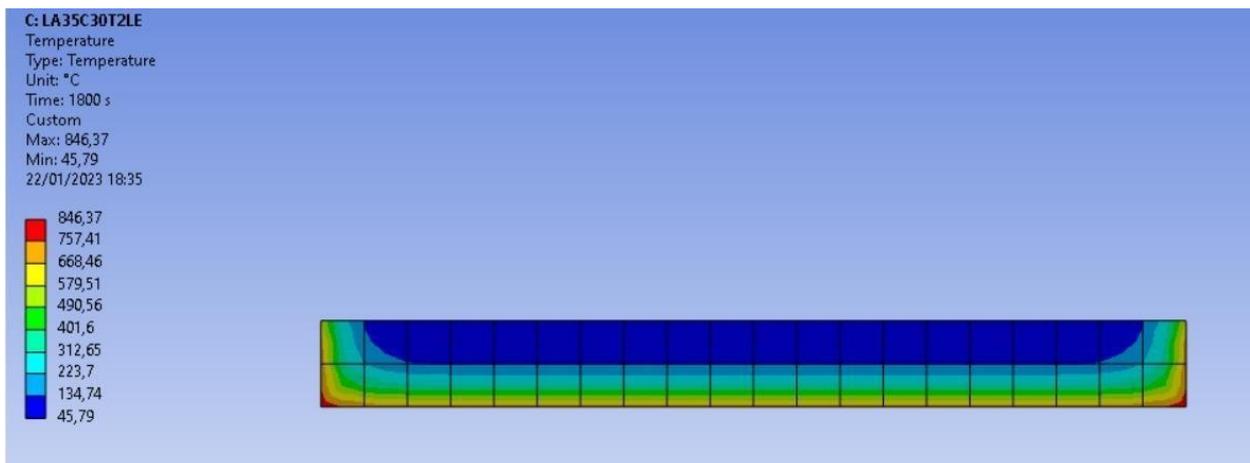
Figura 10: Temperatura de 90 minutos – cobertura nominal de 20mm



Fonte: AUTOR (2023).

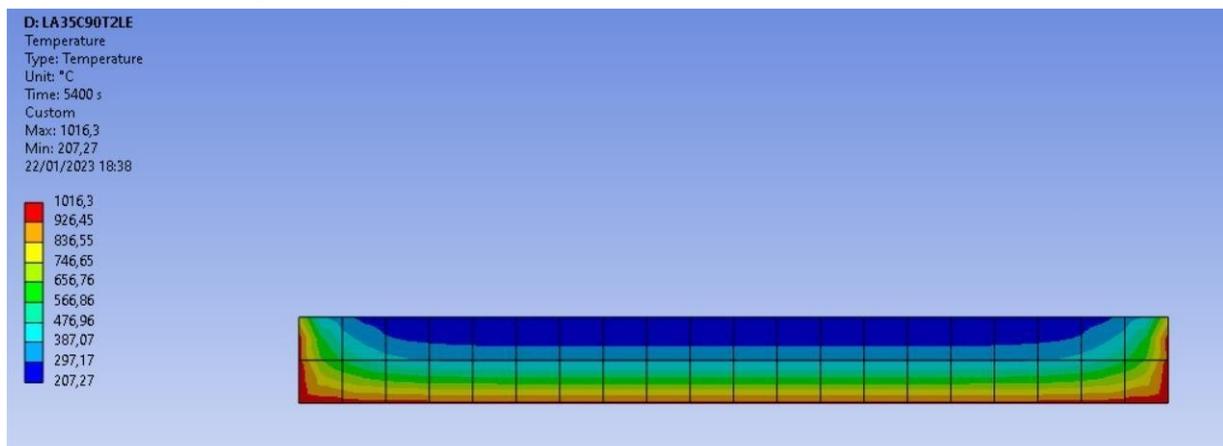
Nas Figuras 11 e 12 são apresentados os valores obtidos da temperatura função do tempo para 30 min e 90 min, respectivamente, considerando o cobrimento de 35 mm.

Figura 11: Temperatura de 30 minutos – cobertura nominal de 35mm



Fonte: AUTOR (2023).

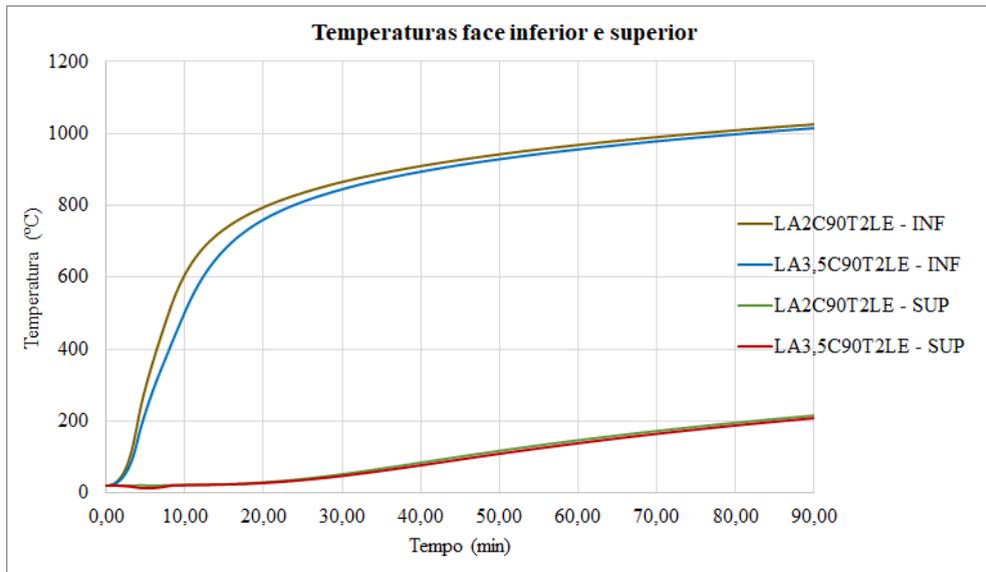
Figura 12: Temperatura de 90 minutos – cobertura nominal de 35mm



Fonte: AUTOR (2023).

Verifica-se que pelos resultados obtidos, os valores finais da temperatura são muito próximos para os dois cobrimentos nominais. O valor da temperatura na face inferior, e sua evolução com o tempo, ao longo da seção transversal para os dois lados engastados pode ser observada pela Figura 13.

Figura 13: Temperatura em função do tempo para as análises



Fonte: AUTOR (2023).

Pela Figura 13 nota-se que a temperatura, na face superior no tempo de 90min em ambos os cobrimentos, possui uma temperatura em torno de 200°C enquanto a face externa chega a uma temperatura de 1000°C. Embora os resultados tenham mostrado que o cobrimento não apresentou resultados significativos para a laje, verificou-se pelo gráfico que em torno de 4min a laje de cobrimento 20mm começa a ter uma temperatura maior que a de 35mm. Entre 4min e 30min a laje com cobrimento de 20mm possui uma temperatura maior que no caso da laje de 35mm. A partir de 30min as duas lajes possuem o mesmo comportamento.

A Tabela 6 apresenta os resultados dos bordos das lajes em função das análises realizadas. Pode-se verificar que os valores obtidos do bordo inferior são bem maiores aos obtidos no bordo superior. Um ponto importante a ressaltar é que as condições de contorno independem da atuação da curva de incêndio aplicada no elemento. Para os dois valores de cobrimento, os resultados da temperatura ficaram bem próximos um do outro. Além disso, vê-se que à medida que o incêndio permanece, os valores da temperatura aumentam em torno de 20%.

Tabela 6: Valores da temperatura nos bordos da laje

Laje	Temperatura (°C)		Tempo (min)
	Bordo inferior	Bordo superior	
LA2C30T2LE	856,79	45,893	30
LA2C90T2LE	1023,8	213,8	90
LA3,5C30T2LE	846,37	45,79	30
LA3,5C90T2LE	1016,3	207,27	90
LA2C30T4LE	856,79	45,885	30
LA2C90T4LE	1023,8	213,8	90
LA3,5C30T4LE	846,37	45,79	30
LA3,5C90T4LE	1016,3	207,27	90

Fonte: AUTOR (2023).

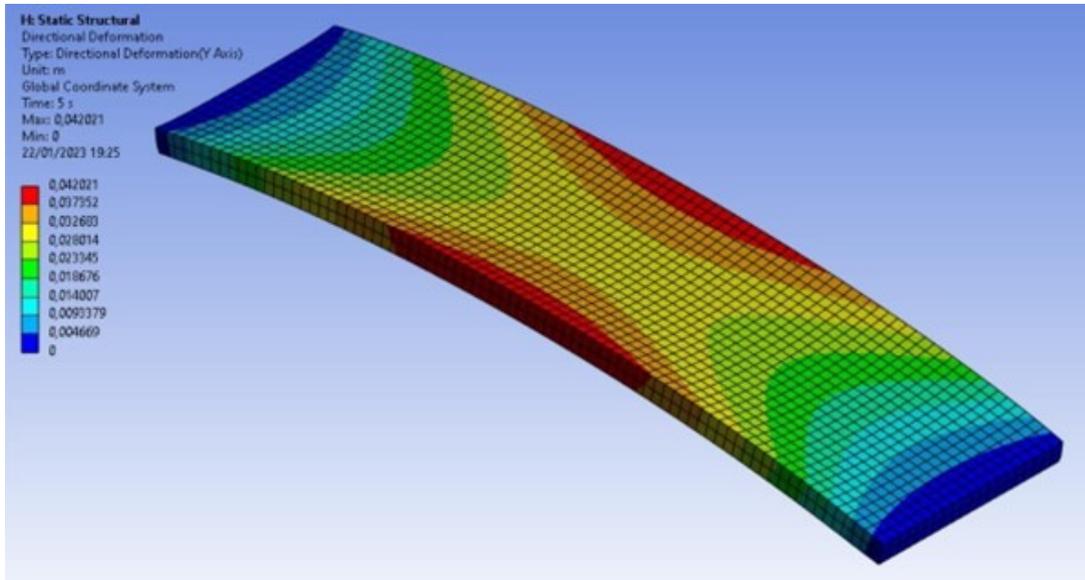
## 4.2 ANÁLISE ESTRUTURAL

Para a análise estrutural os valores de deformações e deslocamentos correspondem ao último tempo analisado de 30 e 90 minutos. Nas análises foram consideradas os dados obtidos pela análise térmica, o peso próprio e uma pressão de  $2\text{kN/m}^2$  aplicada na face superior da laje. É importante ressaltar que todas as lajes apresentam as dimensões  $4\text{m} \times 1\text{m} \times 0,1\text{m}$ , com 23 barras de diâmetro de  $8,0\text{mm}$  espaçadas igualmente a cada  $18\text{cm}$ .

### 4.2.1 Caso 1 - Dois lados engastados

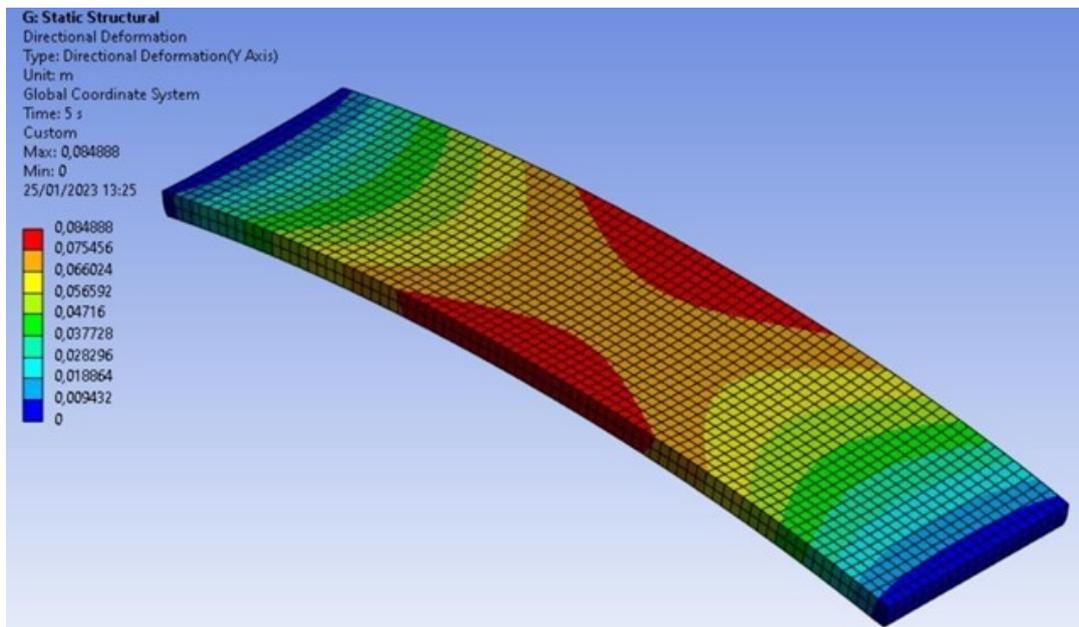
No caso 1 foram investigados os dois lados do vão engastados para a laje de concreto armado, considerando a atuação do incêndio, peso próprio e carregamento. Nas Figuras 14 e 15 são apresentados os valores de deslocamentos para os tempos de 30 e 90 min, respectivamente, para as lajes.

Figura 14: Deslocamento em Y para 30 min com dois lados engastados – cobertura 20mm



Fonte: AUTOR (2023).

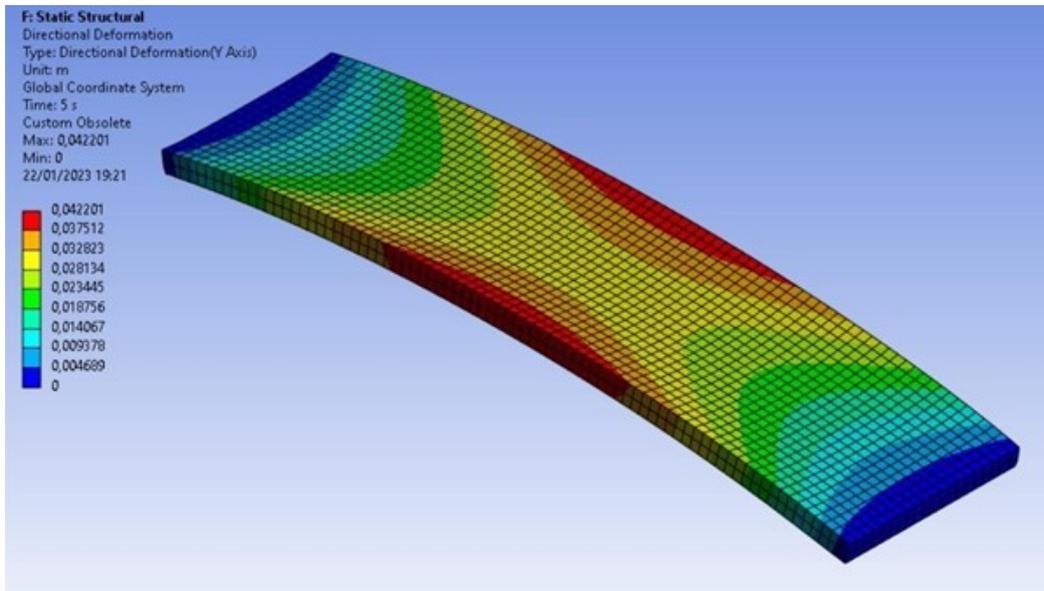
Figura 15: Deslocamento em Y para 90 min com dois lados engastados – cobertura 20mm



Fonte: AUTOR (2023).

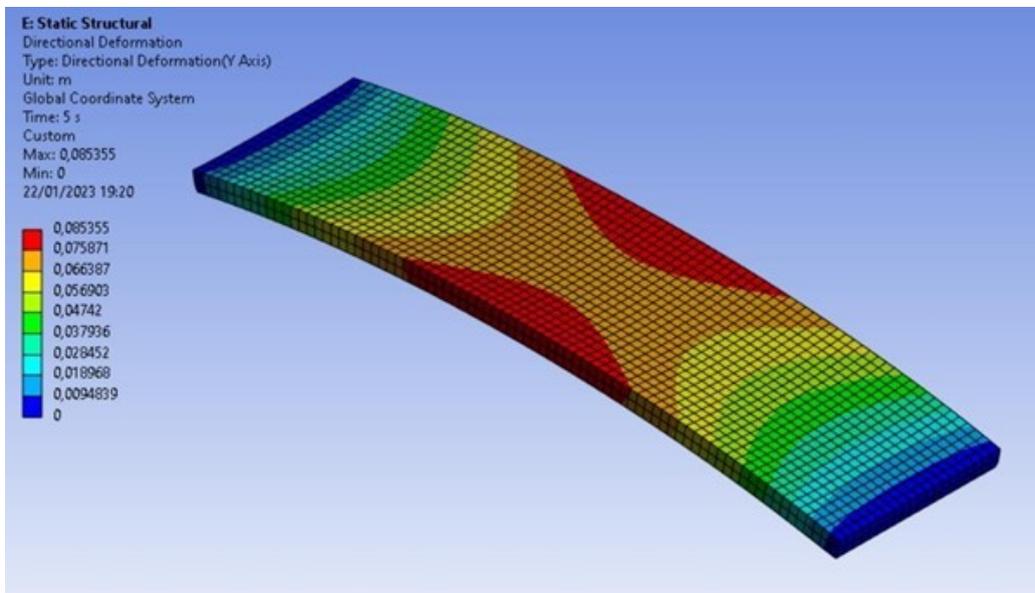
Nas Figuras 16 e 17 são apresentados os valores de deslocamentos para os tempos de 30 e 90 min, respectivamente, para as lajes.

Figura 16: Deslocamento em Y para 30 min com dois lados engastados – cobertura 35mm



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 17: Deslocamento em Y para 90 min com dois lados engastados – cobertura 35mm



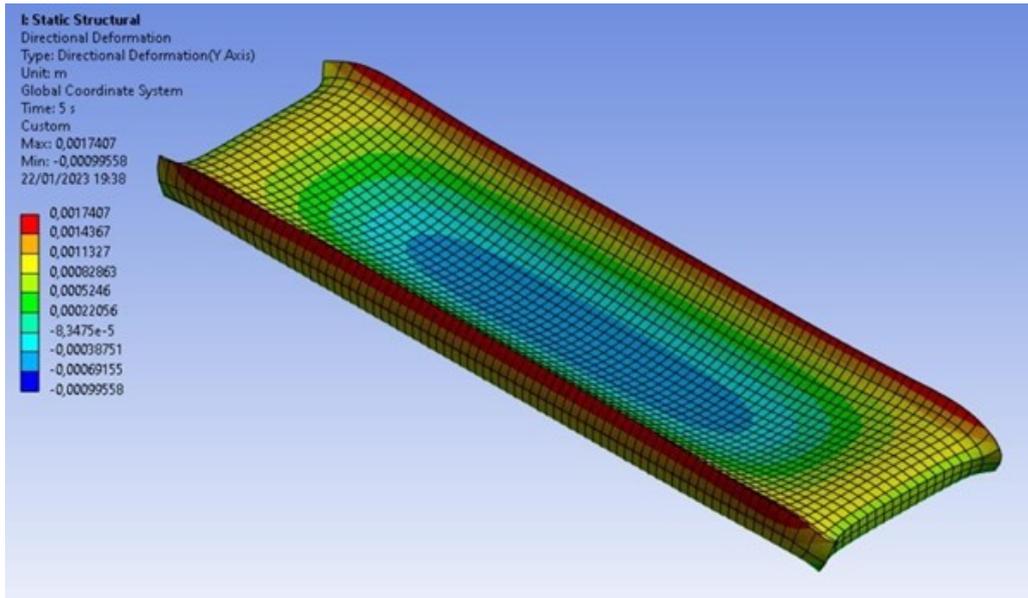
Fonte: AUTOR (2023).

#### 4.2.2 Caso 2 - Quatro lados engastados

No caso 2 foram investigados os quatro lados engastados para a laje de concreto armado, considerando a atuação do incêndio, peso próprio e carregamento.

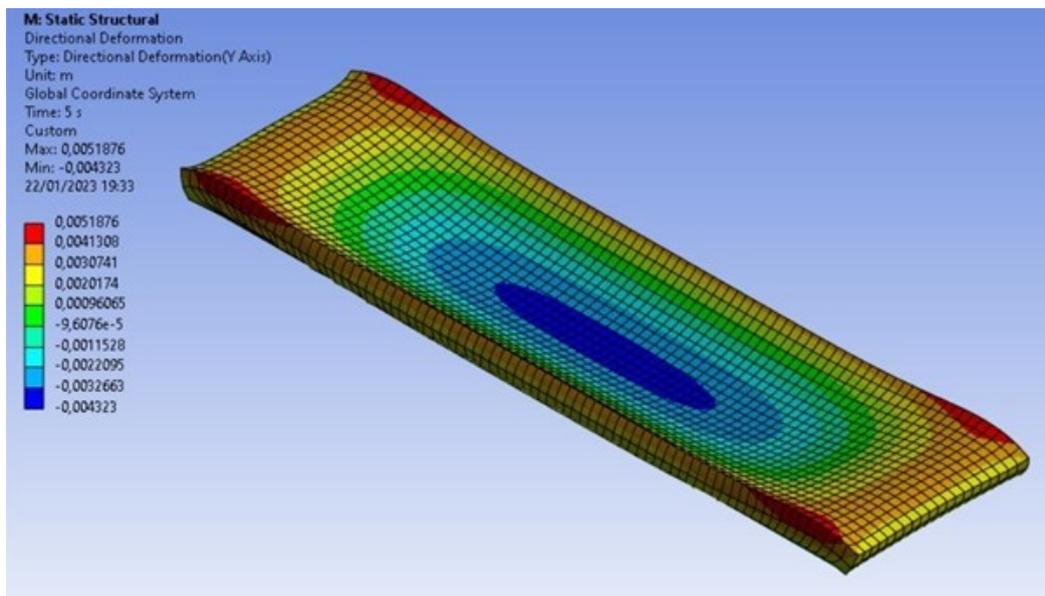
Nas Figuras 18 e 19 são apresentados os valores de deslocamentos para os tempos de 30 e 90 min para as lajes, respectivamente.

Figura 18: Deslocamento em Y para 30 min com quatro lados engastados – cobertura de 20mm



Fonte: AUTOR (2023).

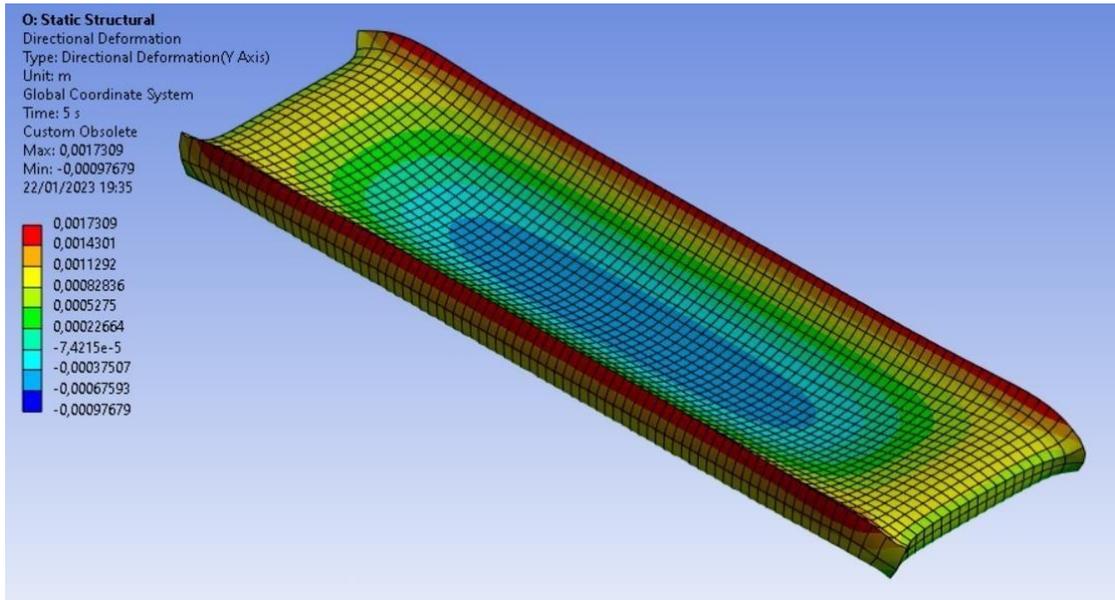
Figura 19: Deslocamento em Y para 90 min com quatro lados engastados – cobertura de 20mm



Fonte: AUTOR (2023).

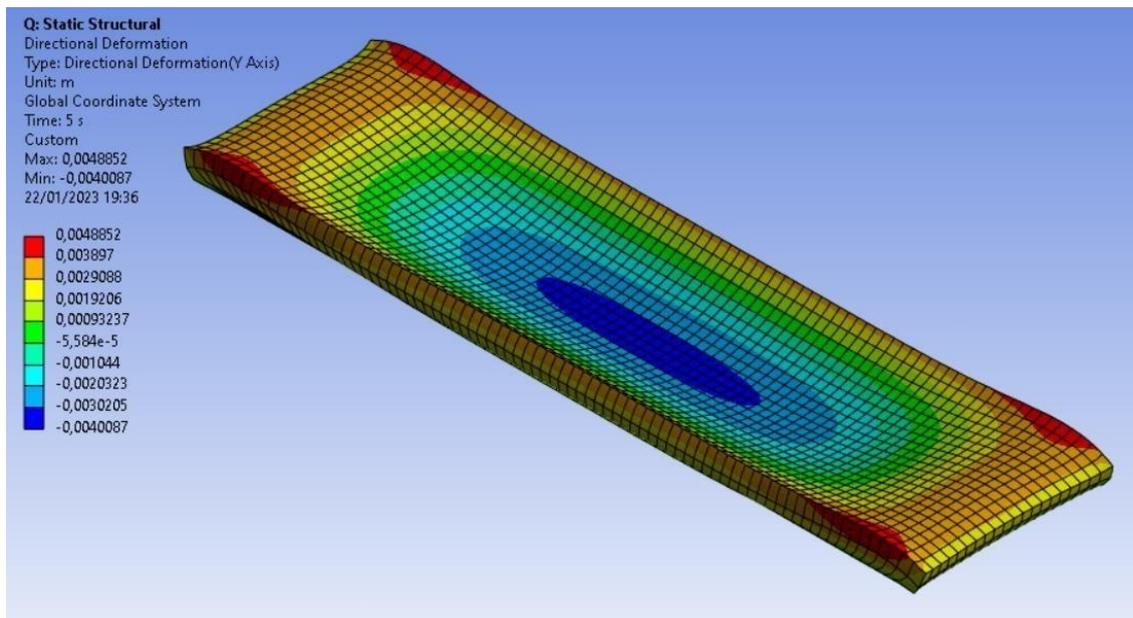
Nas Figuras 20 e 21 são apresentados os valores de deslocamentos para os tempos de 30 e 90 minutos para as lajes, respectivamente.

Figura 20: Deslocamento em Y para 30 min com quatro lados engastados – cobertura de 35mm



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 21: Deslocamento em Y para 90 min com quatro lados engastados – cobertura de 35mm



Fonte: AUTOR (2023).

Os resultados dos deslocamentos máximos das lajes estão apresentados na Tabela 7. Pelos resultados, o Caso 1 apresenta deslocamentos bem maiores se comparado ao Caso 2. Além disso, verifica-se como a ação do incêndio pode elevar os deslocamentos finais no elemento, como apresentada na primeira relação na Tabela 7.

Outro ponto importante a considerar é que a condição de contorno adotada altera significativamente os resultados finais dos deslocamentos, como visto na segunda relação para o Caso 2. Comparando o Caso 1 e 2 com relação as condições de contorno, nota-se que o incêndio diminui os deslocamentos entre os dois tipos de apoio, conforme visto entre a segunda e terceira relações.

Tabela 7: Valores dos deslocamentos no meio do vão

Laje	Deslocamento total (m)	Deslocamento sem o incêndio (m)	Relações			Tempo (min)	Caso
	(Dt)	(D)	Dt/D	Dt(2L)/Dt(4L)	D(2L)/D(4L)		
LA2C30T2LE	0,03100	-0,002856	-10,85	-31,15	234,87	30	1
LA2C90T2LE	0,072402		-25,35	-16,75		90	
LA3,5C30T2LE	0,03083	-0,002856	-10,79	-31,57	234,87	30	
LA3,5C90T2LE	0,07298		-25,55	-18,20		90	
LA2C30T4LE	-0,0009953	-0,00001214	81,99	-	-	30	2
LA2C90T4LE	-0,004323		356,10	-		90	
LA3,5C30T4LE	-0,0009766	-0,00001216	80,31	-	-	30	
LA3,5C90T4LE	-0,004009		329,69	-		90	

**Obs.** Dt/D – relação entre o deslocamento total e deslocamento sem o incêndio para cada laje;  
Dt(2L)/Dt(4L) – relação entre o deslocamento total com a laje engastada nos 2 lados e 4 lados  
D(2L)/D(4L) – relação entre o deslocamento sem o incêndio com a laje engastada nos 2 lados e 4 lados

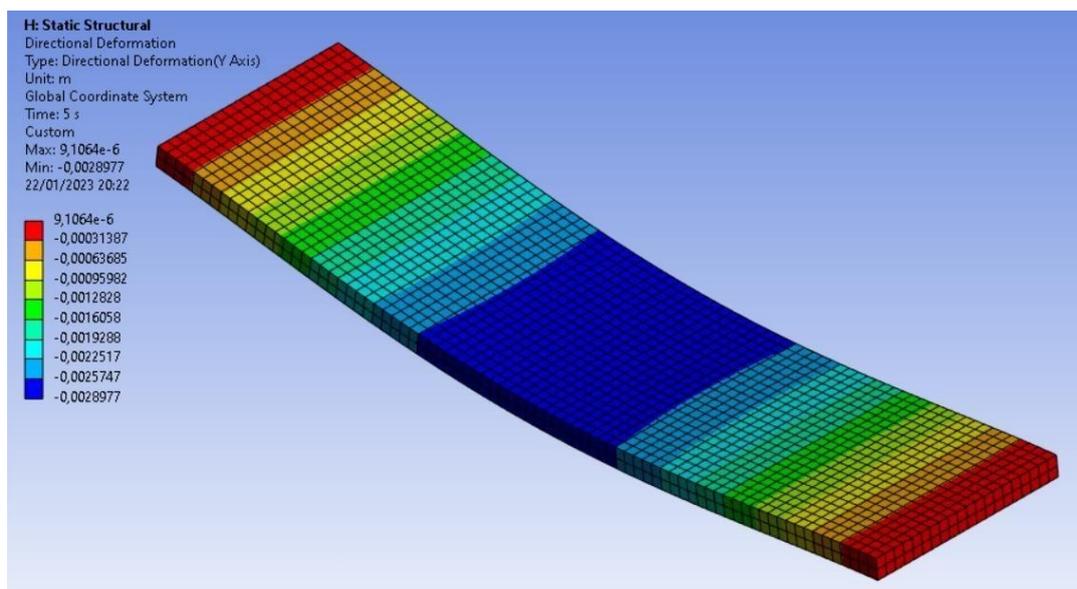
Fonte: AUTOR (2023).

### 4.2.3 Análise da laje LA2C30T2LE

A partir dos resultados obtidos nota-se que os valores dos deslocamentos para os dois bordos engastados (Caso 1) apresentam uma configuração da deformada contrária ao Caso 2. Desta forma, foi realizada uma análise para a primeira laje (LA2C30T2LE) a fim de avaliar o comportamento do elemento pela ação da pressão de 2kN/m<sup>2</sup> com peso próprio e pela ação do incêndio de forma distinta. Além disso foi investigada também se as condições de contorno adotadas possam ter interferido nos resultados. Para tanto as análises foram nomeadas como Caso 1a (condição de contorno aplicada na linha) e Caso 1b (condição de contorno aplicada em toda a face).

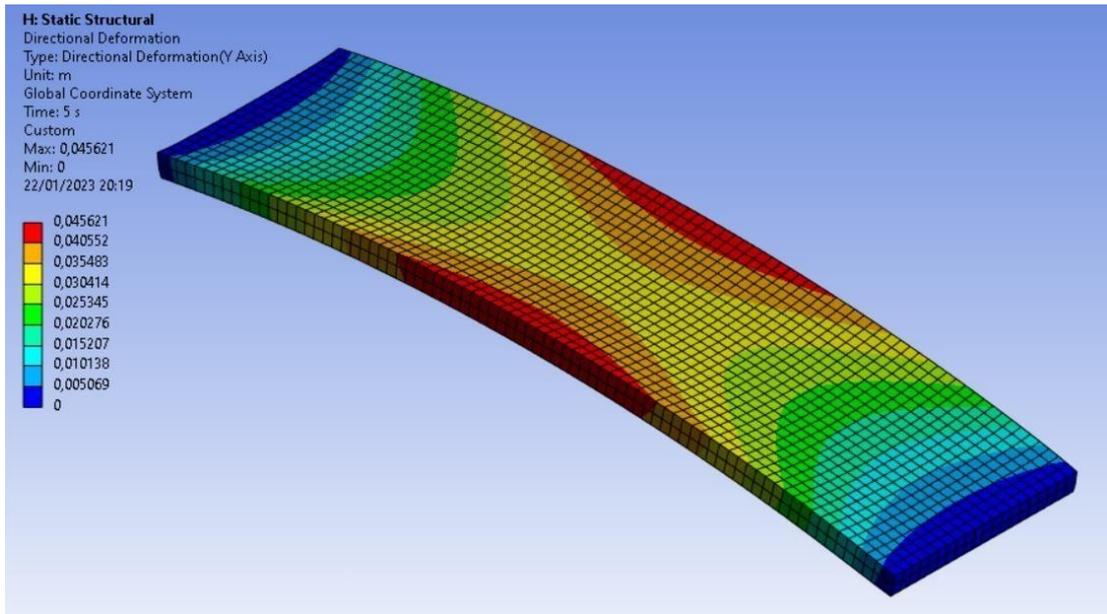
Os deslocamentos obtidos para o Caso 1a somente pelo carregamento e somente pela temperatura são apresentados nas Figuras 22 e 23, respectivamente. Para o Caso 1b os deslocamentos estão apresentados pelas Figuras 24 e 25, respectivamente.

Figura 22: Deslocamento em Y para 30 min somente para os carregamentos – Caso 1a



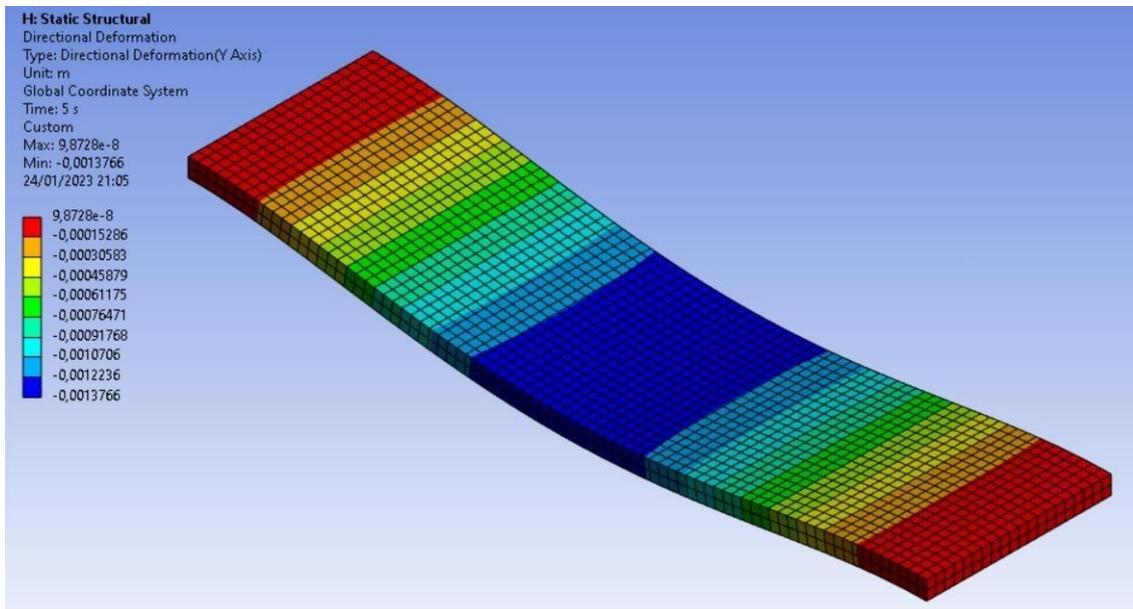
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 23: Deslocamento em Y para 30 min somente para o incêndio – Caso 1a



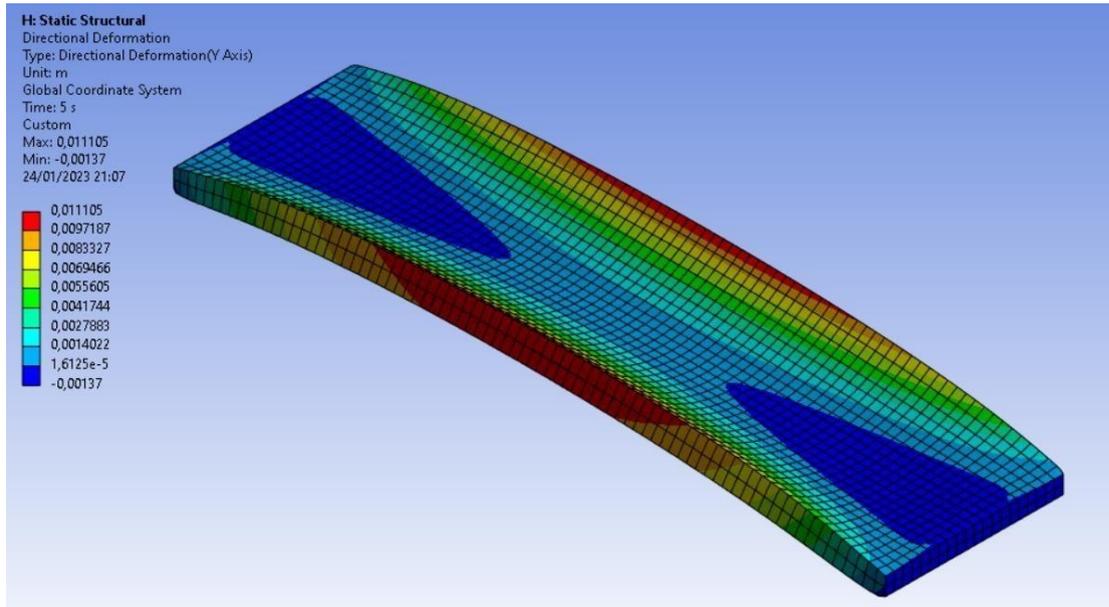
Fonte: AUTOR (2023).

Figura 24: Deslocamento em Y para 30 min somente para os carregamentos – Caso 1b



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 25: Deslocamento em Y para 30 min somente para o incêndio – Caso 1b



Fonte: AUTOR (2023).

A partir dos valores obtidos pode-se avaliar como a temperatura e as condições de contorno podem modificar o comportamento do elemento. A Tabela 8 apresenta os valores dos deslocamentos no meio da laje. Pela Tabela, verifica-se que os deslocamentos devido ao incêndio para o Caso 1a, em módulo, são bem superiores aos do carregamento, diferentemente do Caso 1b que são menores.

Tabela 8: Valores dos deslocamentos

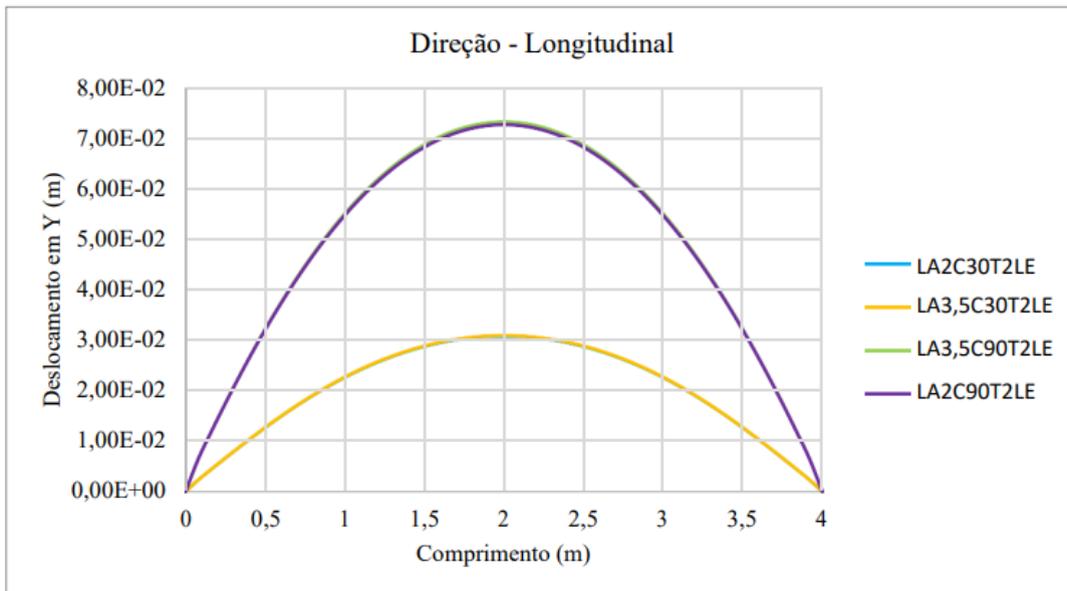
Análises	Deslocamento (m)	
	Caso 1a	Caso 1b
somente cargas	-0,002856	-0,001352
somente incêndio	0,03424	0,00012059

Fonte: AUTOR (2023).

### 4.3 Análise das direções longitudinais e transversais

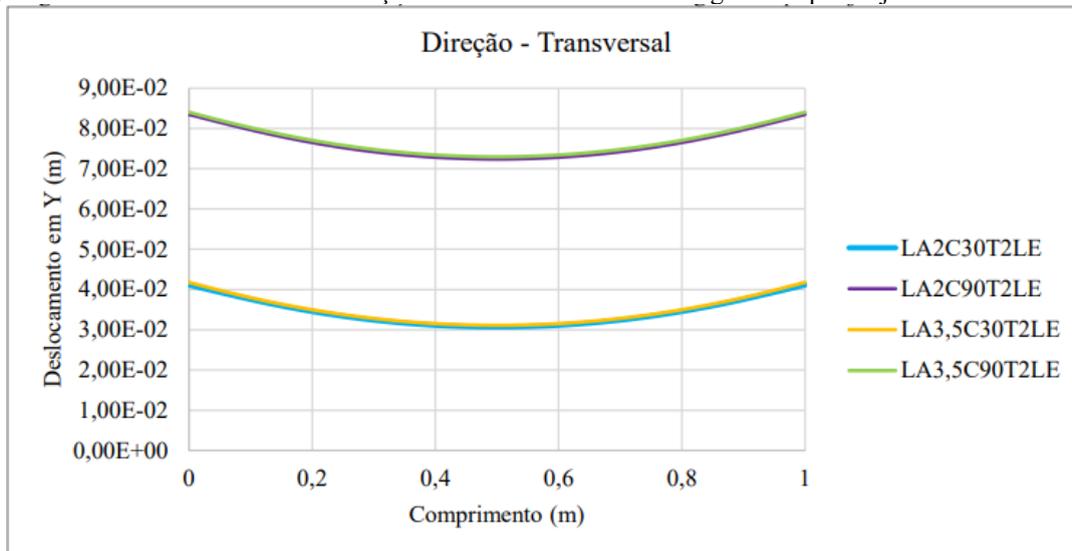
As Figuras 26 a 29 mostram a configuração dos deslocamentos ao longo das direções longitudinal e transversal das lajes no meio do vão. Pode-se verificar pelos resultados que nos 30 min de incêndio, os valores de deslocamentos foram praticamente iguais. Entretanto, à medida que o incêndio avança, os deslocamentos aumentam nas análises. No caso das lajes engastadas em dois lados, percebe-se que os deslocamentos finais da laje com 20mm de cobrimento e com 35mm para o tempo de 30 min e 90min são praticamente iguais.

Figura 26: Deslocamento em Y na direção longitudinal – Dois lados engastados para laje de concreto armado



Fonte: AUTOR (2023).

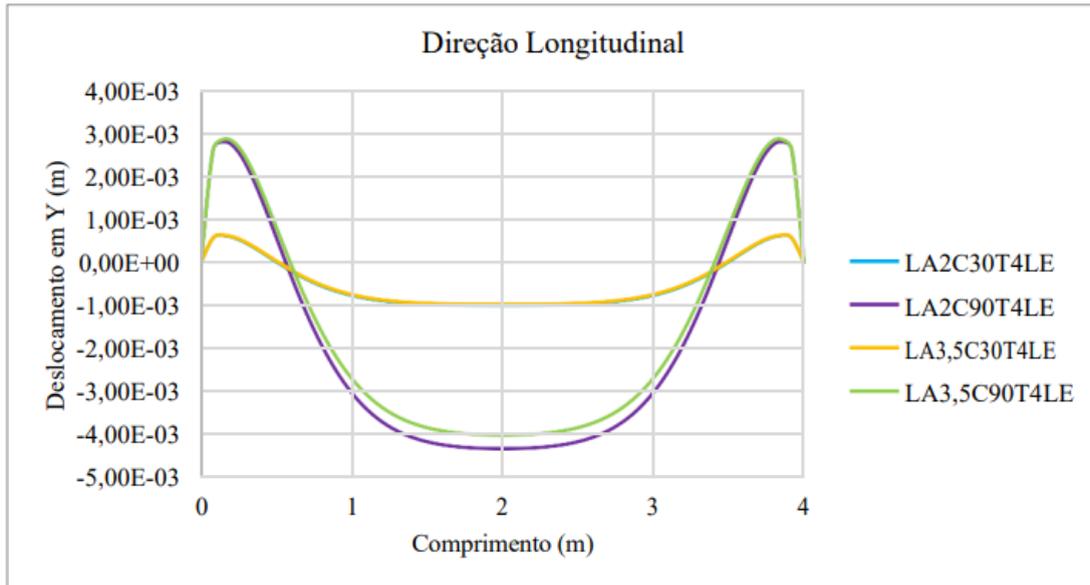
Figura 27: Deslocamento em Y na direção transversal – Dois lados engastados para laje de concreto armado



Fonte: AUTOR (2023).

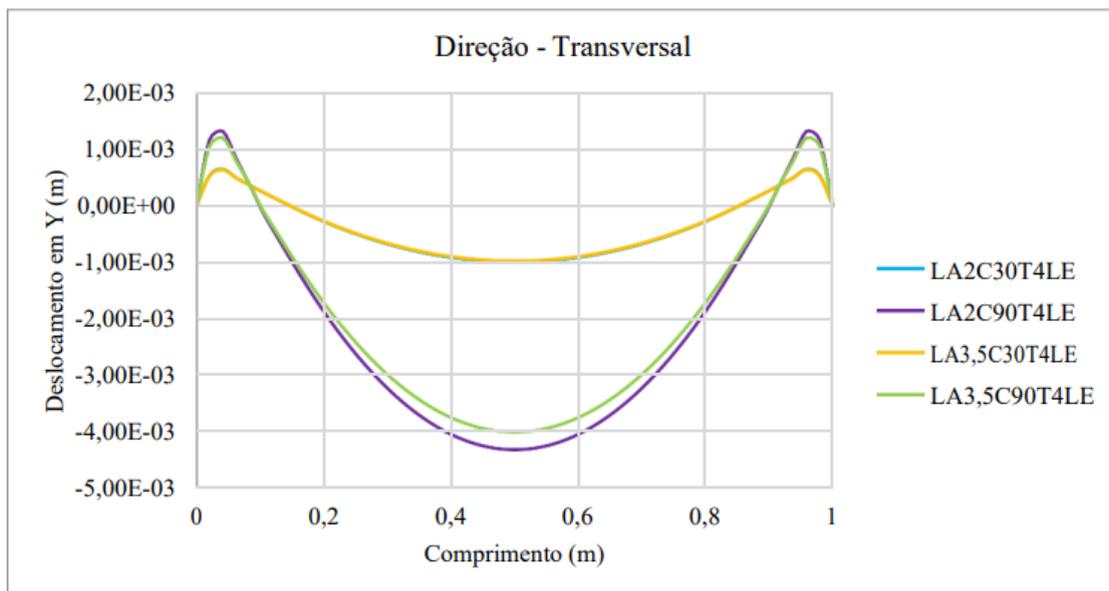
No caso das lajes engastadas nos 4 lados, os deslocamentos finais são idênticos no início do incêndio e levemente diferentes para um incêndio de 90min. Verifica-se como os bordos engastados se deformam com o incêndio.

Figura 28: Deslocamento em Y na direção transversal – Quatro lados engastados para laje de concreto armado



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 29: Deslocamento em Y na direção transversal – Quatro lados engastados para laje de concreto armado



Fonte: AUTOR (2023).

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de lajes maciças unidirecionais de concreto armado para diferentes cobrimentos e condições de contorno considerando a curva de incêndio padrão ISSO 834 (2014). Para tanto foram realizadas análises térmica e estrutural utilizando ferramentas presentes no programa computacional ANSYS WORKBENCH. Após a análise dos resultados obtidos pela simulação numérica pode-se concluir que:

- Os deslocamentos devido ao incêndio são bem superiores aos deslocamentos do carregamento.
- Com relação as condições de contorno, o incêndio diminui os valores dos deslocamentos para

as lajes com quatro lados engastados em relação a laje com apenas dois lados engastados.

- Com relação ao cobrimento nominal de 20mm e 35mm não há interferência dos deslocamentos.
- Os deslocamentos são maiores no caso de engaste em dois lados quando se compara com o engaste em 4 lados quando o incêndio atua.
- O incêndio atuando na estrutura aumenta os deslocamentos finais no elemento independentemente do tipo de apoio.
- A condição de contorno adotada altera significativamente os resultados finais dos deslocamentos.
- A forma de aplicação das condições de contorno altera a configuração da deformada e deslocamentos das lajes quando se analisa as direções transversal e longitudinal das lajes.
- A laje de cobrimento 20mm possui uma temperatura maior que a de 35 mm no intervalo de 4 a 30 min. Acima deste tempo, as duas lajes tendem ao mesmo comportamento.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALLAM, S. M.; ELBAKRY, H.M.F.; RABEI, A. G. Behavior of one-way reinforced concrete slabs subjected to fire. **Alexandria Engineering Journal**, v52, pg 749-761, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.432**: Exigências de Resistência ao fogo. Rio de Janeiro: [s.n.], 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- COSTA, C.N; SILVA, V.P. Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio. In: **Seminário Internacional NUTAU'2006 - Inovações Tecnológicas e sustentabilidade**, São Paulo, 2006.
- DELALIBERA, R.G; SILVA, S.L.R; PERUZZI, A.P. Análise de lajes maciças em situação de incêndio pelo método tabular da NBR 15200:2012 e pelo método de Hertz. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. ISSN 2176-7270, Uberlândia, 2017.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-2: Eurocode 1** – Actions on structures - Part 1-2: General actions - actions on structures exposed to fire. Brussels: [s.n.]. 2002.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2: Eurocode 2** - Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - structural fire design. Brussels: [s.n.]. 2004.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-2: Eurocode 3** - Design of steel structures - Part 1-2: General rules - structural fire design. Brussels: [s.n.]. 2005.
- FILHO, H.A.S. **Estudo do comportamento de lajes de concreto armado em situação de incêndio**.

Tese (Graduação). Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

GOMIDE, K. A. Análise comparativa de lajes em situação de incêndio. **Revista Engenho**, Editora UniAnchieta; Jundiaí; São Paulo; 2009.

KADA, A.; LAMRI, B.; BENLAKEHAL, N.; MESQUITA, L. M. R.; BOUCHAIR, A. Finite element investigation on the behaviour of structural steel beams subjected to standard & parametric fire. **Nature & Technologie**. C- Sciences de l'Environnement, n. 13, pg 28-33, junho, 2015.

PAULA, C.R.F. **Análise de variações térmicas em vigas de aço e concreto**. Artigo (Iniciação Científica). Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, 2022.

PIERIN, I.; SILVA, V. P. Análise térmica de estruturas bidimensionais em situação de incêndio por meio do método dos elementos finitos. **XXXVI Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural**. Montevideu, Uruguai, 19-21 novembro, 2014.

SILVA, V.P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. Tese (Doutorado). Departamento de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.

SILVA, V.P; VARGAS, M.R; ONO, R. **Prevenção contra incêndio no Projeto de Arquitetura (Construção com Aço)**. 1.ed. Instituto Aço Brasil/ Centro Brasileiro de Construção em Aço, Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Ziguarte, 2004.

SOUZA, D.A; SILVA, G.P. **Estruturas de concreto em situação de incêndio**. Trabalho Conclusão de Curso (Graduação). Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, 2015.

VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. **Resistência ao fogo das estruturas de aço**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia / Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2005.

VIEIRA, D. S.; COELHO, N. A. Utilização do Método dos Elementos Finitos no Estudo Térmico de Elementos Simples de Concreto. **RCT – Revista de Ciência e Tecnologia**. v. 6, 2020.