



Análise da proteção passiva do pilar de concreto armado sob a ação do fogo

João Marcos Lacerda da Mata Silva (1); Vanessa Cristina de Castilho (2)

(1) *Graduando do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia; jmarcoslms1@ufu.br*

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

Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento térmico de um pilar de concreto armado submetido à ação do fogo por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizando o *software* ANSYS Workbench. Inicialmente, realizou-se a validação do modelo numérico com base em resultados experimentais disponíveis na literatura, a fim de verificar a capacidade da simulação em representar a evolução da temperatura na seção transversal do pilar. Em seguida, avaliou-se a influência da aplicação de uma camada de 2cm de proteção passiva envolvendo o elemento, considerando-se dois materiais de revestimento: argamassa à base de Vermiculita e Blaze Shield II. A análise é conduzida a partir da evolução da temperatura em diferentes pontos da seção transversal, comparando o pilar sem revestimento com os casos revestidos, de modo a investigar a contribuição dos materiais de proteção passiva no retardamento da transferência de calor para o interior do elemento estrutural. Os resultados obtidos mostram que esses revestimentos auxiliam na proteção do pilar sob a ação do incêndio.

Palavras-chave: concreto armado; incêndio; proteção passiva; análise térmica; elementos finitos.

Abstract

This study aims to analyze the thermal behavior of a reinforced concrete column subjected to fire exposure using the Finite Element Method, through the ANSYS Workbench software. Initially, the numerical model was validated based on experimental results available in the literature, in order to verify the ability of the simulation to represent the temperature evolution within the cross-section of the column. Subsequently, the influence of applying a 2 cm layer of passive fire protection surrounding the element was evaluated, considering two coating materials: vermiculite-based mortar and Blaze Shield II. The analysis is conducted based on the temperature evolution at different points of the cross-section, comparing the unprotected column with the coated cases, in order to investigate the contribution of passive protection materials in delaying heat transfer to the interior of the structural element. The obtained results indicate that these coatings contribute to improving the protection of the column under fire conditions.

Keywords: reinforced concrete; fire; passive fire protection; thermal analysis; finite element method.



1 Introdução

Estudos do comportamento de estruturas sob ação do fogo são motivados pela possibilidade de redução significativa do desempenho estrutural quando elementos são expostos a temperaturas elevadas. Ensaios experimentais têm fornecido informações importantes para a compreensão do fenômeno, porém demandam custos elevados e infraestrutura específica, o que reforça a relevância de abordagens numéricas para a análise da transferência de calor em elementos estruturais. Diversos trabalhos, desenvolvidos no Brasil e no exterior, evidenciam a importância de compreender o problema e seus efeitos sobre o desempenho das estruturas (VIEIRA; COELHO, 2020; PIERIN; SILVA, 2014; KADA et al., 2015).

Situações de incêndio representam risco tanto à segurança humana quanto ao patrimônio. Incêndios de médias e grandes proporções podem ocasionar prejuízos materiais e perdas de vidas, razão pela qual sua avaliação é necessária, especialmente quando se considera a influência das altas temperaturas sobre as propriedades dos materiais estruturais (FERREIRA, 2019). A elevação de temperatura pode provocar redução da resistência e alterações no comportamento do concreto e do aço, influenciando a resposta global de elementos estruturais e tornando essencial o estudo do aquecimento ao longo do tempo.

No Brasil, estruturas em concreto armado e em aço são amplamente empregadas, sendo importante considerar, no caso do concreto, as transformações físicas e químicas que podem ocorrer durante a exposição ao fogo. A determinação do campo de temperaturas no interior do elemento ao longo do tempo é etapa central, pois condiciona o nível de agressividade térmica imposto ao concreto e às armaduras. Assim, a análise térmica transiente constitui ferramenta fundamental para compreender a evolução da temperatura na seção de pilares e subsidiar avaliações de desempenho em situação de incêndio.

Em condições usuais de serviço, o dimensionamento de elementos de concreto armado segue as recomendações da ABNT NBR 6118:2026, adotando temperatura ambiente de referência. Em situação de incêndio, a verificação do desempenho ao fogo relaciona-se ao atendimento do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), conforme estabelecido pela ABNT NBR 14432:2001, entre outros documentos aplicáveis. Dessa forma, torna-se relevante estudar a evolução térmica de pilares submetidos a uma ação térmica representativa, por meio de curvas



padronizadas temperatura–tempo e condições de contorno adequadas para convecção e radiação.

Segundo Mendes (2004), os materiais utilizados como revestimento térmico devem apresentar capacidade de proteção térmica em altas temperaturas, de modo que mantenham sua integridade durante o incêndio, sem causar aumento significativo no peso próprio da estrutura. Para isso, é necessário que tais materiais apresentem baixa massa específica, baixa condutividade térmica, calor específico elevado, devem ser incombustíveis, ou seja, a propagação de chamas não deve ocorrer nos mesmos e sua durabilidade deve ser compatível com a vida útil do elemento estrutural, sem que haja necessidade de manutenção constante.

As tecnologias e inovações voltadas à proteção e ao aumento da resistência ao fogo das estruturas de concreto têm assumido papel fundamental na engenharia. Entre as soluções mais avançadas, destacam-se os concretos especiais, como o concreto de alta densidade, o concreto refratário e o concreto de alto desempenho. Além disso, tecnologias de revestimento, como argamassas intumescentes, mantas e materiais cerâmicos aplicados como barreiras térmicas, proporcionam proteção passiva adicional, reduzindo a transferência de calor para o interior da estrutura e ampliando o tempo de resistência ao fogo (SOUSA, 2025).

Alguns sistemas de monitoramento estrutural baseados em sensores inteligentes, como termopares e fibras ópticas, permitem a detecção em tempo real das mudanças térmicas e estruturais quando a estrutura está exposta a um incêndio, auxiliando no planejamento das ações de combate e evacuação (SOUSA, 2025).

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise térmica transiente de pilares de concreto armado expostos ao fogo por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa ANSYS Workbench versão estudante de 2025. A modelagem considera mecanismos de transferência de calor por condução no sólido e por convecção e radiação na superfície exposta, permitindo obter a distribuição de temperatura na seção ao longo do tempo e comparar resultados entre diferentes configurações analisadas.

Além disso, o trabalho avalia a influência de sistemas de proteção passiva aplicados externamente ao pilar, por meio da inserção de uma camada de 2 cm de espessura de revestimento. Foram analisados dois materiais — argamassa à base de Vermiculita e argamassa



Blaze Shield II — e os resultados foram comparados ao caso sem revestimento, com foco na evolução da temperatura em regiões internas representativas da seção transversal, a fim de verificar a eficiência térmica de cada solução.

2 Pilares de concreto armado exposto ao fogo

A análise térmica de estruturas de concreto armado submetidas à ação do fogo constitui campo de estudo fundamental para a garantia da segurança e durabilidade das edificações. Diversos pesquisadores têm contribuído significativamente para o desenvolvimento de metodologias e ferramentas destinadas à avaliação do comportamento do concreto armado em condições de incêndio.

A utilização de ferramentas computacionais baseadas no Método dos Elementos Finitos, como o *software* ANSYS Workbench, tem se mostrado eficaz na simulação do comportamento térmico de estruturas de concreto armado. Estudos recentes têm concentrado esforços na modelagem precisa das condições de incêndio e na validação dos resultados obtidos por meio de experimentos laboratoriais. Nesse contexto, Ferreira (2019) demonstrou a aplicabilidade do ANSYS Workbench na análise de tensões, deslocamentos e deformações em estruturas de concreto submetidas a variações térmicas severas, contribuindo para o avanço das técnicas de simulação numérica na área.

Alguns estudos sobre o assunto são apresentados a seguir.

2.1 Pilares sem revestimento

Lie e Irwin (1990) realizaram estudo experimental com quarenta modelos de pilares de concreto armado de seção retangular submetidos à ação do fogo. Os autores também desenvolveram modelo matemático para o cálculo da resistência ao fogo, com o objetivo de validar os resultados obtidos no programa experimental. A pesquisa constitui referência importante para a compreensão do comportamento termo estrutural de pilares em situação de incêndio.

Kodur e Raut (2009) apresentaram equação empírica para avaliação da resistência ao fogo de pilares de concreto armado, desenvolvida a partir de amplo conjunto de estudos experimentais compilados da literatura. A validade da equação proposta foi estabelecida por meio da



comparação entre as previsões da formulação empírica e os dados obtidos em experimentos de resistência ao fogo, bem como com resultados de estudos analíticos disponíveis.

Bamonte e Lo Monte (2015) investigaram o comportamento de pilares de concreto armado sob ação do incêndio considerando quatro diferentes modelos constitutivos propostos na literatura. No estudo, foram analisados aspectos críticos relacionados ao comportamento de elementos de concreto armado em condições térmicas severas, tais como efeitos de segunda ordem e deformações decorrentes da fluência. Os autores realizaram, ainda, comparação sistemática entre os resultados experimentais e numéricos obtidos para os pilares analisados.

2.2 Pilares com revestimento

Mróz *et al* (2016) descreveram soluções de materiais para proteção passiva contra incêndio, apresentando as técnicas de ensaio de proteção passiva em condições reais de incêndio. A temperatura dos pilares foram avaliados nas seções ao longo do tempo.

Almeida (2018) realizou uma análise térmica transiente de pilares de concreto armado expostos ao fogo por meio de simulação numérica, avaliando a evolução de temperatura na seção ao longo do tempo. No estudo, a autora comparou o pilar sem revestimento com pilares revestidos por uma camada de 2 cm de argamassa com Vermiculita e de Blaze Shield II, adotando propriedades termofísicas para cada material. Os resultados foram analisados por curvas temperatura-tempo em pontos internos da seção, permitindo verificar que os revestimentos auxiliam na proteção dos pilares.

Sousa (2025) apresenta de maneira geral um estudo bibliográfico dos principais problemas em estruturas de concreto em situação de incêndio. O autor apresentou pesquisas existentes sobre os impactos do fogo em estruturas de concreto e na conscientização sobre a relevância da análise pós-incêndio para garantir a segurança das edificações. A revisão bibliográfica também mostrou fatos históricos de incêndios em grandes edificações no Brasil, como o Gran Circo Norte-Americano (Niterói), o Edifício Andraus (São Paulo), o Edifício Joelma (São Paulo) e a Boate Kiss (Rio Grande do Sul).

Diante do exposto, verifica-se que a análise térmica de estruturas de concreto armado sob ação do fogo constitui campo em constante evolução, com contribuições relevantes oriundas tanto



de estudos experimentais quanto de investigações computacionais. A combinação entre métodos tradicionais de ensaio e tecnologias emergentes de simulação numérica promete avanços significativos na garantia da segurança e durabilidade das estruturas frente a situações de incêndio.

3 Exemplo numérico

Para melhor compreender o comportamento térmico de pilares de concreto armado sob ação do incêndio, foi realizada uma análise térmica transiente no programa ANSYS Workbench, utilizando a ferramenta *Transient Thermal*. As simulações foram conduzidas para tempos de 30, 90 e 180 min, adotando-se temperatura inicial de 20 °C e uma curva-padrão de incêndio aplicada nas quatro faces externas do pilar. Foram realizadas duas análises:

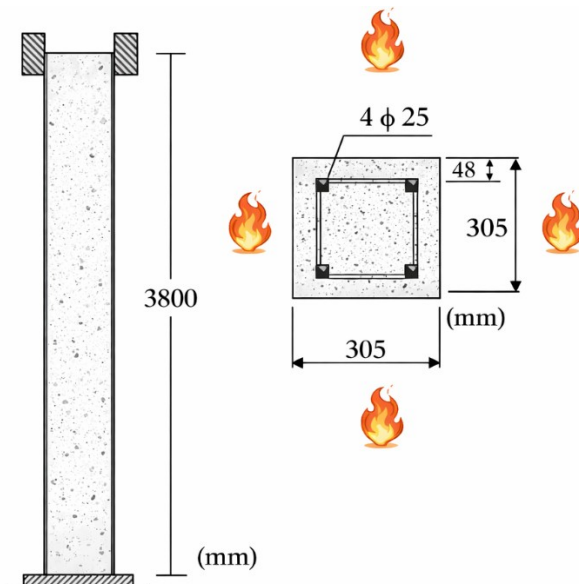
- Análise 1: validar o modelo numérico a partir de um pilar de referência da literatura, utilizando como base os resultados e informações de Lie e Irwin (1990).
- Análise 2: a partir das características obtidas na Análise 1, foi avaliada a influência de proteção passiva no aquecimento do pilar, por meio da aplicação de uma camada de 2 cm de revestimento, comparando-se o caso sem revestimento com os casos revestidos por argamassa com Vermiculita e por Blaze Shield 2. As informações principais dos materiais foram obtidas em Almeida (2018).

3.1 Descrição do modelo experimental

Lie e Irwin (1990) realizaram um estudo experimental com 40 modelos de pilares de concreto armado de seção retangular submetido a ação do fogo nas quatro faces do pilar, sendo todos engastados na parte inferior e livre na direção do eixo do pilar, conforme Figura 1. As faces foram submetidas ao incêndio ASTM E119 durante 180 min.

Os pilares possuem 3,8m de comprimento, seção quadrada de 0,305m, barras de aço longitudinais 4 ϕ 25mm e barras de aço transversal 13 ϕ 8mm e cobrimento de 0,048m. O pilar de concreto armado possui a resistência do concreto à compressão de 36,1 MPa e a tensão de escoamento do aço de 444MPa.

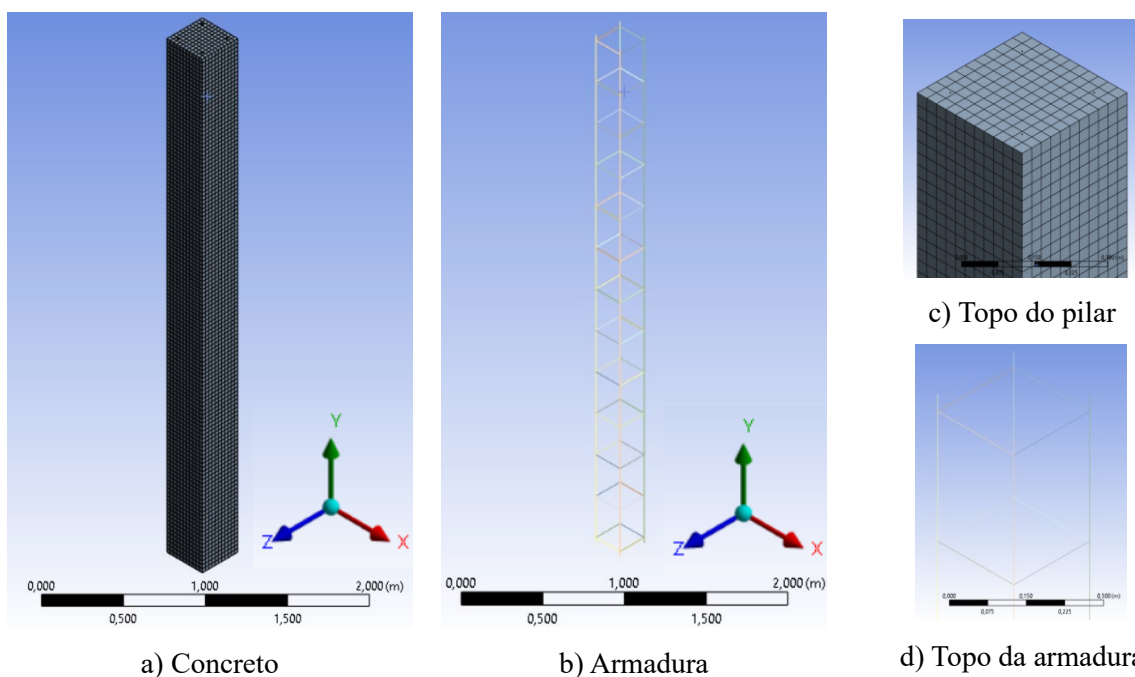
Figura 1 – Características do pilar ensaiado por Lie e Irwin (1990)



Fonte: Adaptado de LIE e IRWIN (1990).

Em ambas as análises, o elemento finito para a ação térmica foi o SOLID90 e o REINF264 para a armadura com o tamanho da malha de 0,03m. A discretização do pilar está apresentada na Figura 2.

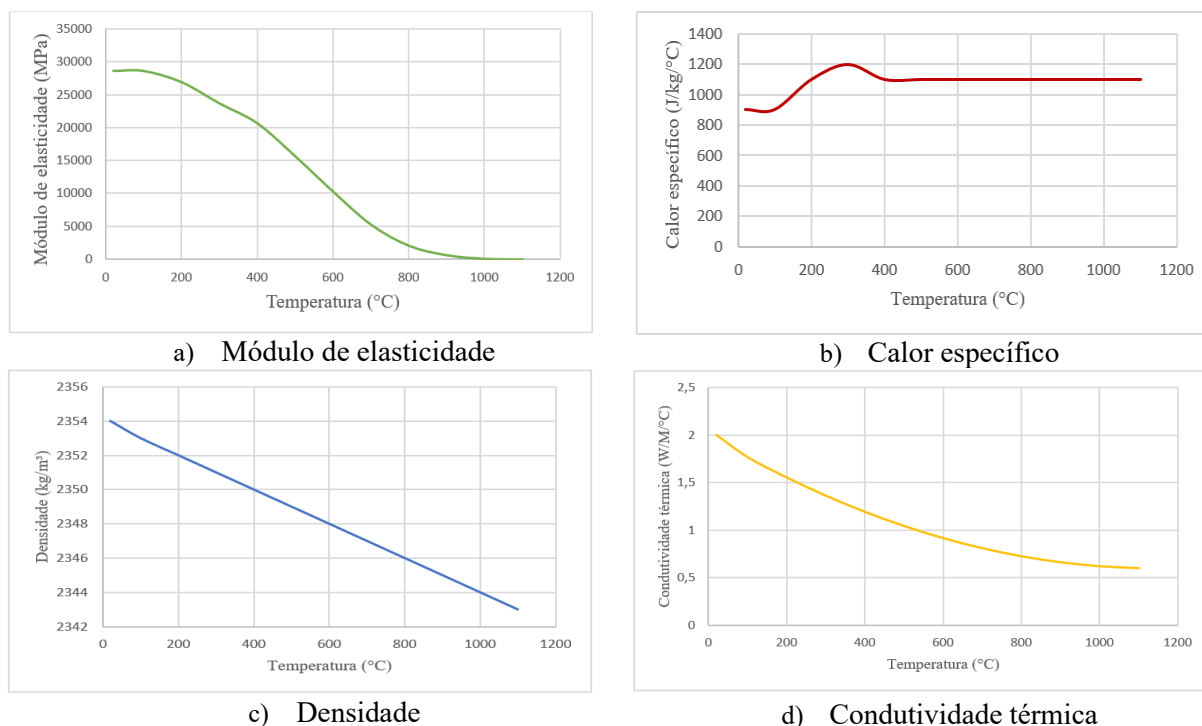
Figura 2 – Discretização do pilar no *Ansys Workbench*



Fonte: Autor

Já na Figura 3 são apresentados os gráficos usados para as propriedades do concreto em função da temperatura sendo constante o coeficiente de expansão térmica no valor de $1,40E^{-5} C^{-1}$. O aço foi modelado com módulo de elasticidade de 210GPa, densidade de 7850kg/m³, condutividade térmica de 60,5 W/m/°C e calor específico de 434 J/kg/°C.

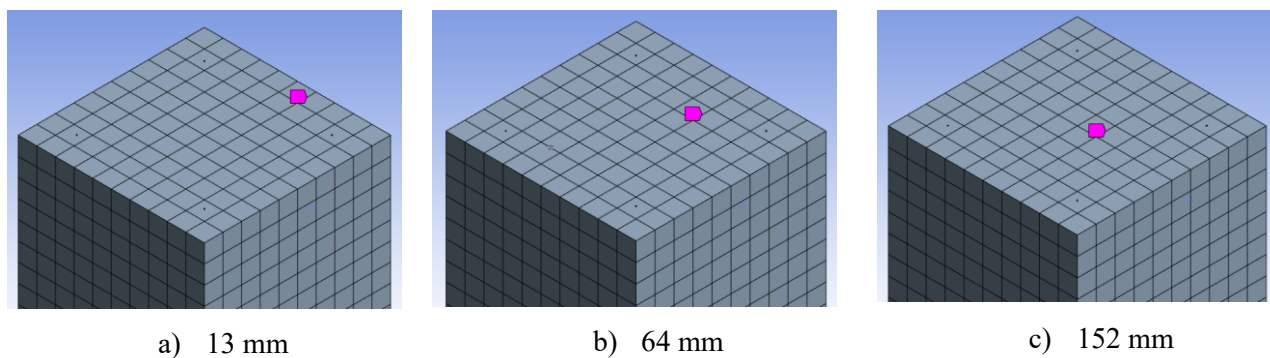
Figura 3 – Gráficos das propriedades do concreto



Fonte: Autor

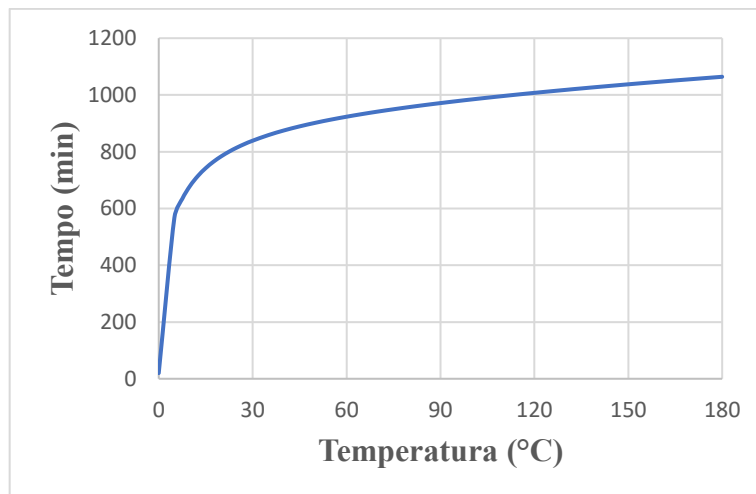
Os pontos para a análise da temperatura foram definidos em 13 mm, 64 mm e 152 mm na seção transversal da face superior do pilar, como mostrado na Figura 4. A Figura 5 apresenta a curva padrão de incêndio utilizada nas análises.

Figura 4 – Pontos analisados na face superior do pilar



Fonte: Autor

Figura 5 – Curva padrão ASTM E119



Fonte: Autor

Foram adotadas duas formas de transferência de calor que variaram com a temperatura em todas as faces do pilar na ferramenta *Transient Thermal* do ANSYS Workbench: convecção e radiação nas faces exposta ao fogo. A emissividade do concreto e dos revestimentos foram de 0,6 e 0,9 respectivamente.

3.2 Análise 1: validação do efeito térmico

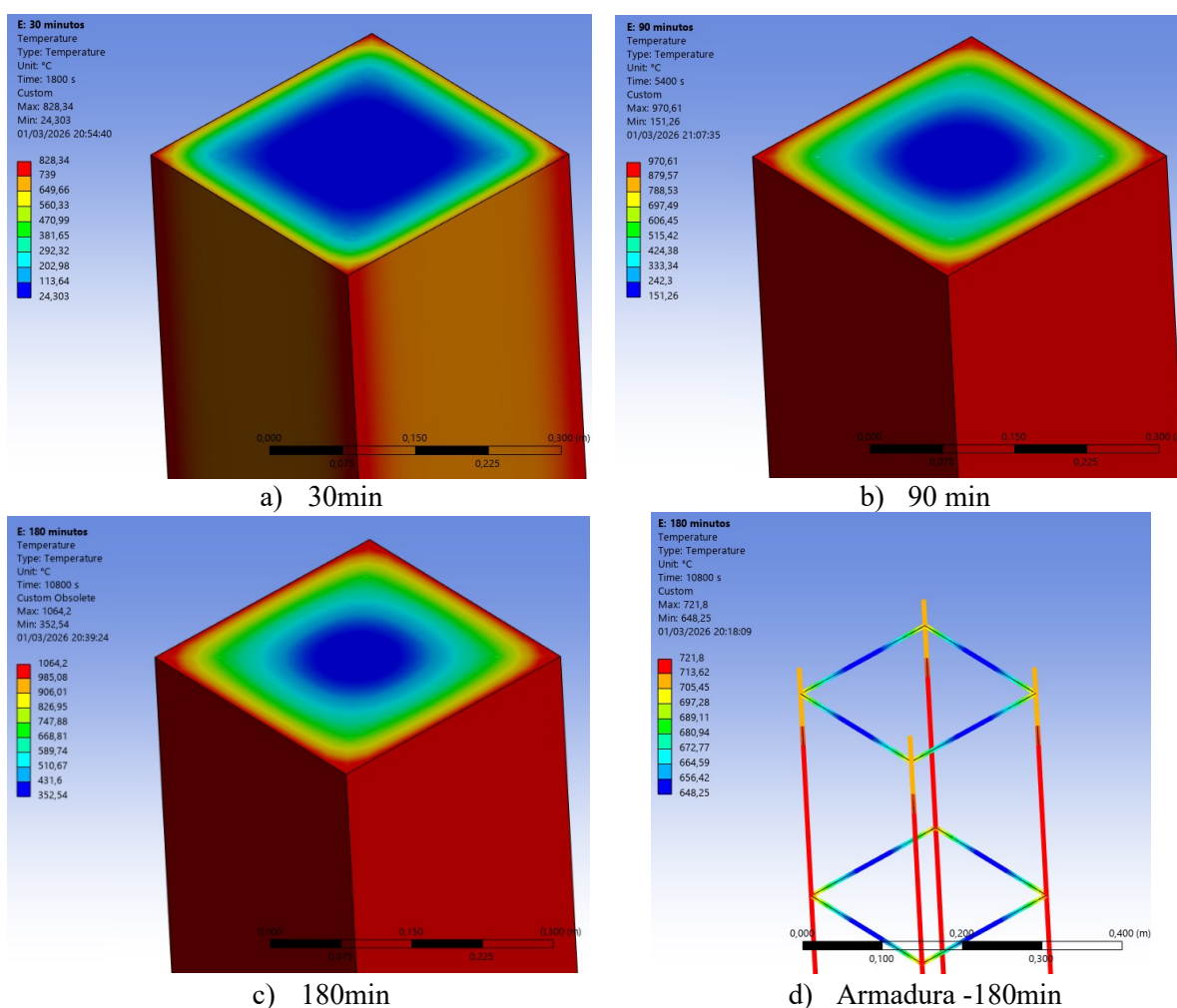
A Análise 1 se baseou nas informações obtidas experimentalmente por Lie e Irwin (1990). Na Figura 6 são apresentadas as temperaturas obtidas pela simulação numérica de 30, 90 e 180min para a seção transversal do pilar e o tempo de 180min para a armadura.

Nas Figuras 6 (a), (b) e (c) verifica-se que o aquecimento do pilar ocorre de forma gradual, com temperaturas mais elevadas nas regiões externas e temperaturas menores no centro ao longo de todo o período analisado. Em 30 min, observa-se que a superfície já apresenta valores elevados, enquanto a região central permanece próxima da temperatura inicial. Em 90 min, nota-se o avanço do aquecimento para o interior, com aumento perceptível da temperatura no centro do pilar. Em 180 min, o campo térmico indica que o calor penetra ainda mais na seção, mantendo-se o padrão de maior aquecimento nas bordas e menor aquecimento no centro.

Os valores indicados nas legendas reforçam esse comportamento. A temperatura máxima aumenta de 828,3 °C (30 min) para 970,6 °C (90 min), atingindo 1064,2 °C em 180 min. Considerando-se os extremos, a temperatura máxima em 180 min é aproximadamente 1,29 vez

a temperatura máxima em 30 min, ou seja, houve um acréscimo de cerca de 29%. Já a temperatura mínima — associada à região mais interna — evolui de 24,3 °C para 151,3 °C e, posteriormente, para 352,5 °C, evidenciando o aquecimento progressivo do núcleo com o avanço do incêndio.

Figura 6 – Resultados das temperaturas do pilar e armadura

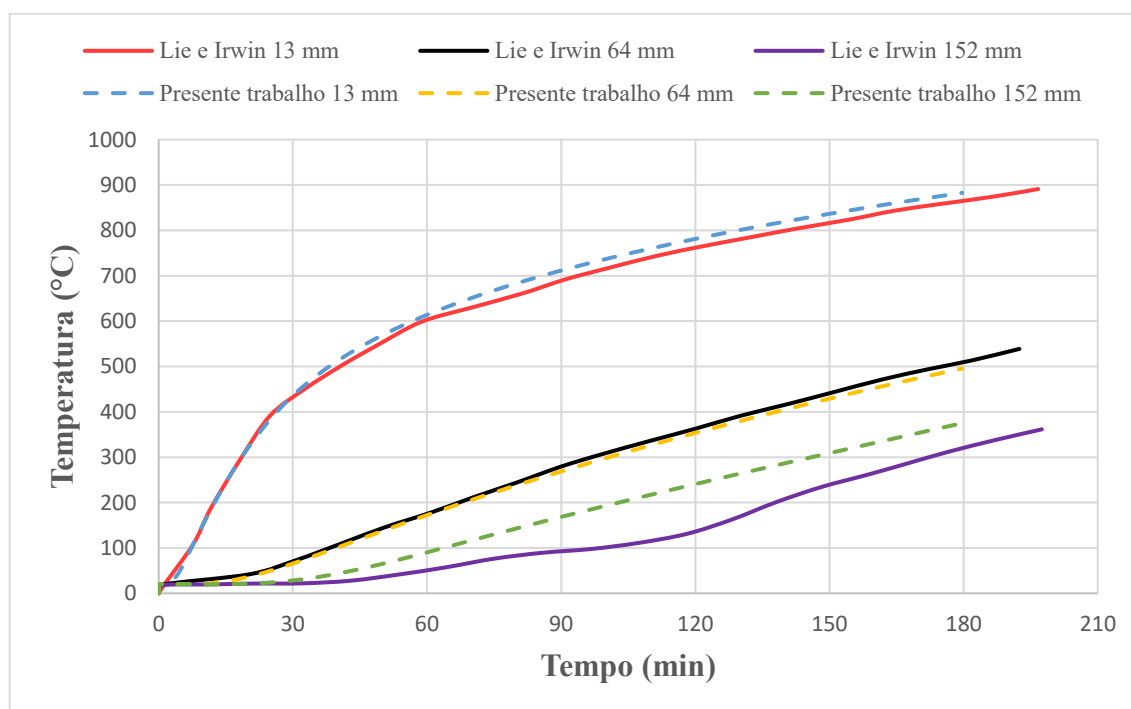


Fonte: Autor

Na Figura 6 (d) apresenta-se a temperatura das armaduras para 180 min, com valores entre 648,3 °C e 721,8 °C. Verifica-se tendência de temperaturas mais elevadas nas barras longitudinais em comparação aos estribos, o que é compatível com a posição das armaduras em relação às faces expostas ao fogo. Esses resultados evidenciam a influência do cobrimento, uma vez que a proximidade do aço em relação à superfície aquecida afeta diretamente a temperatura atingida pela armadura no tempo considerado.

Foram realizadas análises dos pontos indicados anteriormente e a validação do modelo descrito referente a literatura de Lie e Irwin (1990) e os resultados são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Análise térmica do pilar nos pontos adotados por Lie e Irwin (1990)



Fonte: Autor

A figura ilustra como a temperatura varia ao longo do tempo em três pontos na seção transversal do topo do pilar (13 mm, 64 mm e 152 mm), fazendo uma comparação entre os dados de Lie e Irwin (1990) e os resultados obtidos neste estudo por meio de simulação numérica. Para os pontos de 13 mm e 64 mm, observam-se que as curvas geradas pelo modelo numérico seguem a tendência e a magnitude dos valores de referência, o que indica uma boa correspondência com o comportamento térmico esperado, especialmente na fase inicial de aquecimento e na evolução com o tempo. Esse resultado sugere que as condições térmicas utilizadas na simulação e a forma como a condução de calor foi representada no elemento foram adequadas para replicar o aquecimento nas zonas mais próximas da superfície.

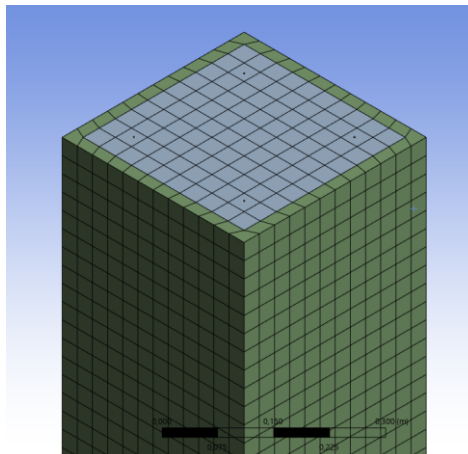
Em contrapartida, no ponto mais interno (152 mm), fica evidente uma maior diferença entre as curvas. Essa diferença é frequentemente observada em áreas mais profundas, pois pequenas variações nos parâmetros do modelo tendem a se acumular ao longo do tempo, impactando diretamente a taxa de transferência de calor até o núcleo. Entre as possíveis razões para essa

diferença estão as variações nas propriedades do concreto e do aço (como condutividade térmica e calor específico), diferenças na composição do concreto em comparação ao utilizado na referência, além das simplificações feitas no modelo durante a simulação (como parâmetros de convecção, radiação e emissividade, idealizações de contato térmico, malha e posicionamento exato do ponto de medição). Portanto, apesar da diferença observada em 152 mm, o conjunto dos dados indica que o modelo reproduz de maneira satisfatória o comportamento térmico nas profundidades mais próximas da face exposta.

3.3 Análise 2: proteção passiva do pilar

Na Análise 2, foi investigado o efeito da proteção passiva incorporado no pilar sob a ação do incêndio. Foram avaliados dois revestimentos, a Vermiculita e Blaze Shield 2, ambas com 2cm de espessura revestindo todo o pilar. Em virtude da limitação da quantidade de nós do programa, a nova discretização da espessura e do pilar está apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Proteção passiva no pilar



Fonte: Autor

Os valores obtidos em Almeida (2018) dos parâmetros de cada revestimento são apresentados nas Tabelas 1 a 3.

Tabela 1 – Características da argamassa de Vermiculita

Propriedade	Unidade	Valor
Massa específica	kg/m ³	350
Calor específico	J/kg°C	1200
Condutividade térmica	W/(m°C)	0,12

Fonte: Autor



Tabela 2 – Variação do calor específico do Blaze Shield 2 com a temperatura

Temperatura (°C)	Calor específico [J/(kg°C)]
96	2093
104	837
150	1675
200	1770
400	2148
482	2303
600	2343
800	2411
1093	2512
1200	2512

Fonte: Autor

Tabela 3 – Variação da condutividade térmica do Blaze Shield 2 com a temperatura

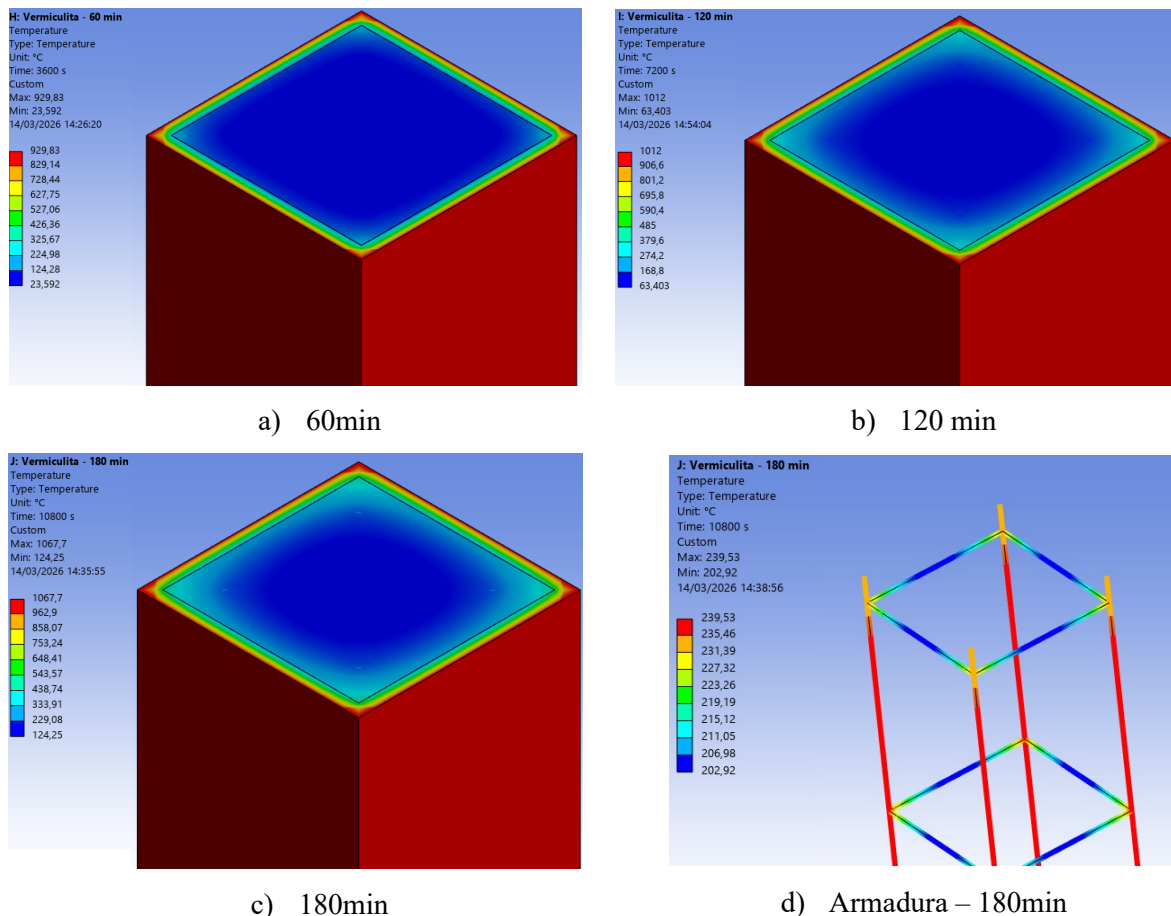
Temperatura (°C)	Condutividade térmica [W/(m°C)]
100	0,061
200	0,080
400	0,112
482	0,147
600	0,173
1093	0,208

Fonte: Autor

Deve-se ressaltar a dificuldade em obter algumas propriedades do Blaze Shield 2. As demais informações necessárias foram coletadas em fontes disponíveis na internet. Embora, o revestimento Blaze Shield 2 não seja especificamente aplicado em concreto, optou-se por analisá-lo neste estudo, uma vez que esse material foi utilizado por Almeida (2018) em pilares com características semelhantes.

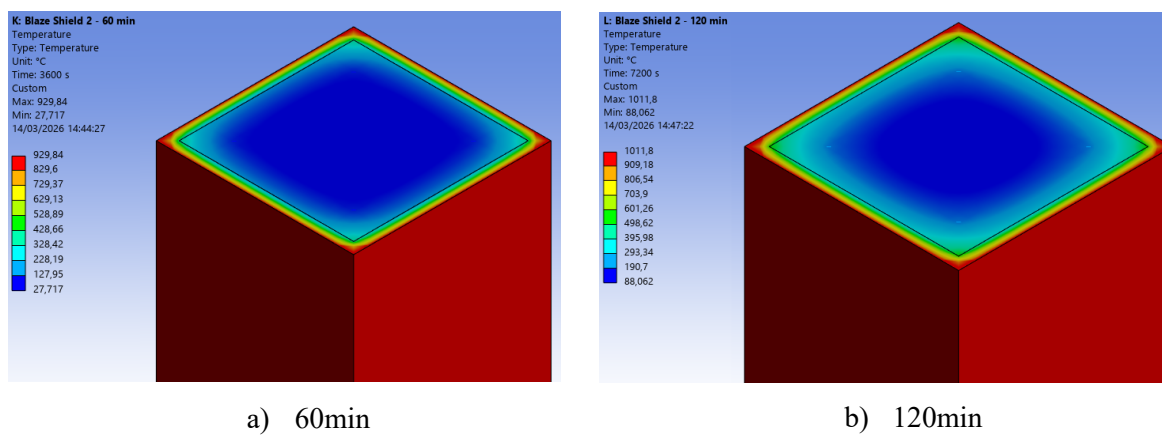
As Figuras 9 a 10 apresentam os resultados da temperatura para os pilares com os dois revestimentos.

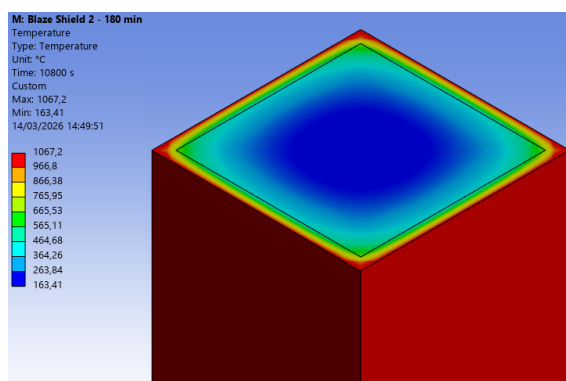
Figura 9 – Análise térmica do pilar com a Vermiculita



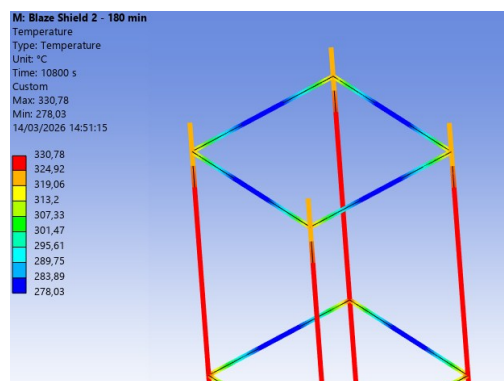
Fonte: Autor

Figura 10 – Análise térmica do pilar com o Blaze Shield 2





c) 180min

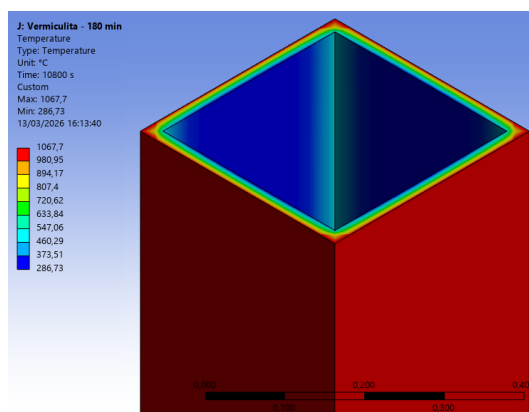


d) Armadura – 180min

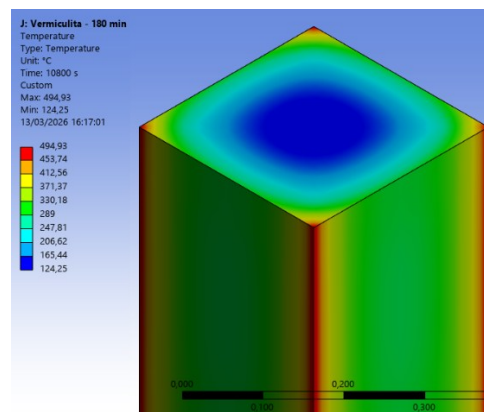
Fonte: Autor

A fim de melhor visualizar a temperatura nas faces dos revestimentos e nas faces do pilar são apresentadas as Figuras 11 a 12 considerando o tempo final de 180min, para ambos os revestimentos.

Figura 11 – Análise térmica da Vermiculita e do pilar



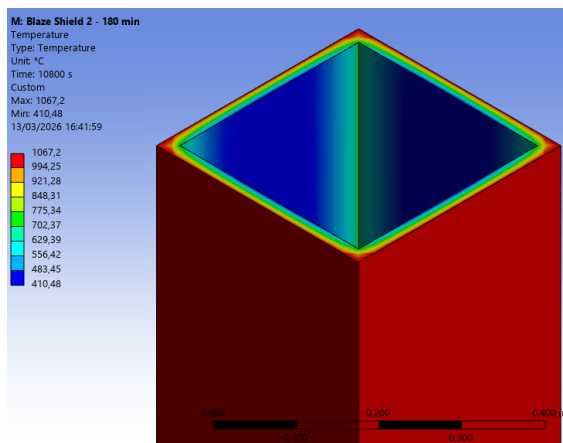
a) Camada de Vermiculita – 180min



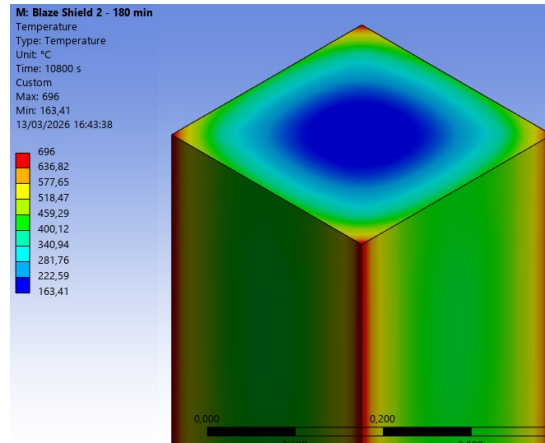
b) Pilar – 180min

Fonte: Autor

Figura 12 – Análise térmica do Blaze Shield 2 e do pilar



a) Camada de Blaze Shield II – 180min

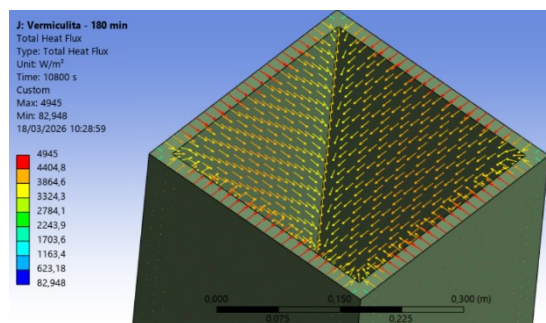


b) Pilar – 180min

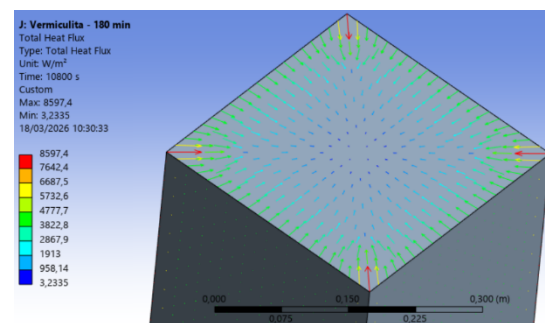
Fonte: Autor

Com o objetivo de analisar o comportamento do fluxo de calor nas faces dos revestimentos e dos pilares, a Figura 13 apresenta esse fluxo considerando o tempo de 180 minutos. Salienta-se que o fluxo de calor da superfície é dado pela relação entre a quantidade de calor que atravessa a superfície e o intervalo de tempo decorrido.

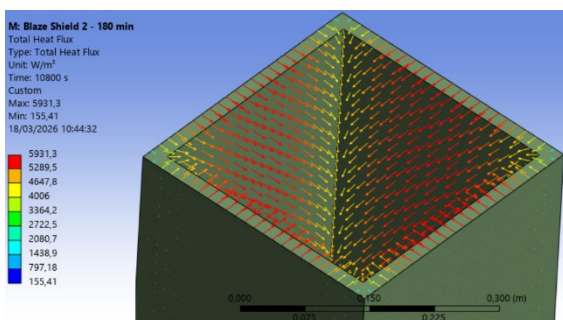
Figura 13 – Fluxo de calor em 180min



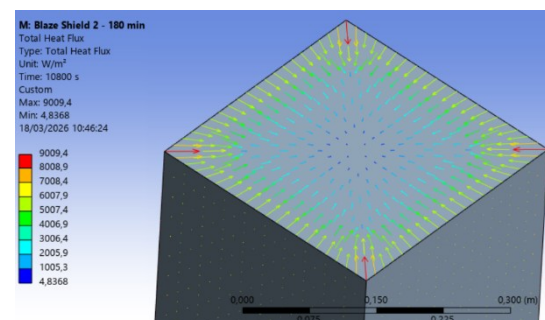
a) Argamassa Vermiculita



b) Topo do pilar - Vermiculita



c) Argamassa Blaze Shield 2



d) Topo do pilar – Blaze Shield 2

Fonte: Autor



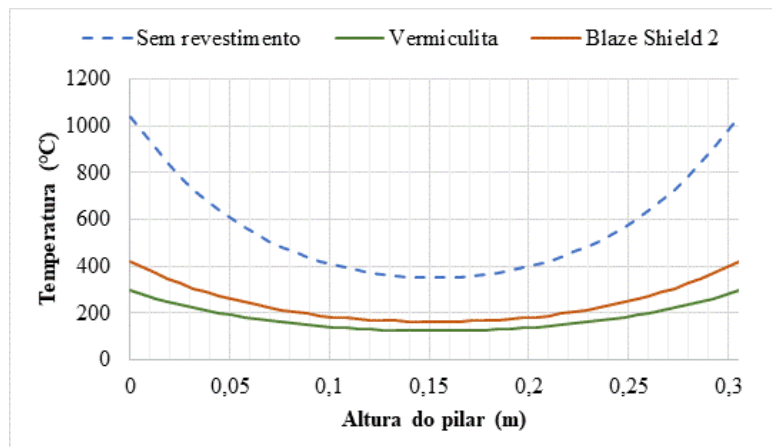
Verifica-se que à medida que a intensidade do incêndio aumenta, o fluxo de calor, aumenta nas faces dos revestimentos, transmitindo um valor menor para as faces do pilar. A radiação e a convecção nessas faces contribuem para que a transferência de calor seja direcionada para o centro do pilar.

Ao comparar os resultados obtidos para os pilares revestidos com argamassa de Vermiculita e de Blaze Shield 2, verifica-se que ambos os materiais atuam na redução da transferência de calor para o interior do pilar, mantendo temperaturas inferiores às observadas no caso sem revestimento. Em ambas as situações, as maiores temperaturas permanecem concentradas nas regiões externas, enquanto o núcleo apresenta valores menores, o que confirma a atuação do revestimento como barreira térmica. No entanto, a comparação entre os dois materiais mostra que a Vermiculita apresenta desempenho térmico mais eficiente, pois mantém temperaturas internas menores ao longo do tempo analisado. Em 180 minutos, por exemplo, a temperatura mínima no pilar com Vermiculita é de aproximadamente 124 °C, enquanto no pilar com Blaze Shield 2 esse valor é de cerca de 163 °C, indicando maior efeito do calor no segundo caso.

Essa diferença também pode ser observada nas armaduras. Para 180 minutos de exposição ao fogo, o pilar revestido com Vermiculita apresenta temperaturas nas armaduras variando entre aproximadamente 202 °C e 239 °C, enquanto no caso com Blaze Shield 2 os valores ficam entre 278 °C e 330 °C. Dessa forma, embora os dois revestimentos contribuam para retardar o aquecimento do elemento, a argamassa de Vermiculita se mostrou mais eficaz na proteção térmica do pilar, principalmente por manter temperaturas mais baixas tanto no concreto quanto no aço. Assim, a análise comparativa indica que, entre os materiais estudados, a Vermiculita apresentou o melhor desempenho térmico para a condição de incêndio considerada.

A Figura 14 apresenta o comportamento da temperatura ao longo da altura do pilar, na metade da distância, para o tempo de 180min.

Figura 14 – Análise térmica na largura da seção transversal



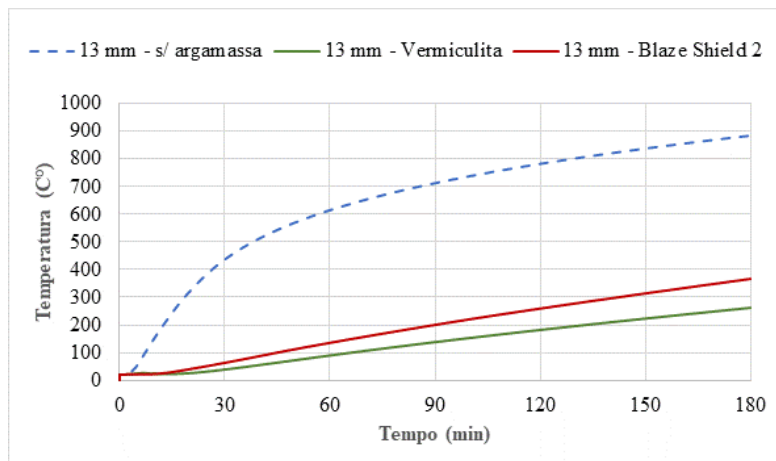
Fonte: Autor

Pela Figura 14 verifica-se que há uma grande diferença das temperaturas nas faces do pilar com o meio da seção considerando o pilar sem revestimento. No caso de pilares com a Vermiculita e Blaze Shield 2 essa diferença não ocorre, visto que esses revestimentos concentram as altas temperaturas do incêndio.

Com o objetivo de avaliar de forma mais detalhada a influência dos revestimentos térmicos analisados neste trabalho, os resultados foram reorganizados considerando separadamente os três pontos de análise previamente utilizados na validação do modelo numérico como apresentados nas Figuras 15 a 17. Dessa forma, é possível comparar diretamente o comportamento térmico do pilar sem revestimento, com argamassa de Vermiculita e com argamassa Blaze Shield 2, evidenciando a contribuição de cada material na redução da temperatura ao longo do tempo.

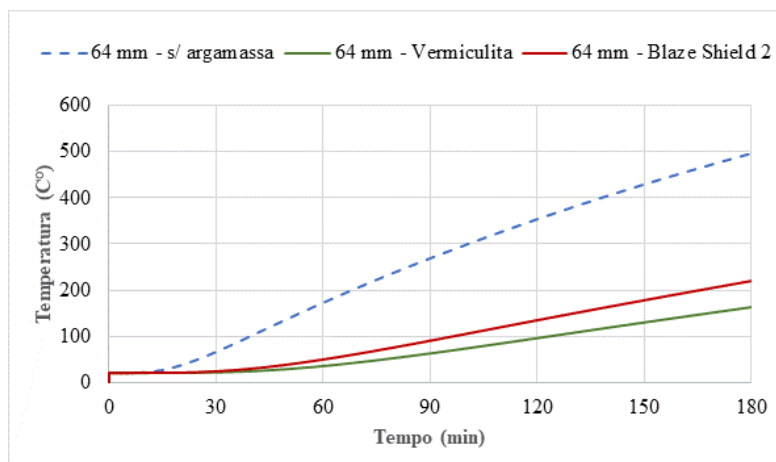
Os resultados mostram que, nos três pontos avaliados, a aplicação das argamassas promove redução significativa da temperatura quando comparada ao pilar sem revestimento. No ponto de 13 mm, mais próximo da face exposta ao fogo, a temperatura do pilar sem proteção atinge aproximadamente 880 °C ao final de 180 min. Com a aplicação de Vermiculita, esse valor cai para cerca de 260 °C, o que representa uma redução aproximada de 70%. Já com o Blaze Shield 2, a temperatura fica em torno de 360 °C, correspondendo a uma redução de aproximadamente 59%. Esse resultado mostra que, na região mais crítica, os dois revestimentos atuam de forma expressiva no retardamento do aquecimento, com melhor desempenho para a Vermiculita.

Figura 15 – Análise térmica do ponto de 13mm



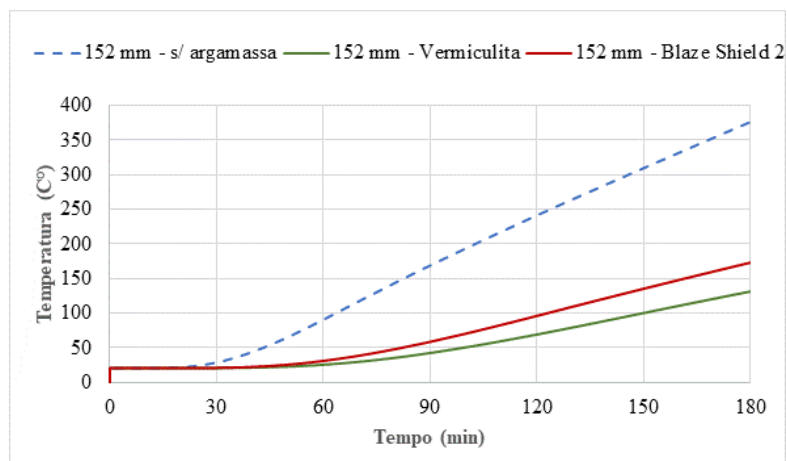
Fonte: Autor

Figura 16 – Análise térmica do ponto de 64mm



Fonte: Autor

Figura 17 – Análise térmica do ponto de 152mm

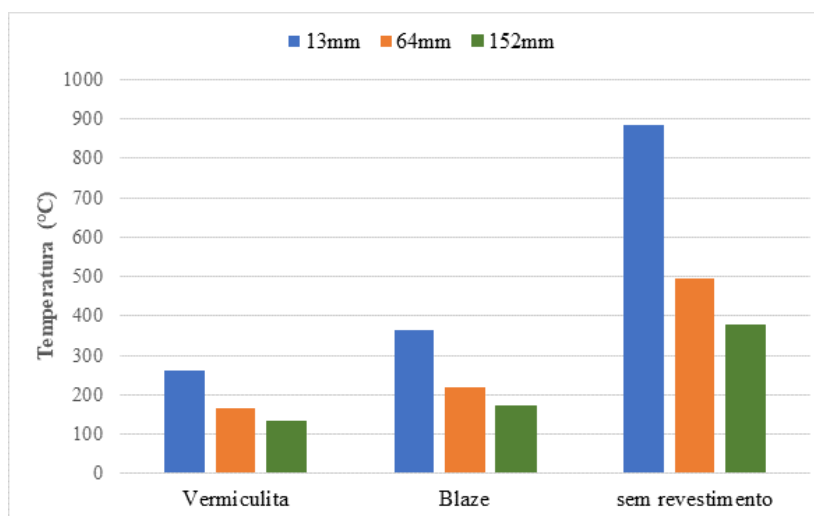


Fonte: Autor

Nos pontos mais internos, o mesmo comportamento é observado. Em 64 mm, a temperatura do pilar sem revestimento atinge cerca de 490 °C, enquanto os casos com Vermiculita e Blaze Shield 2 apresentam aproximadamente 160 °C e 220 °C, correspondendo a reduções de cerca de 67% e 55%, respectivamente. Para o ponto de 152 mm, o caso sem proteção chega a aproximadamente 370 °C, ao passo que a Vermiculita reduz esse valor para cerca de 130 °C (redução de aproximadamente 65%) e o Blaze Shield 2 para cerca de 170 °C (redução de aproximadamente 54%). A Figura 18 apresenta a temperatura final para o tempo de 180 min de todas as análises.

Verifica-se pela Figura 18, que de forma geral, ambos os revestimentos contribuem para retardar a propagação do calor no interior do pilar. A argamassa de Vermiculita apresenta em todos os pontos analisados, temperaturas menores ao longo de todo o período de exposição.

Figura 18 – Temperatura final nos pontos no pilar para 180min



Fonte: Autor

A redução da temperatura no interior do pilar com o uso desses revestimentos pode ser explicada pelas propriedades térmicas desses materiais, que apresentam baixa condutividade térmica e elevado calor específico.

Um ponto interessante a avaliar é que comparando as propriedades térmicas dos materiais analisados, verifica-se que a vermiculita apresenta a menor condutividade se comparado aos outros materiais (concreto e Blaze Shield 2). Conclui-se dessa forma, que esse parâmetro afeta



substancialmente a transferência de calor aos outros materiais e justifica sua performance diante de Blaze Shield II.

4 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento térmico de um pilar de concreto armado submetido à ação do fogo por meio de simulação numérica utilizando o *software* ANSYS Workbench. Inicialmente foi realizada a validação do modelo a partir de resultados experimentais da literatura, permitindo verificar a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento térmico do elemento estrutural. Em seguida, foi avaliada a influência da aplicação de sistemas de proteção passiva, considerando uma camada de 2 cm de revestimento composta por argamassa de Vermiculita e por Blaze Shield 2. A comparação entre os diferentes cenários permitiu avaliar a eficiência térmica dos revestimentos na redução da temperatura no interior do pilar ao longo do tempo de exposição ao incêndio. A partir dos resultados obtidos, podem ser destacadas as seguintes conclusões:

- O modelo numérico desenvolvido apresentou boa concordância com os resultados experimentais de referência, especialmente nos pontos mais próximos da face exposta ao fogo (13 mm e 64 mm), indicando que o modelo representa o mesmo comportamento obtido por Lie e Irwin (1990).
- A análise térmica mostrou que o aquecimento do pilar ocorre de forma gradual, com temperaturas mais elevadas nas regiões externas e menores no núcleo da seção. Para o pilar sem revestimento, a temperatura máxima atingiu aproximadamente 1064 °C após 180 minutos, evidenciando a intensa exposição térmica nas regiões superficiais.
- A aplicação de revestimentos térmicos mostrou-se eficaz na redução da transferência de calor para o interior do pilar. No ponto de 13 mm, a temperatura do pilar sem proteção atingiu uma redução aproximada de 70% se comparada a Vermiculita. Para o Blaze Shield 2, a redução foi cerca de 59%.
- No ponto de 64 mm, a temperatura do pilar sem revestimento reduziu em torno de 67% com a Vermiculita e 55% com o Blaze Shield 2.
- No ponto mais interno da seção (152 mm), a diferença entre os casos analisados também foi expressiva. O pilar sem proteção atingiu uma redução de aproximadamente 65%



para a Vermiculita, e no caso do Blaze Shield 2 essa redução chegou a 54%, evidenciando a diminuição da propagação do calor para o núcleo do elemento estrutural.

- A análise das temperaturas nas armaduras também demonstrou a eficiência da proteção passiva. Para 180 minutos de exposição, o pilar revestido com Vermiculita apresentou temperaturas nas armaduras entre aproximadamente 202 °C e 239 °C, enquanto no caso com Blaze Shield 2 os valores variaram entre 278 °C e 330 °C, indicando maior proteção térmica proporcionada pela Vermiculita.
- De forma geral, os resultados indicam que ambos os revestimentos contribuem significativamente para retardar o aquecimento do pilar, aumentando a proteção térmica do concreto e das armaduras. Entretanto, entre os materiais analisados, a argamassa de Vermiculita apresentou o melhor desempenho térmico, mantendo temperaturas menores nos pontos avaliados ao longo do tempo de exposição ao incêndio.

Referências

ALMEIDA, Thamyras Morgana Pontes de. *Análise térmica transiente de pilares de concreto armado expostos ao fogo*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

ANSYS®. *User's Manual*. Versão 2024 Student.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14.432: Exigências de resistência ao fogo*. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado*. Rio de Janeiro, 2026.

BAMONTE, P.; LO MONTE, F. Reinforced concrete columns exposed to standard fire: comparison among different constitutive models for concrete at high temperature. *Fire Safety Journal*, v. 71, p. 310-323, 2015.

FERREIRA, M. W. *Estudo numérico dos efeitos estruturais da exposição de pilares em concreto armado a altas temperaturas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.



ISOLATEK INTERNATIONAL. *CAFCO Blaze-Shield II: fire protection solutions*. [S.l.]: Isolatek International, jun. 2001. Catálogo técnico.

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, p. 28-33, jun. 2015.

KODUR, V. K. R.; RAUT, N. K. Design equation for predicting fire resistance of reinforced concrete columns. *Structural Concrete*, v. 10, n. 2, p. 73-86, 2009.

LIE, T. T.; IRWIN, R. J. Evaluation of the fire resistance of reinforced concrete columns with rectangular cross-sections. *NRC Publications Archive*. Canadá, out. 1990.

MENDES, C. L. *Estudo Teórico sobre Perfis formados a frio em Situação de Incêndio*. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

MRÓZ, K.; HARGER, I.; KORNIEJENKO, K. Material solutions for passive fire protection of buildings and structures and their performances testing. *Procedia Engineering* v. 151, p. 284-291, 2016.

OLIVEIRA, E. B. S.; MIRANDA, L. R. Cuidados com estruturas de concreto em situação de incêndio. *Revista Científica Multidisciplinar de Acesso aberto, RECIMA* 21, 2021.

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

REGOBELLO, R. *Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e concreto em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SILVA, J. P. *Análise de comportamento termomecânico do concreto revestido com vermiculita e submetido a elevadas temperaturas por meio de simulações numéricas*. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal Rural do Semiárido, Angicos, 2021.



SOUSA, E. M. *Estrutura de concreto em situação de incêndio*. Trabalho final de curso, Instituto Federal da Paraíba, 2025.

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.

WANG, Y. C. *Steel and Composite Structures: Behavior and Design for Fire Safety*. London: Spon Press, 2002.

ZORBITTA, G. T. *Desenvolvimento de código computacional para obtenção da resistência de vigas e pilares de aço em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019.