



Análise da transferência de calor nos alvéolos de lajes pré-moldadas alveolares em situação de incêndio

Vanessa Miranda Salgado e Silva (1); Vanessa Cristina de Castilho (2)

(1) *Graduanda do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia; vanessamiranda@ufu.br*

(2) *Professora Doutora da Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia; vanessa.castilho@ufu.br*

Resumo

Este estudo tem como propósito investigar o comportamento térmico de lajes alveolares de concreto protendido sob condições de incêndio, por meio de modelagem computacional no programa ANSYS. O trabalho valida um modelo numérico a partir de dados experimentais de referência, com o objetivo principal de analisar a resposta térmica deste sistema estrutural quando submetido à ação do fogo. Foram avaliados como a atuação dos alvéolos podem interferir no incêndio. Os resultados demonstram uma correlação significativa entre os dados numéricos e experimentais, validando a precisão do modelo computacional desenvolvido. Análises adicionais demonstraram que as condições de contorno e características construtivas alteram significativamente o comportamento térmico de lajes alveolares sob incêndio. Verificou-se que a presença de convecção nos alvéolos modifica os mecanismos de transferência de calor, influenciando tanto a distribuição térmica quanto o fluxo de calor através da estrutura, com impactos diretos no seu desempenho ao fogo.

Palavras-chave: Laje alveolar. Incêndio. Modelagem numérica. ANSYS. Concreto protendido. Análise Térmica.

Abstract

This study investigates the thermal behavior of prestressed concrete hollow core slabs under fire conditions using computational modeling in ANSYS. The work validates a numerical model based on experimental reference data, with the main objective of analyzing the thermal response of this structural system when subjected to fire. The study evaluated how the impact of hollow core performance on fire was assessed. The results demonstrate a significant correlation between the numerical and experimental data, validating the accuracy of the developed computational model. Additional analyses demonstrated that boundary conditions and construction characteristics significantly alter the thermal behavior of hollow core slabs under fire. It was found that the presence of convection in the hollow core substantially modifies the heat transfer mechanisms, influencing both the thermal distribution and the heat flux through the structure, with direct impacts on its fire performance.

Keywords: Hollow core slab. Fire. Numerical modeling. ANSYS. Prestressed concrete. Thermal analysis.



1. Introdução

Historicamente, o primeiro grande incêndio da era cristã registrado ocorreu em 18 de julho de 64 d.C., em Roma, capital do Império Romano. O fogo propagou-se pela cidade durante nove dias consecutivos. Na ocasião, as residências eram majoritariamente construídas em madeira e as ruas eram estreitas, condições que, aliadas à ação dos ventos, favoreceram a rápida disseminação das chamas e a consequente destruição de grande parte da urbe. Estima-se que o evento tenha resultado em milhares de óbitos e causado a devastação de aproximadamente 75% da cidade. Diante da catástrofe, o então Imperador Nero idealizou um sistema de alarme composto por vigilantes, que patrulhavam a cidade com o objetivo de alertar a população em caso de incêndio. Dessa forma, Roma tornou-se o primeiro local do mundo a dispor de um sistema organizado de prevenção e combate a incêndios (COSTA, 2002).

A concepção de projetos estruturais para edificações civis é uma atividade intrinsecamente regulada por normativas técnicas, cuja finalidade é garantir a segurança, a funcionalidade e a durabilidade das construções. Nesse contexto, a ABNT NBR 6118:2023 estabelece os parâmetros fundamentais para o projeto de estruturas de concreto. No caso específico de obras que utilizam componentes pré-moldados, as exigências são complementadas pela ABNT NBR 9062:2017. O atendimento a esses regramentos constitui premissa fundamental para o alcance dos estados limites de serviço e último ao longo do horizonte de projeto da edificação.

Para além do dimensionamento convencional sob ações em temperatura ambiente (nominalmente 20°C), impõe-se a análise da estrutura frente a ações excepcionais, como as decorrentes de um incêndio. A exposição a elevadas temperaturas induz fenômenos termofísicos e termoquímicos que degradam a microestrutura do concreto e do aço, resultando em acentuada redução de suas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Tal degradação material compromete a capacidade resistente dos elementos estruturais e ocasiona uma redistribuição de esforços internos. A ABNT NBR 15200:2012 classifica a ação do incêndio como excepcional, determinando a obrigatoriedade da verificação da estrutura no Estado Limite Último para essa combinação de carregamentos.

A magnitude do problema é evidenciada em escala global. Segundo Brushlinsky et al. (2016), no ano de 2014, foram registrados 2,7 milhões de incêndios em um conjunto de 32 nações, com um índice de 2,5 ocorrências por mil habitantes. Em âmbito nacional, o adensamento urbano desordenado exacerbou a vulnerabilidade das edificações, fator evidenciado por eventos emblemáticos como os incêndios nos edifícios Andraus (1972) e Joelma (1974), e, mais recentemente, na boate Kiss (2013), todos com consequências catastróficas.

Diante disso, a análise da segurança de estruturas em situação de incêndio emerge como um campo de estudo essencial da engenharia, visando à preservação da vida e à limitação de perdas patrimoniais. A ABNT NBR 15200:2012 define que, sob a ação do fogo, a estrutura deve satisfazer a duas funções primordiais: a função corta-fogo, relacionada à estanqueidade e ao isolamento térmico, e a função portante, associada à manutenção da estabilidade global.

Este trabalho justifica-se não apenas pela relevância prática do tema, mas também pela oportunidade de contribuir para a consolidação de uma área de pesquisa ainda incipiente no Brasil. A eleição das lajes alveolares pré-fabricadas como foco deste estudo decorre de sua crescente aplicação no mercado construtivo nacional e das particularidades de seu comportamento termomecânico. A geometria alveolar, que confere leveza e eficiência ao elemento em temperatura ambiente, introduz complexidades significativas na análise da transferência de calor por condução, convecção e radiação no interior das cavidades, tornando seu comportamento em



situação de incêndio um desafio de modelagem e análise quando comparado a elementos de seção maciça. Neste trabalho, uma laje ensaiada por Shakya e Kodur(2015) é validada por meio do programa ANSYS WORKBENCH. Em seguida foi realizado um estudo da influência dos alvéolos durante a ação do incêndio, para a mesma laje. Nesse caso, foram investigadas diferentes situações atuando nos alvéolos e na parte superior e inferior da laje.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Incêndio

De acordo com o monitoramento de ocorrências de incêndios no Brasil realizado pelo Instituto Sprinkler Brasil, no ano de 2021 foram registrados aproximadamente 2.301 incêndios estruturais entre janeiro e dezembro. Tais eventos ocorreram em depósitos, hospitais, hotéis, escolas, prédios públicos, museus e demais tipologias edificadas. Do total de registros, cerca de 18% atingiram estabelecimentos comerciais e 15% depósitos, ambos apresentando um aumento superior a 50% em relação ao ano anterior. Nesse contexto, entende-se por incêndios estruturais aqueles que poderiam ser evitados por meio da instalação de sistemas de combate a incêndio, como chuveiros automáticos (sprinklers).

Quando submetidos a elevadas temperaturas durante um incêndio, os elementos estruturais sofrem redução significativa em sua resistência e rigidez – esta última quantificada pelo módulo de elasticidade. Além da degradação das propriedades mecânicas dos materiais, surgem esforços internos adicionais decorrentes das restrições às dilatações térmicas. Do ponto de vista da engenharia, a ação térmica é definida como o fluxo de calor transferido por radiação e convecção dos gases quentes do ambiente em chamas para os componentes da estrutura, resultante da diferença de temperatura entre eles (SILVA, 2016).

A convecção consiste em um mecanismo de transferência de calor que ocorre pelo movimento de um fluido, seja líquido ou gasoso. Esse fenômeno é causado por diferenças de densidade no interior do fluido: as porções aquecidas, tornando-se menos densas, ascendem, enquanto as porções mais frias e densas descem. Esse movimento gera uma circulação contínua, promovendo a distribuição de energia térmica (ÇENGEL, 2009).

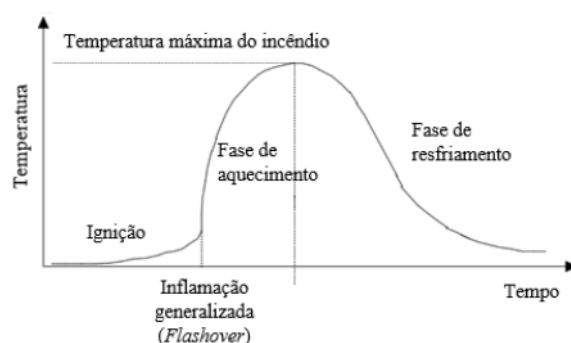
Já a radiação térmica é o processo de transferência de calor por meio da emissão de ondas eletromagnéticas, as quais se propagam de um corpo em alta temperatura para outro em temperatura inferior. Em um cenário de incêndio, essa radiação emana principalmente dos gases aquecidos, das chamas e das superfícies de paredes incandescentes. Quando a fumaça apresenta alta concentração de fuligem – resultante da combustão incompleta dos materiais presentes no compartimento –, a radiação emitida pelos gases quentes torna-se o mecanismo predominante de transferência de calor (SILVA, 2016).

2.2 Curvas de incêndio

O comportamento de um incêndio pode ocorrer de maneiras distintas, dependendo da quantidade de comburente e de material combustível no ambiente em que se inicia o evento. As fases de aquecimento e de resfriamento podem acontecer em um curto espaço de tempo ou por um período mais longo. Para caracterizar tal comportamento, utiliza-se um gráfico de curva que descreve a relação entre o aumento de temperatura dos gases do ambiente submetido às chamas e o tempo transcorrido. Ainda que varie a quantidade de ar e de carga de incêndio, um incêndio real comporta-se conforme a curva representada pela Figura 1 (ROCHA, 2012). A curva temperatura-

tempo é uma forma de visualizar as etapas de um incêndio e é elaborada por meio de ensaios que visam 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, 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 x tempo de um incêndio



Fonte: Adaptado de Silva (1997).

De acordo com Rocha (2012), o desenvolvimento de um incêndio pode ser dividido em três fases principais, sendo elas, a primeira fase é a ignição, caracterizada pelo início localizado do fogo, com baixas temperaturas e um aumento lento do calor, não representando risco para a estrutura. Em seguida, ocorre a fase de aquecimento, que se inicia com o evento crítico do flashover (inflamação generalizada). Neste estágio, a temperatura aumenta abruptamente até atingir seu pico máximo, tornando-se a fase mais crítica devido à degradação das propriedades dos materiais e ao comprometimento da segurança estrutural. Por fim, tem início a fase de resfriamento, quando o combustível se esgota e a temperatura do ambiente começa a diminuir.

O dimensionamento de lajes alveolares protendidas deve seguir rigorosamente as prescrições da ABNT NBR 14861: 2011, que estabelece que o cálculo das armaduras longitudinais deve resultar em esforços resistentes capazes de suportar os esforços solicitantes obtidos na análise estrutural. Adicionalmente, é imperativo observar as disposições das normas ABNT NBR 6118: 2023 e ABNT NBR 8681: 2004 relativamente às combinações de ações para os estados limites, bem como utilizar os critérios da ABNT NBR 6120: 2000 para a correta determinação dos carregamentos. Para a verificação da resistência ao fogo pelo método tabular usa-se a ABNT NBR 15200: 2012.

2.3 Fluxo de calor

O fluxo de calor através da superfície é dado pela relação entre a quantidade de calor que atravessa a superfície e o intervalo de tempo decorrido. No programa Ansys Workbench, podem ser realizadas análises que envolve o fluxo de calor quando uma variação térmica ocorre. São eles o fluxo de calor total (*total heat flux*) e fluxo de calor direcional (*direcional heat flux*). O fluxo de calor pode ser positivo ou negativo, indicando o calor que entra ou sai do sistema, respectivamente.

O fluxo de calor total representa a soma vetorial do calor transferido através da superfície, indicando a quantidade total de energia térmica que flui por ela, por unidade de área. O fluxo de calor direcional também é uma grandeza vetorial que mostra a taxa de transferência de calor por unidade de área e sua direção em um ponto específico.



Enquanto o fluxo de calor total é a soma de todos os fluxos de calor através de um contorno, o fluxo de calor direcional é uma medida local do fluxo de energia por unidade de área.

O cálculo simples do fluxo de calor por convecção e radiação é calculada nas referências sobre o tema, conforme apresentado pelas Equações 1 e 2.

$$q_{\text{radiação}} = \sigma \cdot F \cdot (T_{s1}^4 - T_{s2}^4) \quad (1)$$

$$q_{\text{convecção}} = h_c \cdot (T_{s1} - T_{ar}) \quad (2)$$

Onde: $q_{\text{radiação}}$ – calor transmitido por radiação, em W/m^2 ; $q_{\text{convecção}}$ – calor transmitido por convecção, em W/m^2 ; σ – constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$); F – fator de forma; T_{s1} e T_{s2} – temperatura das superfícies, em K; h_c – coeficiente de convecção ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), T_{s1} – temperatura da superfície do sólido, em $^\circ\text{C}$; T_{ar} – temperatura do fluido, em $^\circ\text{C}$

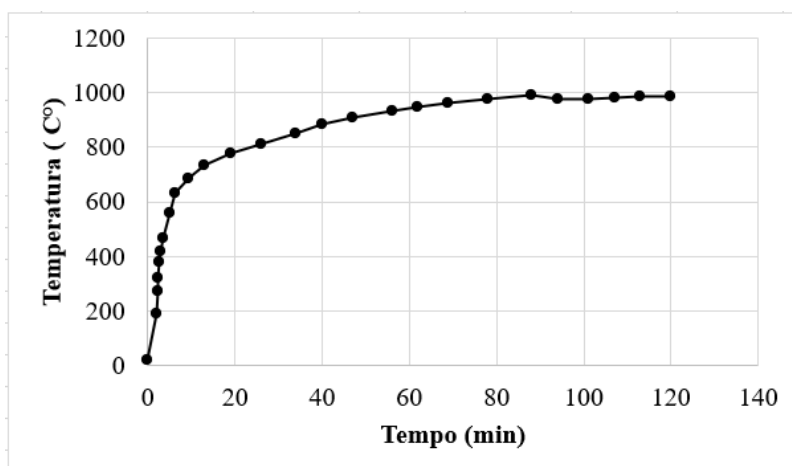
2.4 Trabalhos que levam em consideração o incêndio

Pierin e Silva (2009) analisaram termicamente uma laje alveolar protendida de shopping center, cuja particularidade era a ausência de compartimentação vertical, expondo-a ao calor em ambas as faces. Sem diretriz normativa à época, aplicaram a curva-padrão em ambas as superfícies por precaução. Posteriormente, a ABNT NBR 15200 (2012) estabeleceu que a aplicação apenas na face inferior é suficiente, validando o uso do método tabular. Com o programa Super TempCalc (STC), os autores determinaram o campo de temperaturas, obtiveram isotermas e diagramas tensão-deformação das armaduras, destacando o registro de 415°C a 3 cm da face inferior, informação útil para comparações, embora não tenham definido o tempo de colapso da estrutura.

Albuquerque (2012), comparou métodos de cálculo, entre eles o tabular da ABNT NBR 15200:2012 e simulações no SuperTempCalc, propondo alternativa menos restritiva. Em análise térmica de laje com o Abaqus, concluiu que, embora atendesse ao critério de isolamento, o tempo crítico de colapso (20 min) foi inferior ao recomendado pelo fabricante (30 min) e ao do método tabular, sugerindo que ambos podem ser contra a segurança.

Shakya e Kodur (2015) conduziram um estudo sobre o desempenho de lajes alveolares de concreto protendido pré-moldado sob condições de incêndio. A investigação foi realizada por meio de ensaios em protótipos em escala real, utilizando um forno especialmente projetado para simular a aplicação simultânea de cargas térmicas e estruturais. O objetivo central da pesquisa foi analisar o tempo de resistência ao fogo desse sistema estrutural, especificamente avaliando sua performance em contato direto com as chamas. Para tanto, foram testadas seis lajes com variações nos parâmetros críticos: tipo de agregado utilizado no concreto, nível de carga aplicada e condições de restrição nos apoios. Os resultados demonstraram que os protótipos atenderam aos critérios de desempenho aplicáveis para um período de até 120 minutos de exposição ao fogo. Constatou-se que, diferentemente do observado em lajes de concreto maciço, a presença dos alvéolos influencia significativamente a progressão da temperatura pela seção transversal do elemento. No escopo experimental, as lajes 5 e 6 foram submetidas a um cenário de incêndio padronizado pela norma ASTM E119, conforme apresentado pela Figura 2.

Figura 2 - Curva de tempo-temperatura simulado usando a norma ASTM E119



Fonte: Adaptado de Shakya e Kodur (2015).

A análise térmica foi conduzida com o objetivo de validar um modelo computacional por meio da comparação com resultados experimentais obtidos por Shakya e Kodur (2015). Para tal, a laje alveolar em estudo foi modelada e simulada no programa de Elementos Finitos ANSYS Workbench. O modelo foi submetido a condições termomecânicas análogas às do ensaio experimental, permitindo a comparação direta dos resultados térmicos para um tempo de exposição ao fogo de 120 minutos, bem como a posterior avaliação de seu comportamento estrutural. O estudo comparativo foi dividido em duas etapas principais: a primeira (Análise 1) consistiu na confrontação dos dados térmicos do modelo numérico com aqueles mensurados experimentalmente por Shakya e Kodur (2015) no tempo de 120 minutos; a segunda etapa (Análise 2) dedicou-se à investigação paramétrica do comportamento térmico da laje alveolar, considerando a variação de diferentes propriedades materiais e a influência de distintos cenários de propagação do incêndio.

Teixeira (2016) investigou lajes alveolares protendidas em incêndio, ressaltando a praticidade, mas também a limitação do método tabular por restringir-se a valores tabelados. Para superar essa limitação, realizou análise térmica avançada via Método dos Elementos Finitos no Abaqus 6.13, com dois modelos tridimensionais submetidos à curva-padrão na face inferior. Os resultados permitiram aplicar o método dos 500°C, mostrando que a laje classificada como R30 pelo tabular poderia ter desempenho superior, fornecendo análise comparativa mais refinada da segurança estrutural.

Já Faria e Costa (2017) estudaram uma laje alveolar após incêndio paramétrico, destacando que tal curva, por considerar características do compartimento, resulta em temperaturas menores que a curva-padrão, a qual tende a superestimar a severidade. Após o evento, verificaram possibilidade de recuperação por reforço com compósitos de fibra de carbono, concluindo que a técnica de embutir CRFC em ranhuras oferece maior proteção que a colagem inferior, embora com desafios executivos. A viabilidade do reforço mostrou-se dependente da temperatura das armaduras, sendo possível porque as cordoalhas não ultrapassaram 300°C; acima de 500°C, a perda de resistência inviabilizaria a recuperação, restringindo a validade dos resultados ao cenário estudado.

Araújo e Pinto (2020) analisam modelos numéricos em um programa de elementos finitos de lajes alveolares ensaiadas por Shakya e Kodur (2015) a fim de analisar a distribuição da temperatura

nesses elementos de altura reduzida quando em situação de incêndio, com foco na influência da presença dos alvéolos.

3 EXEMPLO NUMÉRICO

A análise térmica foi avaliada comparando um modelo ensaiado por Shakya e Kodur (2015). A laje alveolar foi analisada por meio do programa computacional Ansys Workbench. Foram feitas duas análises:

- Análise 1: A fim de validar a laje investigada foi feita uma comparação dos resultados térmicos obtidos por Shakya e Kodur (2015) para o tempo de 120min.

Laje 1: Convecção e radiação com curva ASTM no bordo inferior e radiação no bordo superior

- Análise 2: Usando as mesmas características geométricas da laje 1, analisa-se a influência dos alvéolos durante a ação do incêndio. Nesse caso foram avaliadas diferentes situações atuando nos alvéolos e na parte superior da laje:

Laje 2A: Convecção e radiação com curva ASTM no bordo inferior e superior

Laje 2B: Convecção e radiação com curva no bordo inferior e superior e convecção em toda face dos alvéolos

Laje 2C: Convecção e radiação com curva ASTM no bordo inferior, radiação no superior e convecção e radiação com curva ASTM na metade dos alvéolos

Laje 2D: Convecção e radiação com curva ASTM no bordo inferior, radiação no superior e convecção nos alvéolos

3.1 Propriedades do material

Para as análises sob ação térmica de incêndio, adotou-se a temperatura inicial de 20 °C, valor este consistentemente registrado nas condições experimentais de referência estabelecidas por Shakya e Kodur (2015). Consequentemente, os parâmetros termomecânicos dos materiais constituintes, tais como a condutividade térmica, o calor específico e a expansão térmica, foram calculados como funções dependentes da temperatura, seguindo a mesma metodologia empregada no estudo experimental citado. Essa abordagem assegura a compatibilidade direta e a validação consistente entre os resultados numéricos obtidos e os dados experimentais de base. As Figuras 3 a 8 mostram a variação dessas características em função da temperatura.

Figura 3- Calor Específico do Aço x Temperatura

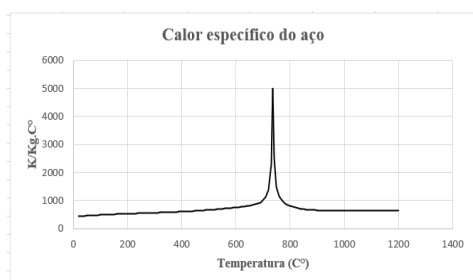


Figura 4 - Condutividade Térmica do Aço x Temperatura

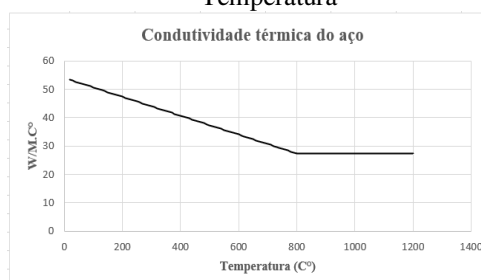


Figura 5 - Módulo de Elasticidade do Concreto x Temperatura

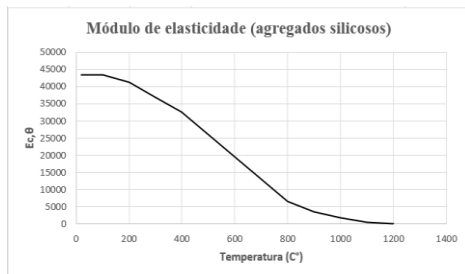


Figura 6 - Calor Específico do Concreto x Temperatura

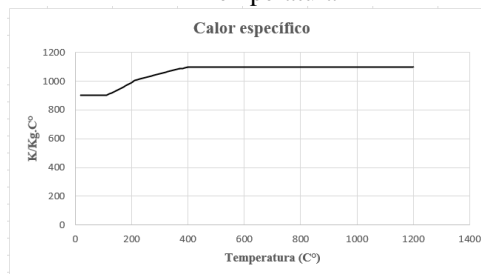


Figura 7 - Massa Específica do Concreto x Temperatura

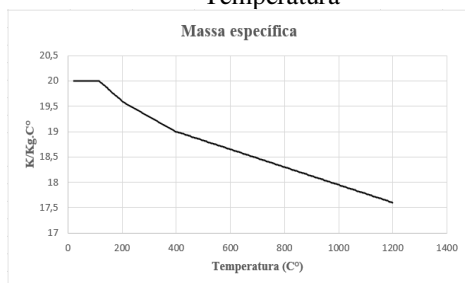
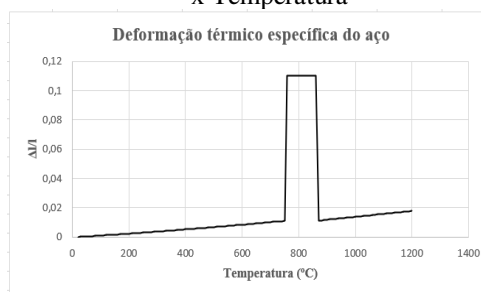


Figura 8 – Deformação térmica específica do Aço x Temperatura



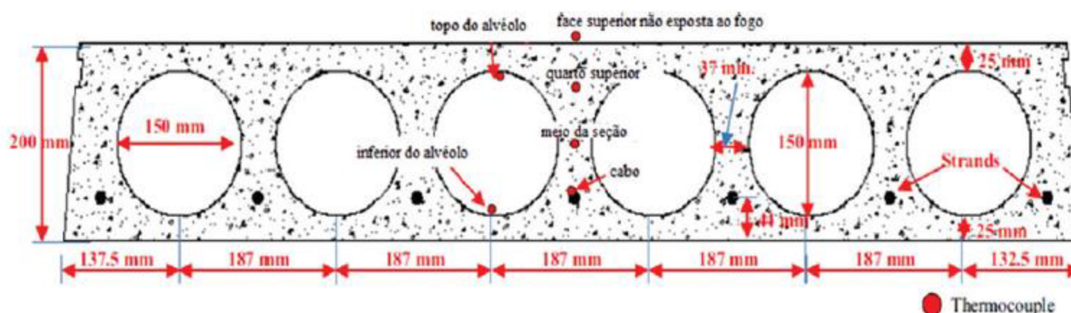
Fonte: Autor (2025).

3.2 Características do modelo

A seção transversal alveolar foi caracterizada pela presença de seis alvéolos com diâmetro nominal de 150mm, orientados ao longo do vão com dimensões nominais de 4,0 m de comprimento, 1,2m de largura e 0,2m de espessura (altura). A armadura de protensão foi composta por sete cordoalhas, cada uma com diâmetro de 12,7 mm e resistência característica à tração de 1860 MPa. A geometria e as dimensões detalhadas da seção transversal da laje estão ilustradas na Figura 9.

Em seu estudo, Shakya e Kodur (2015) instrumentaram a laje alveolar com termopares (*thermocouple*) posicionados na face dos alvéolos. O objetivo foi monitorar a distribuição de temperatura na seção transversal do elemento estrutural durante a exposição ao incêndio. No desenho ilustrativo do modelo, a localização exata desses sensores foi representada por pontos vermelhos para uma identificação visual clara.

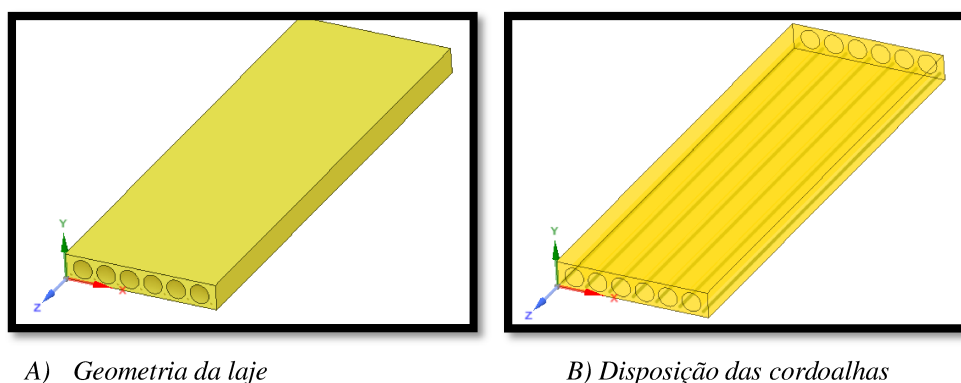
Figura 9 - Seção transversal da laje alveolar utilizada para validação computacional.



Fonte: ARAUJO & PINTO (2015).

Respeitando integralmente essas características geométricas e dimensionais, a Figura 10 ilustra em detalhe a disposição das cordoalhas de protensão e a configuração dos alvéolos. Esta distribuição específica foi concebida para otimizar a rigidez estrutural do elemento, garantir a eficiência do preenchimento durante a concretagem e assegurar um equilíbrio ideal entre a minimização do peso próprio e a maximização da capacidade de carga.

Figura 10 - Geometria da laje e disposição das cordoalhas na laje alveolar.



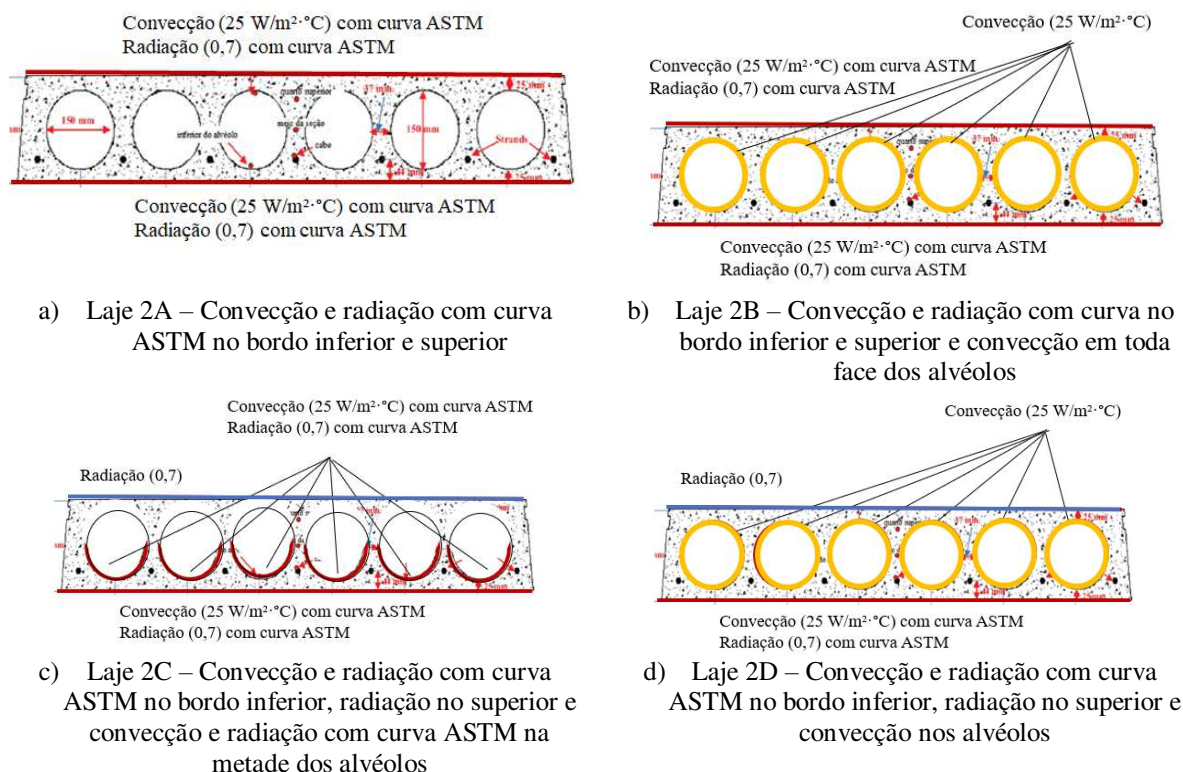
A) Geometria da laje

B) Disposição das cordoalhas

Fonte: Autor (2025).

Segundo o processo de modelagem adotado, a geração da malha de elementos finitos considerou parâmetros distintos para as superfícies correspondentes aos alvéolos e para as demais regiões do modelo. A superfície interna dos núcleos alveolares, devido à sua geometria singular, exigiu um refinamento e uma discretização específicos como é apresentado nas Figuras 11 e 12. Dessa forma, otimizando o número de elementos dentro do limite operacional imposto pela versão estudantil do *software* utilizado, procedeu-se à geração da malha, cuja configuração final está representada nas figuras subsequentes.

Figura 14 – Características térmicas para a Análise 2.



Fonte: Adaptado por ARAÚJO & PINTO (2020).

Para a análise térmica da laje alveolar, definiram-se condições de aplicação do incêndio distintas para as faces superior e inferior, de modo a representar fielmente o cenário de incêndio. Na face superior, em contato com o ambiente, adotou-se uma condição de radiação com temperatura ambiente e emissividade de 0,7, a qual modela a transferência de calor por radiação entre a superfície da laje e o meio circundante, este mantido a temperatura constante. Na face inferior, exposta ao fogo, aplicou-se a curva tempo-temperatura padrão de incêndio (ASTM E119) complementada por uma condição de contorno combinada que incorpora os mecanismos de convecção, com coeficiente de transferência de calor de $25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, e radiação, com emissividade de 0,7, de forma a capturar adequadamente a transferência de calor dos gases e chamas para a superfície da estrutura. Dessa forma, o modelo numérico integra os principais mecanismos de transferência de calor – condução, convecção e radiação – de maneira fisicamente consistente, assegurando que os resultados obtidos reproduzam com precisão o comportamento térmico da laje alveolar em situação de incêndio. Deve-se ressaltar que os valores térmicos usados no trabalho foram obtidos por Araújo e Pinto (2020) que estudaram as lajes de Shakya e Kodur (2015).

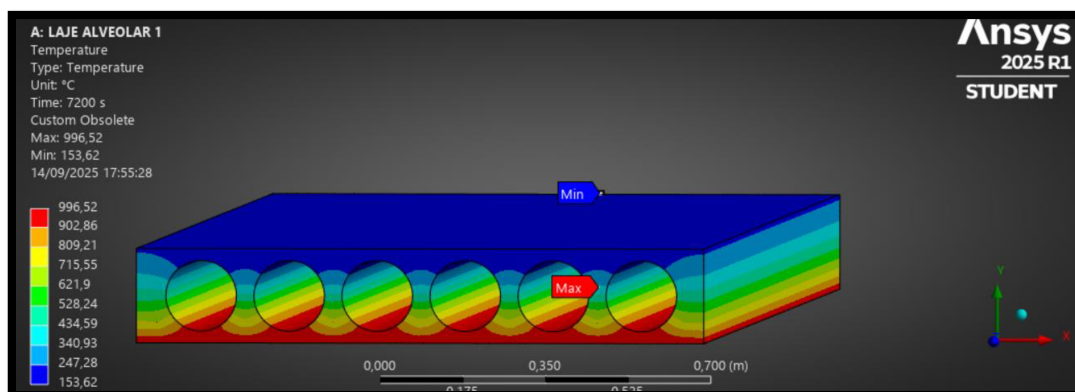
4 RESULTADOS

Com os dados inseridos no programa foram obtidos os resultados para cada análise.

4.1 Análise 1: Laje 1

A condição de incêndio foi simulada por meio da aplicação da ação do incêndio na face inferior da laje, enquanto na face superior considerou-se troca por radiação com o ambiente à temperatura constante. A distribuição de temperatura resultante na laje alveolar, obtida por meio desta modelagem, é apresentada na Figura 15. A análise térmica foi conduzida integralmente no módulo “*Thermal Structural*” da plataforma de simulação.

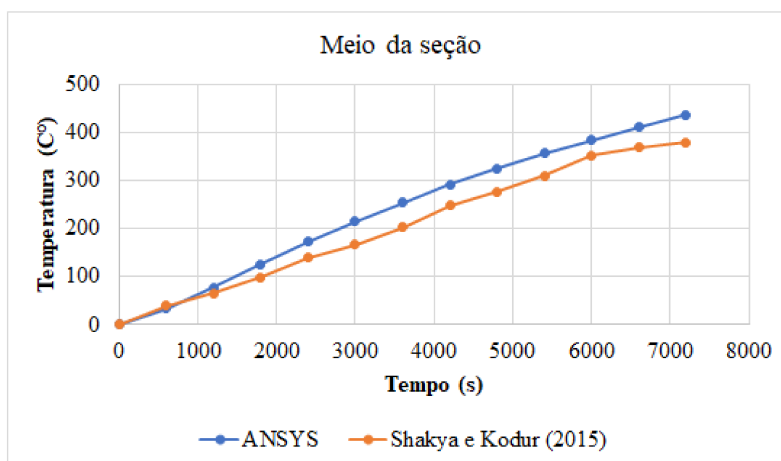
Figura 15 - Distribuição de temperatura em laje alveolar em situação de incêndio da Laje 1.



Fonte: Autor (2025).

A partir dos dados obtidos, procedeu-se à comparação sistemática com os resultados experimentais de referência. Para a análise termográfica da face dos alvéolos, monitorou-se a evolução da temperatura em três pontos distintos: no centro da face, no quarto superior e no topo da seção transversal. Desse modo, foi possível quantificar a variação térmica ao longo do intervalo de 0 a 120 minutos de exposição ao incêndio para todos os cenários investigados, permitindo uma avaliação abrangente do gradiente térmico do elemento (Figura 16).

Figura 16 - Gráfico comparativo da variação de temperatura pelo tempo no meio da seção.



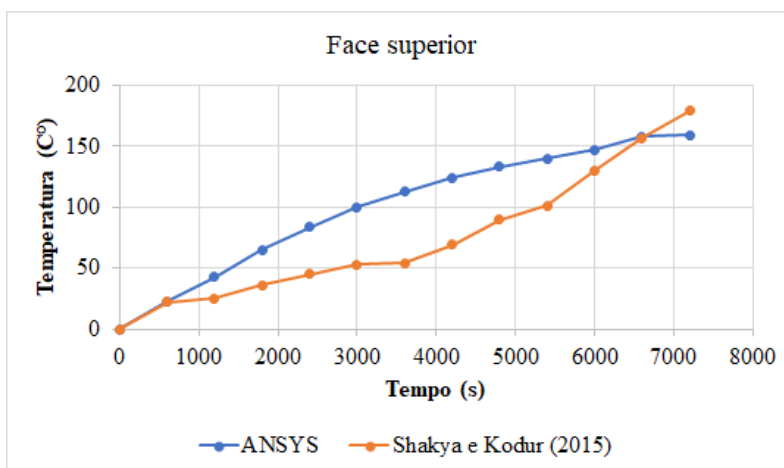
Fonte: Autor (2025).

Observa-se que a curva de temperatura no meio da seção, obtida por meio da simulação no ANSYS, apresentou comportamento semelhante à curva experimental registrada por Shakya e Kodur (2015). Nota-se uma concordância entre as curvas no intervalo inicial de até 1000 segundos, onde as trajetórias térmicas se mantiveram praticamente sobrepostas. A partir desse

ponto, identificou-se uma divergência progressiva, que resultou em uma variação máxima da ordem de 60 °C ao final do período de exposição ao incêndio.

Analisando a Figura 17, que apresenta o comportamento térmico no topo da laje, observou-se uma variação significativa ao longo do percurso monitorado. A temperatura atingiu seu valor máximo no ponto correspondente à metade do vão, enquanto nas extremidades os valores registrados aproximaram-se consideravelmente. Ao final do período de incêndio, registraram-se 179 °C no experimento físico e 159 °C no modelo numérico do ANSYS, resultando em uma diferença de apenas 20 °C no estágio final.

Figura 17 - Gráfico comparativo da variação de temperatura pelo tempo no topo da laje.



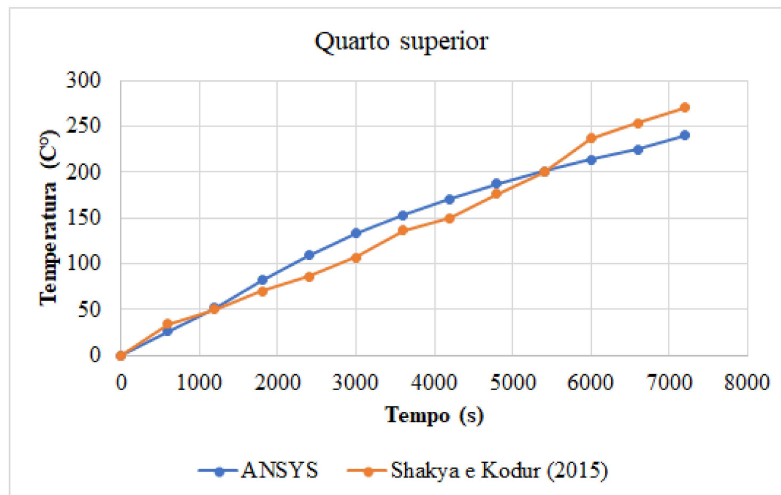
Fonte: Autor (2025).

Os resultados numéricos buscaram representar fielmente o comportamento experimental da laje sob ação térmica do incêndio. Entretanto, constatou-se uma discrepância na região central do vão, com divergência máxima da ordem de 60 °C, possivelmente atribuível à ausência de parâmetros não informados no estudo experimental ou à influência complexa dos alvéolos na face monitorada. Apesar dessa variação pontual, a viabilidade do modelo e a validade do estudo são sustentadas pela convergência dos valores inicial e final obtidos na comparação, demonstrando coerência global na representação do fenômeno térmico.

Com base na análise comparativa realizada no quarto superior da face dos alvéolos (Figura 18), foi possível identificar um comportamento térmico bastante semelhante entre os dados experimentais reportados por Shakya e Kodur (2015) e os resultados obtidos por meio do modelo computacional. Nessa região, observou-se uma variação térmica reduzida ao longo do tempo, mantendo-se consistente durante todo o período de monitoramento de 7200 segundos (120 minutos). Ao final da exposição ao incêndio, as temperaturas registradas tanto experimentalmente quanto numericamente apresentaram valores muito próximos, reforçando a concordância entre os dois conjuntos de dados.

Além disso, a análise comparativa abrangente, considerando os três parâmetros avaliados, demonstrou uma excelente correlação entre as curvas térmicas do estudo experimental e as simulações numéricas. A convergência dos resultados nas três comparações realizadas evidencia a precisão do modelo computacional desenvolvido em reproduzir o comportamento térmico real da laje alveolar. Dessa forma, os resultados consistentes e satisfatórios obtidos validam o modelo numérico proposto, confirmando sua confiabilidade e precisão para a realização de análises futuras e estudos paramétricos envolvendo perfis estruturais semelhantes.

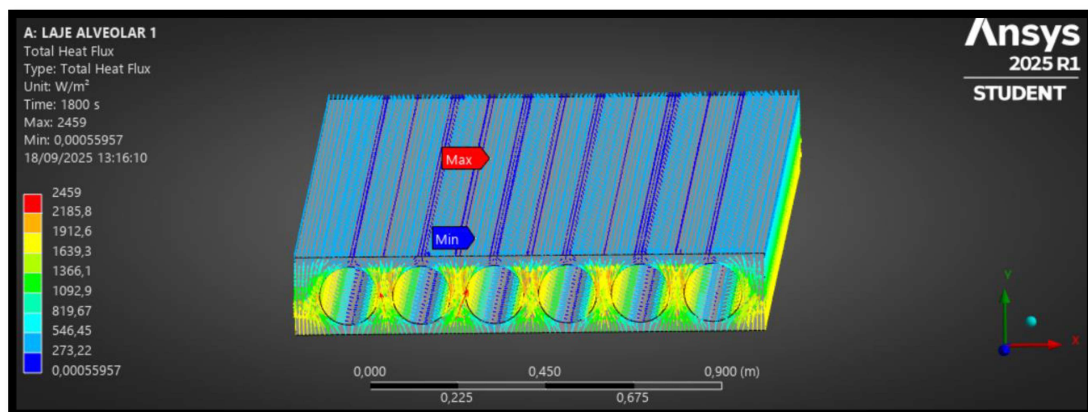
Figura 18 - Gráfico comparativo da variação de temperatura pelo tempo no quarto superior da face.



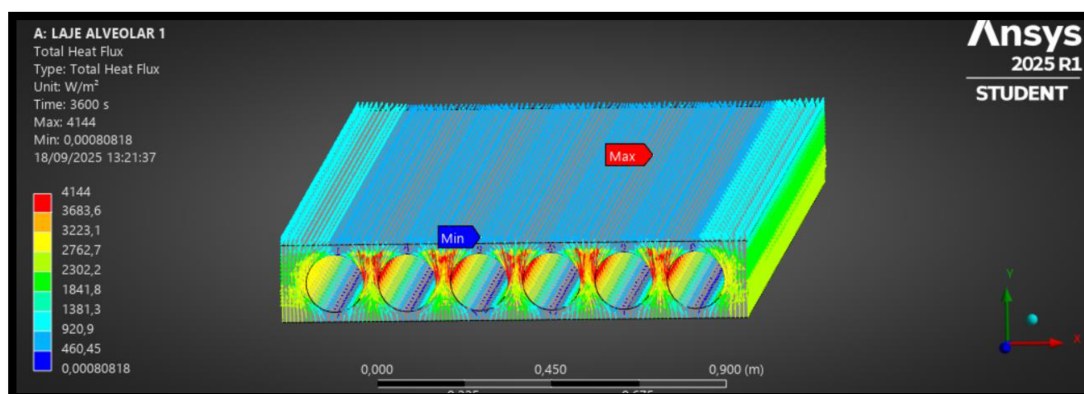
Fonte: Autor (2025).

O elemento que distingue esta laje é a sua geometria interna, composta por uma série de vazios longitudinais (os alvéolos). São estes vazios que modificam a maneira como o calor se propaga através do elemento, tornando sua análise térmica mais complexa e interessante do que a de uma laje maciça. A análise da transferência de calor em sua seção transversal, considerando o papel isolante dos alvéolos é importante para entender como o fogo é propagado na situação de um incêndio. Nesse sentido, a Figura 19 mostra como ocorre a transferência de calor na laje considerando 30, 60 e 120 minutos de incêndio.

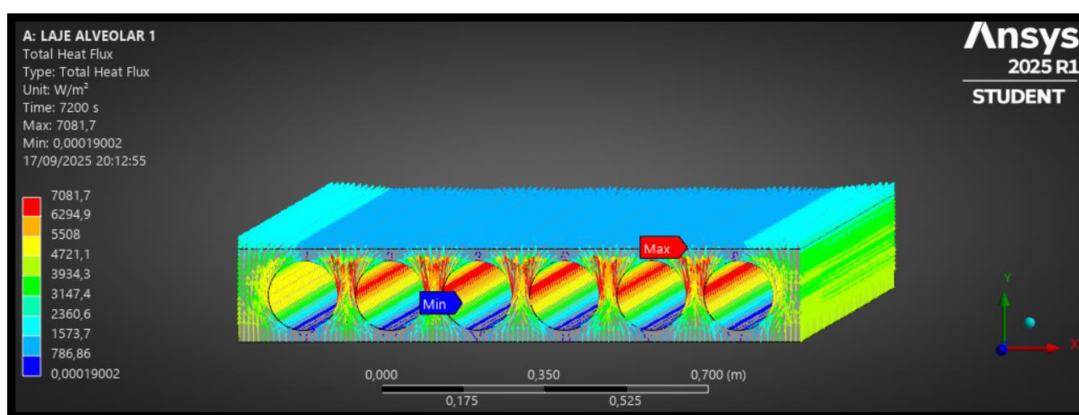
Figura 19 - Distribuição de transferência de calor total na laje alveolar em três momentos do incêndio.



a) Fluxo de calor aos 1800s (30min)



b) Fluxo de calor aos 3600s (60min)



c) Fluxo de calor aos 7200s (120min)

Fonte: Autor (2025).

Verifica-se que à medida que a intensidade do incêndio aumenta, o fluxo de calor, aumenta nas paredes dos alvéolos. A radiação e a convecção na parte inferior com a variação da temperatura com o tempo, contribui para que a transferência de calor por meio do incêndio fique perto dos alvéolos, na região mediana da laje. Como a radiação aplicada na parte superior, verifica-se que a energia foi menor nessa região, quando se finaliza o incêndio.

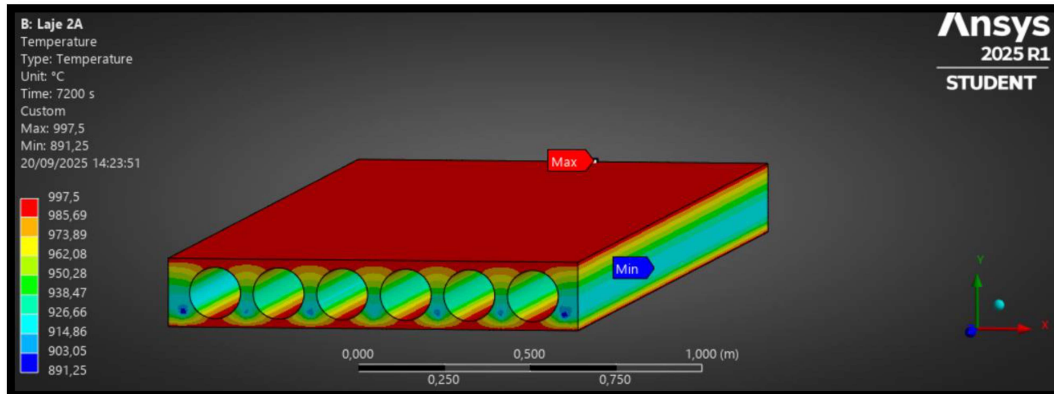
4.2 Análise 2

Para a segunda análise foi testada a mesma estrutura exposta a diferentes situações, também analisando a influência da convecção e radiação.

4.2.1 Laje 2A: Convecção e radiação com curva ASTM no bordo inferior e superior

A laje alveolar foi testada em uma condição extrema de incêndio, onde o fogo foi aplicado simultaneamente em sua face superior e inferior. Este cenário simula uma situação crítica de incêndio generalizado, que submete a estrutura à máxima severidade térmica, aquecendo toda a sua seção transversal de forma acelerada e homogênea, representando a ação do incêndio atuando em dois andares de um edifício. A Figura 20 mostra a temperatura obtida para a Laje 2A no tempo de 120min.

Figura 20 - Temperatura na Laje 2A.



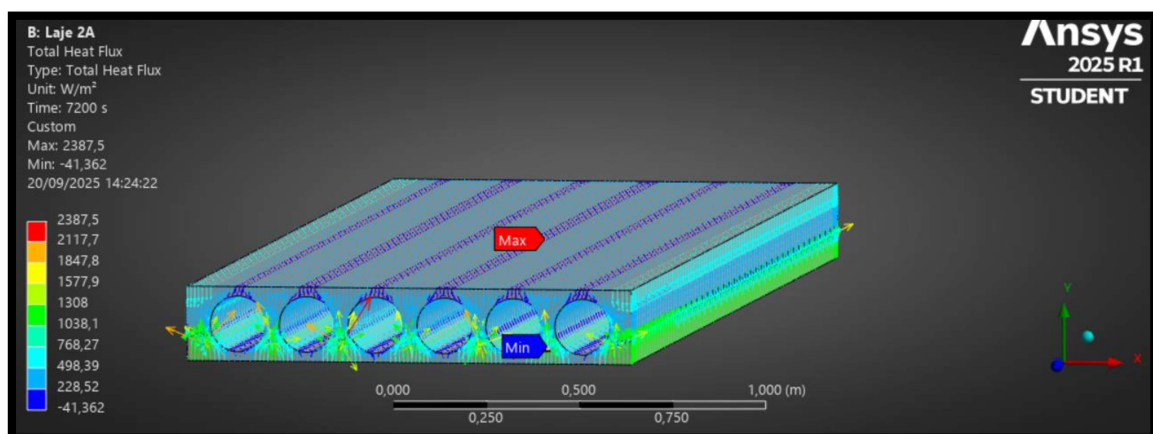
Fonte: Autor (2025).

Em contraste com o modelo da Laje 1, obtidos do Ansys, a Laje 2A, exposta ao fogo simultaneamente nas faces inferior e superior, exibiu uma variação térmica em torno de 100°C.

Nessa simulação, observou-se que a região central entre os alvéolos apresentou temperaturas mais baixas, atuando como um núcleo de relativo isolamento térmico durante o incêndio. Esse comportamento destacou-se principalmente pela temperatura mínima registrada ao final de 120 minutos de exposição ao fogo, que foi identificada nas cordoalhas de protensão, e na região central da face, entre os alvéolos.

Esse resultado evidencia o papel dos alvéolos na criação de zonas de menor condução de calor e reforça a importância da geometria interna da laje na proteção dos componentes críticos contra altas temperaturas, mesmo sob condições severas de exposição dupla ao fogo (Figura 21).

Figura 21 - Distribuição de transferência de calor em situação de incêndio na Laje 2A.



Fonte: Autor (2025).

Nessa simulação, o maior fluxo de transferência de calor também permaneceu próximo aos alvéolos, porém, com uma intensidade menor. O valor numérico do fluxo de calor foi menor se comparado com a Laje 1. Talvez essa menor intensidade de transferência de calor deve-se pelo equilíbrio de temperaturas das duas faces, já que a variação de temperatura nesta laje foi menor,

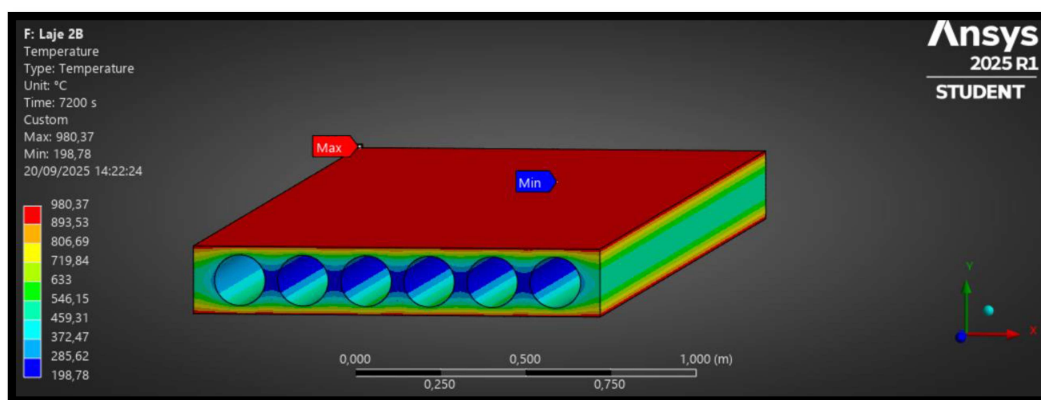
em torno de 100°C. Deve-se ressaltar que o fluxo de calor foi negativo na região dos alvéolos, indicando que o calor saiu do sistema, o que pode ter contribuído com o equilíbrio.

Verifica-se ainda que a radiação e a convecção na parte inferior e superior com a variação da temperatura com o tempo, contribuiu para que se dissipasse a energia do elemento, já que em comparação com a Laje 1, o valor máximo do fluxo foi menor nessa laje.

4.2.2 Laje 2B: Convecção e radiação com curva no bordo inferior e superior e convecção em toda face dos alvéolos

Para esse modelo, a Laje 2B foi exposta ao fogo da mesma forma que a laje 2A, porém, foi adicionado na simulação a convecção de 25 W/m².C° em toda a face dos alvéolos. Os resultados são apresentados na Figura 22.

Figura 22 - Distribuição temperatura em situação de incêndio na Laje 2B.

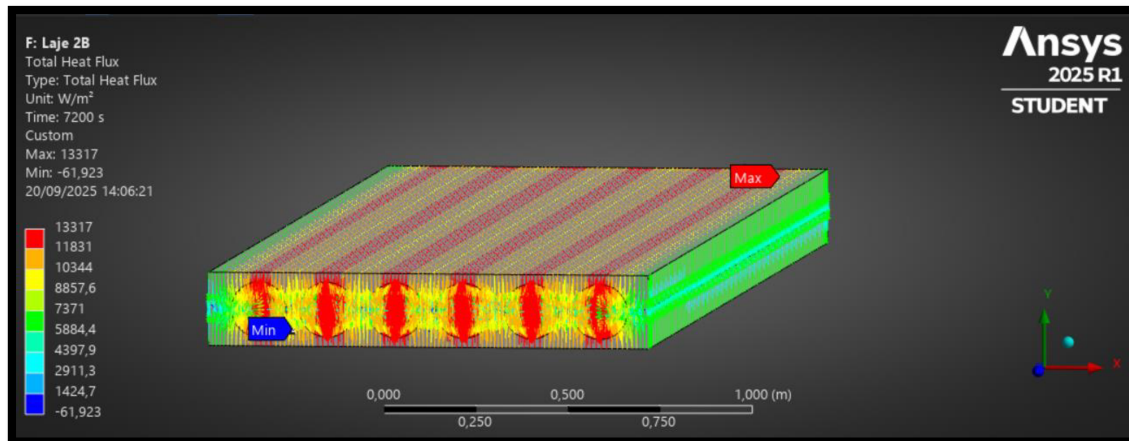


Fonte: Autor (2025).

Nesse caso, a presença da convecção nos alvéolos alterou consideravelmente a temperatura na laje. Nesse caso, obteve-se a temperatura de 198°C° na parte dos alvéolos e cerca de 980°C° nas faces externas, correspondendo uma variação térmica em torno de 780°C.

A Figura 23 apresenta a transferência de calor da laje 2B. Em contraste com outros modelos, a simulação da Laje 2B revelou uma acentuada variação na transferência de calor, com o fluxo maior, concentrado nos alvéolos, já que os mesmos auxiliaram na transferência de calor do sistema, por meio da convecção.

Figura 23 - Gráfico de transferência de calor na Laje 2B.



Fonte: Autor (2025).

A consequência é um pico de transferência de calor nas bordas superior e inferior de cada alvéolo, o que pode acelerar localmente a perda de resistência do concreto e elevar a temperatura nas armaduras próximas a essas regiões.

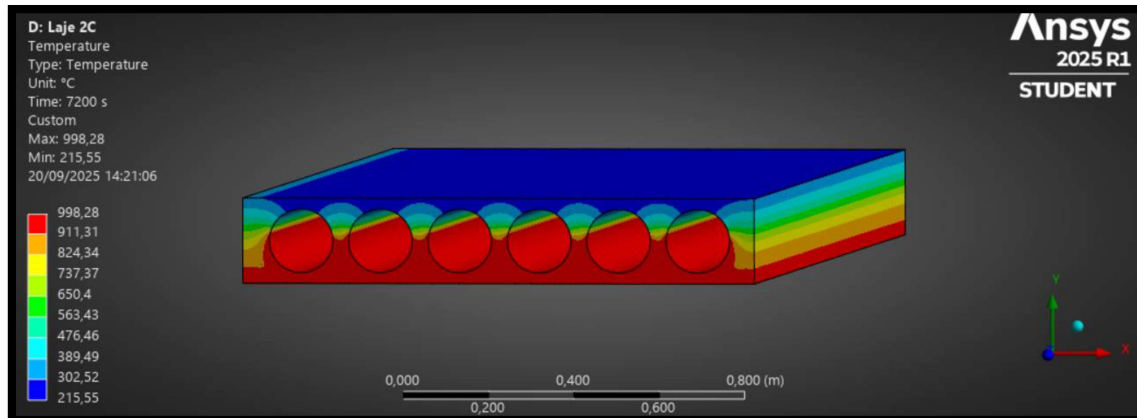
4.2.3 Laje 2C: Convecção e radiação com curva ASTM no bordo inferior, radiação no superior e convecção e radiação com curva ASTM na metade dos alvéolos

Na simulação da Laje 2C, aplicou-se uma condição de incêndio assimétrica combinada. A face inferior foi submetida diretamente à curva de incêndio padrão e a metade inferior das paredes dos alvéolos também recebeu exposição direta ao fogo. Na face superior da laje, considerou-se a transferência de calor por radiação térmica, com emissividade de 0,7, simulando a presença de gases quentes ou chamas indiretas no ambiente superior.

Observou-se que o fogo se propagou verticalmente a partir da face inferior, atingindo até a metade da altura dos alvéolos, com redução gradual de temperatura ao longo dessa trajetória. A região do topo da laje, embora exposta apenas à radiação (emissividade 0,7), não recebeu calor direto das chamas, resultando em um aquecimento menos intenso.

Além disso, notou-se um comportamento térmico diferenciado nas paredes laterais dos alvéolos: as zonas onde um alvéolo não está próximo a outro apresentaram temperaturas significativamente menores em comparação com as regiões onde os alvéolos são adjacentes. Isso ocorre porque áreas isoladas tendem a dissipar calor com mais eficiência, enquanto grupos de alvéolos criam um efeito de acumulação térmica, facilitando a transferência de calor entre si. A Figura 24 apresenta a transferência de calor para a laje analisada.

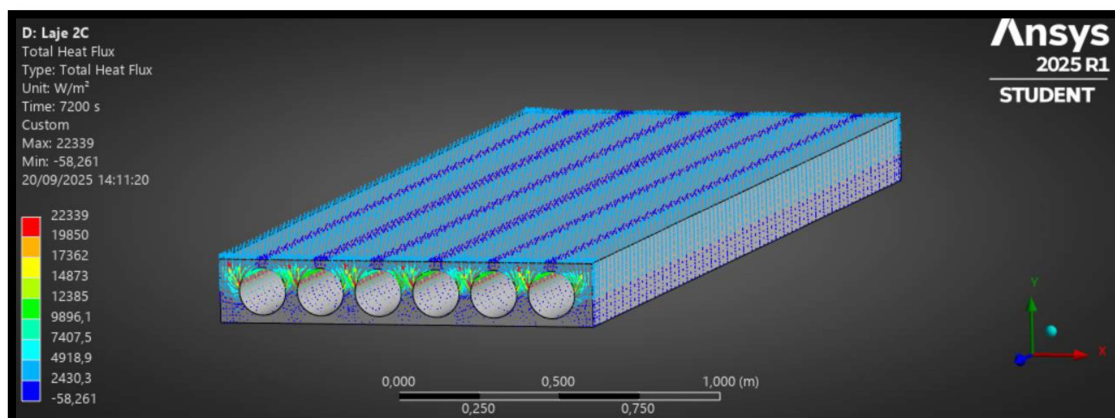
Figura 24 - Distribuição temperatura em situação de incêndio na Laje 2C.



Fonte: Autor (2025).

No que se refere a transferência de calor da Laje 2C (Figura 25), pode se observar que há a dissipação de calor na parte inferior, e o fluxo se intensifica na parte superior dos alvéolos.

Figura 25 - Gráfico de transferência de calor na Laje 2C.



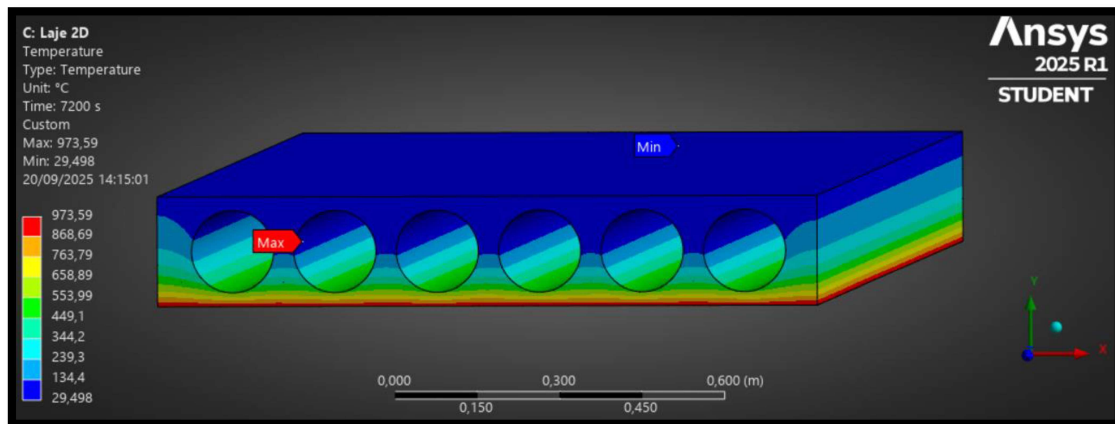
Fonte: Autor (2025).

Nota-se que a radiação imposta na parte superior, pode ter contribuído para a perda de calor na laje.

4.2.4 Laje 2D: Convecção e radiação com curva ASTM no bordo inferior, radiação no superior e convecção nas faces dos alvéolos

Na modelagem da Laje 2D, manteve-se configuração semelhante à da Laje 2C, com exposição ao incêndio pela face inferior e radiação na face superior (emissividade 0,7). Entretanto, a principal diferença reside na aplicação da convecção térmica: enquanto na Laje 2C o efeito de convecção foi restrito à metade inferior dos alvéolos, na Laje 2D toda a superfície interna dos alvéolos foi submetida à convecção em toda sua superfície (Figura 26).

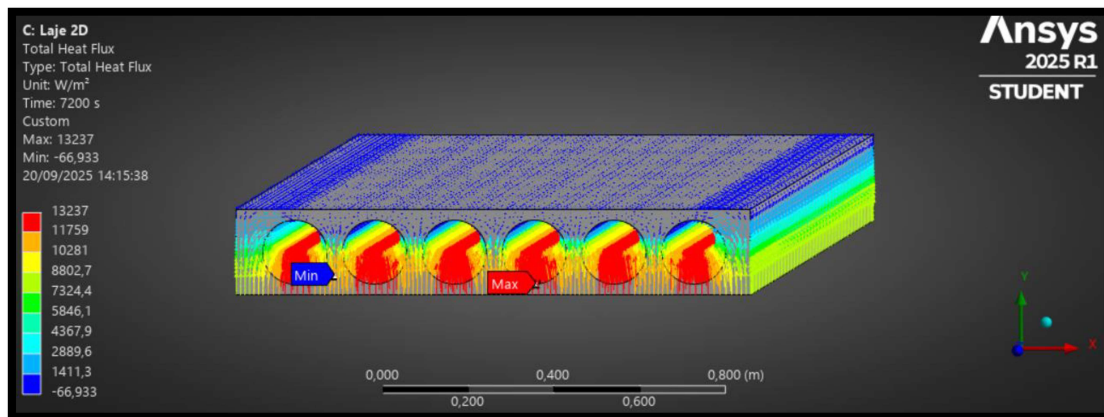
Figura 26 - Distribuição temperatura em situação de incêndio na Laje 2D.



Fonte: Autor (2025).

É possível observar que sem a curva de incêndio na metade inferior dos alvéolos e com a convecção aplicada por todo ele obtém-se uma menor transferência para o topo, com a temperatura na face superior chegando a apenas 29°C ao final do incêndio, quase a temperatura ambiente. A diferença de temperatura foi em torno de 944°C, a maior entre as análises realizadas. A Figura 27 apresenta a distribuição de calor para a Laje 2D.

Figura 27 – Distribuição de transferência de calor na Laje 2D.



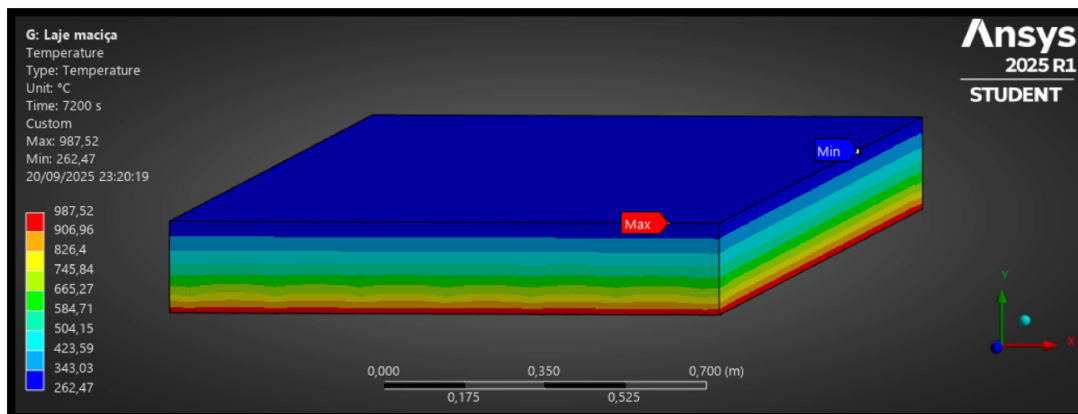
Fonte: Autor (2025).

Em relação a transferência de calor, o teste apresentou um comportamento similar a Laje 2B, com a convecção aplicada nos alvéolos. Porém, nesse caso, o fluxo de calor está fluindo na parte inferior dos alvéolos onde foi aplicada a curva de incêndio. Pode-se observar ainda que nas bordas superiores da laje houve uma dissipação de calor, talvez pela radiação imposta no modelo.

4.2.5 Laje Maciça

Uma forma de observar melhor a diferença no comportamento das lajes alveolares foi compará-las com lajes maciças. Nesse caso, foi simulada uma laje com as mesmas características da Laje 1. A Figura 28 apresenta o gradiente térmico obtido.

Figura 28 – Distribuição temperatura em situação de incêndio na Laje maciça.

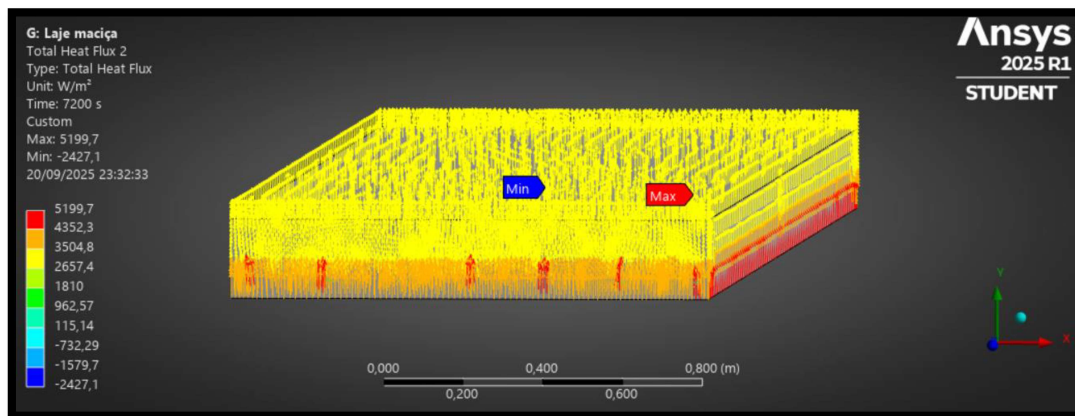


Fonte: Autor (2025).

Foi possível observar que, no tempo de 7200 segundos (2 horas) de exposição ao incêndio, a distribuição de temperatura na laje maciça apresenta-se progressiva e relativamente uniforme ao longo de toda a sua altura, formando um gradiente térmico bem definido.

Este comportamento é característico e esperado para elementos maciços de concreto, onde o mecanismo predominante de transferência de calor é a condução através do material sólido e contínuo. A ausência de cavidades ou alvéolos evita a formação de fluxos de convecção interna ou de efeitos chaminé, permitindo que o calor se propague de forma mais lenta e previsível. A Figura 29 mostra a distribuição de calor na laje maciça.

Figura 29 – Distribuição de transferência de calor na maciça.



Fonte: Autor (2025).

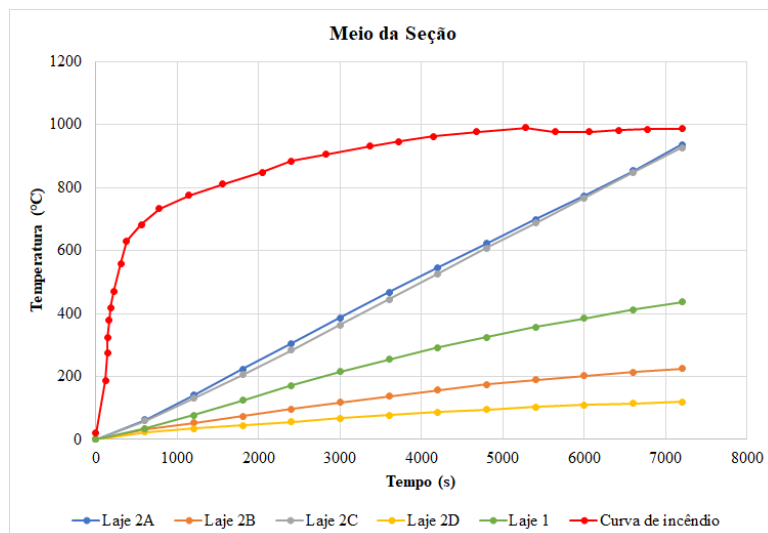
Em relação a distribuição de fluxo total de calor, pode-se observar que o maior fluxo de transferência está na região próxima ao incêndio, ocorrendo de forma significativa a perda de calor em partes da laje.

4.3 Comparação dos resultados

As Figuras 30 e 31 mostram a temperatura e o fluxo total de calor em função do tempo, respectivamente para as diferentes análises no meio da seção. A partir da Figura 30 verifica-se

que o comportamento da Laje 2A e a Laje 2C no meio da seção tiveram um comportamento muito próximo. A temperatura final de todas as análises foi menor que a curva de incêndio analisada.

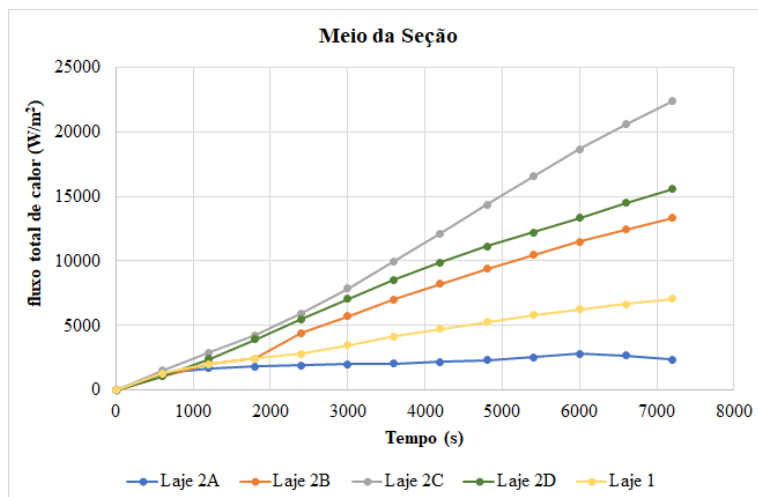
Figura 30 – Gráfico comparativo de temperatura no meio da seção para as diferentes situações da laje



Fonte: Autor (2025).

A partir dos resultados da Figura 31 nota-se que até aproximadamente 20min de incêndio, o fluxo de calor se manteve muito próximo nas análises realizadas. A partir desse momento a dissipação de energia foi diferente nas situações investigadas.

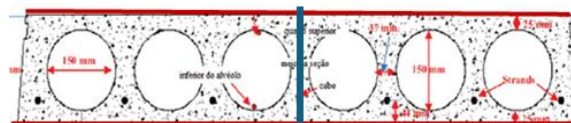
Figura 31 –Comparação do fluxo total de calor no meio da seção para as diferentes situações da lajes



Fonte: Autor (2025).

Observou-se uma significativa discrepância na variação temporal tanto da temperatura quanto do fluxo de calor entre os modelos testados. Para investigar essa divergência, realizou-se uma análise comparativa dos perfis de temperatura na metade do vão, ao longo da altura da face alveolar, conforme apresentado na Figura 32. Este estudo, conduzido no instante final do incêndio (7200s), permitiu visualizar e quantificar as diferenças no comportamento dos modelos de interesse.

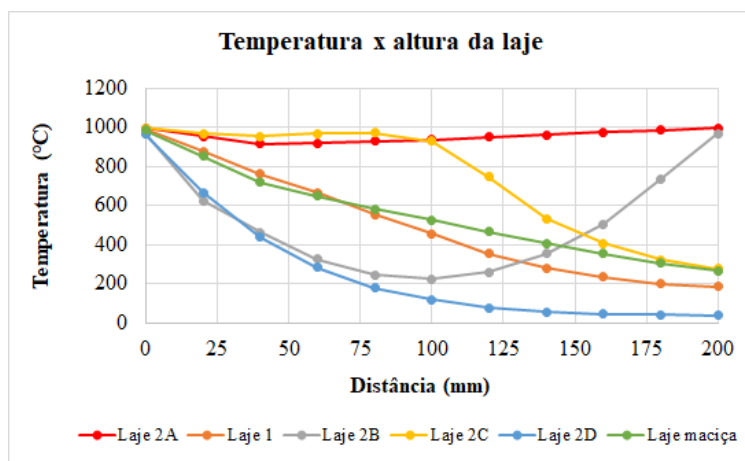
Figura 32 – Trecho da análise térmica e de fluxo de calor em função da distância.



Fonte: Adaptado por ARAÚJO & PINTO (2020).

Na Figura 33, foi possível observar o gráfico da temperatura em função da altura da laje. O modelo Laje 1, que foi o que mais se aproximou dos resultados do modelo experimental de Shakya e Kodur (2015), mostra uma queda na temperatura e chega em 179 C° no topo da laje. Já a Laje 2D mostra uma curva mais acentuada, o que mostra que foi transferido menos temperatura até chegar no topo. Os modelos de Laje 2A e Laje 2B começam e terminam com praticamente a mesma temperatura. A presença da convecção nos alvéolos fez com que tivesse uma discrepância de quase 800C° na parte central da Laje 2B. Por fim, a Laje 2C, que estava exposta ao fogo também no lado inferior do alvéolo permaneceu com a temperatura constante do fundo até o meio da laje e depois a temperatura foi decaindo. Outro ponto a ser analisado é que a temperatura da Laje 2A praticamente se manteve constante em toda a espessura da laje.

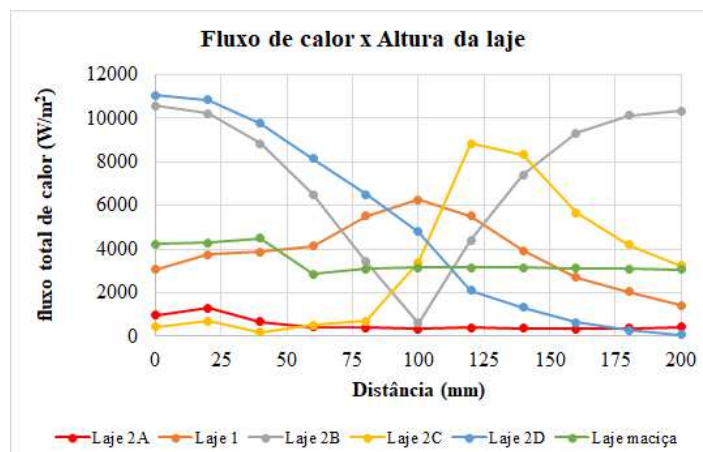
Figura 33 – Análise térmica função da altura da laje.



Fonte: Autor (2025).

Para a análise feita em relação ao fluxo de calor, foi observada uma variação na altura na maioria das simulações, conforme apresentado na Figura 34. A Laje 2D, a qual foi aplicada a convecção por toda a face dos alvéolos teve um comportamento de decréscimo no fluxo de calor ao longo do comprimento da laje. Já a Laje 2A permaneceu com o fluxo constante, visto que estava sofrendo incêndio no topo e no fundo. As demais simulações sofreram uma alteração na curva no trecho dos alvéolos.

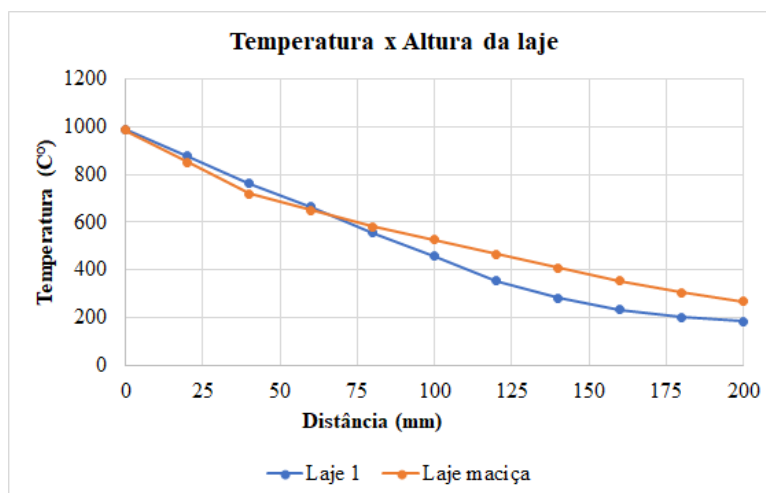
Figura 34 – Gráfico de análise de fluxo de calor em função da distância.



Fonte: Autor (2025).

Um outro ponto a ser analisado foi a comparação a Laje 1 e a Laje maciça. A fim de verificar as análises de ambas as situações, foram apresentadas as Figuras 35 e 36 retiradas das figuras anteriores. Verifica-se que o comportamento da temperatura de ambas as lajes de aproximaram. Ambas as lajes tiveram um comportamento similar, porém, a Laje 1 apresentou menos transferência de temperatura a partir da altura da 100mm, com uma diferença de quase 200C° a 150mm de altura.

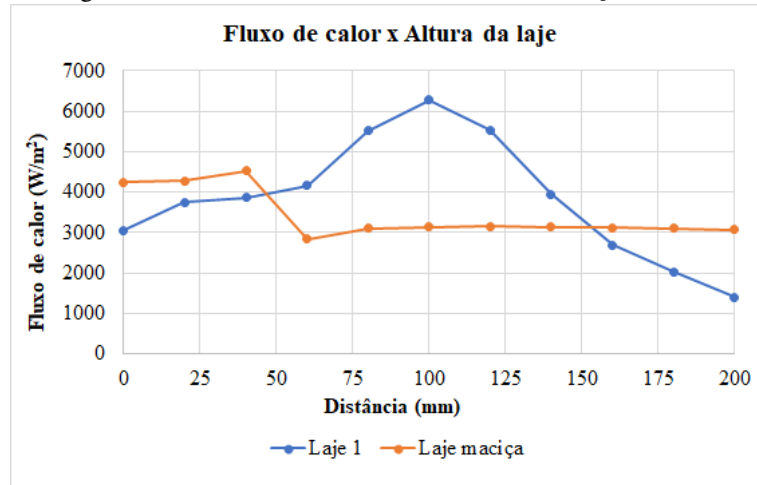
Figura 35 – Gráfico de temperatura em função da altura da laje.



Fonte: Autor (2025).

Entretanto, de acordo com a Figura 36, o fluxo de calor foi diferente. Nesse caso, foi possível analisar que a laje maciça possui um fluxo maior próximo ao incêndio e a partir de 60mm de altura ela permanece constante até o topo. Além disso, a Laje 1 tem a maior concentração de fluxo na altura do núcleo do alvéolo. Embora o comportamento da temperatura seja próximo em ambas as situações, verifica-se que, a presença dos alvéolos interfere na distribuição do fluxo de calor das análises.

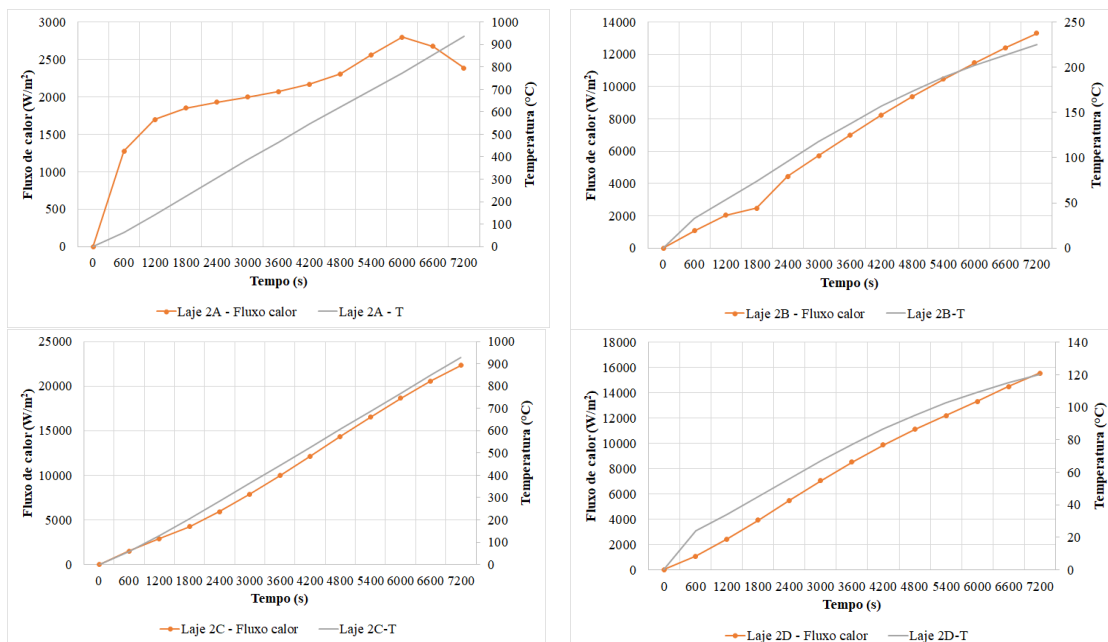
Figura 36 – Gráfico de Fluxo total de calor em função da altura da laje.



Fonte: Autor (2025).

A fim de verificar a relação do fluxo de calor e a temperatura com o tempo de atuação do incêndio, foi apresentada a Figura 37. A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o fluxo de calor e a temperatura ficaram muito próximas, para as Lajes 2B, 2C e 2D. Esse comportamento pode ser explicado pois entende-se que a quantidade do fluxo por convecção deve ser, nesses casos, predominante se comparado a quantidade de fluxo por radiação pelo elemento. No caso da Laje 2A, a quantidade do fluxo por radiação deve ser predominante se comparado ao da convecção. Essas considerações refletem as curvas das equações da quantidade de calor de cada uma das transferências de calor: para a radiação, a equação tende a uma exponencial e ao da convecção, uma reta.

Figura 37 – Gráfico de Fluxo total de calor em função da altura da laje.



Fonte: Autor (2025).



5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo investigar o comportamento de lajes alveolares sob ação de incêndio, utilizando o programa Ansys Workbench para realização de simulações numéricas. Inicialmente, o modelo desenvolvido foi validado mediante comparação com dados experimentais obtidos da literatura, especificamente do ensaio conduzido por Shakya e Kodur (2015), demonstrando boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais. Posteriormente, foram realizadas análises paramétricas para avaliar a resposta térmica da laje alveolar sob diferentes condições de exposição ao fogo e características construtivas. Por fim, realizou-se uma análise comparativa com uma laje maciça de dimensões equivalentes, submetida às mesmas condições de carregamento térmico. A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A presença de convecção nos alvéolos diminui o fluxo de calor e a temperatura na região e faz o calor ir em direção aos núcleos.
- O incêndio se propagando até a metade inferior do alvéolo eleva consideravelmente a temperatura da metade da altura até o topo.
- Em todas as situações o fluxo total de calor foi mais acentuado na região entre alvéolos.
- O comportamento da temperatura e do fluxo de calor se moldam de acordo com a geometria do alvéolo e as condições de contorno.
- No meio da altura da laje o fluxo de calor e a temperatura depende das características de contorno, uma vez que alterando alguma característica pode mudar totalmente a curva.
- A presença da convecção na face dos alvéolos fez com que o fluxo de calor ficasse muito concentrado entre a fundo/topo da laje e o face inferior do alvéolo.
- As lajes em que não tinha convecção nos alvéolos apresentaram curvas mais constantes.
- A consideração da radiação ou convecção dos alvéolos podem alterar as análises da temperatura e fluxo de calor e podem afetar a análise termo-estrutural das lajes.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, D.; PINTO, A. Análise numérica da distribuição de temperatura em lajes alveolares em situação de incêndio. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 62., 2020, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu: CBC, 2020. p. 1-16.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14432. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 2001.

_____. ABNT NBR 14861. Lajes alveolares pré-moldada de concreto protendido - requisitos e procedimentos. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 2011.

_____. ABNT NBR 15200. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 2004.

_____. ABNT NBR 15200. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. [S.l.]. 2012.

_____. ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.



_____. ABNT NBR 9062. Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. 2006.

BRUSHLINSKY, N. *et al.* **World fire statistics. International Association of Fire and Rescue Services (CTIF).** [S.l.]. 2016.

COSTA, C. E. T.. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado em situação de incêndio.** 2002. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FARIA, L. G; COSTA, T. R.. **Análise e Reforço de Lajes Alveolares Submetidas à Situação de Incêndio.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

ROCHA, F. M.; NETO, J. M. Análise de vigas mistas de aço e concreto pertencentes a pisos de baixa altura em situação de incêndio: ênfase à influência dos modelos constitutivos do concreto. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 7, nº 1, p. 168- 177, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952014000100008>

SANTOS, M. M. L. D. **Considerações iniciais sobre o comportamento de lajes mistas "steel deck" em situação de incêndio.** Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2015.

SILVA, V. P. e. **Estruturas de aço em situação de incêndio.** 170 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SHAKYA A.M, KODUR, V.K.R. Response of precast prestressed concrete hollowcore slabs under fire conditions. **Engineering Structures**, v. 87, p. 126–138, 2015.

TEIXEIRA, A. A. R.. **Desempenho de lajes alveolares protendidas em situação de incêndio.** 2016. 95 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.