SEMANA ACADÊMICA
REVISTA CIENTÍFICA
ISSN 2236-6717

Revestimento Termoacústico a Base de Perlita Expandida em Elementos de Concreto Face a Situações de Incêndio:

Uma Análise Numérica Comparativa e Interpretativa

Letícia Borges[1]
https://orcid.org/0009-0009-8842-2219
José Eduardo Quaresma[2]
https://orcid.org/0000-0002-8541-2105

RESUMO

Introdução: A exposição prolongada de elementos de concreto a altas temperaturas promove alterações físico-químicas capazes de comprometer sua integridade estrutural, especialmente na ausência de sistemas de proteção passiva. Entre os materiais isolantes disponíveis, a perlita expandida e o aerogel de sílica destacam-se pelo baixo coeficiente de condutividade térmica, embora com níveis distintos de eficiência e disponibilidade comercial. **Objetivo:** Avaliar comparativamente o desempenho térmico de placas de concreto submetidas a aquecimento extremo, sem revestimento e com revestimentos de perlita expandida e aerogel de sílica, em diferentes espessuras, quantificando sua capacidade de retardar a propagação do calor. **Metodologia:** Foram modeladas placas de concreto de 300 × 200 × 150 mm em programa computacional SOLIDWORKS *Simulation* 2024, submetidas a análise térmica transiente durante 3.600 s. Aplicou-se temperatura fixa de 700 °C na face exposta, mantendo as demais superfícies adiabáticas. Os revestimentos avaliados consistiram em camadas de 10 mm e 20 mm aplicadas à superfície exposta. As temperaturas foram monitoradas em quatro pontos estratégicos: face exposta, centro da espessura, face não exposta e interface revestimento–concreto. As propriedades térmicas foram definidas com base em normas e literatura especializada. **Resultados:** O concreto sem revestimento apresentou elevação térmica significativa, atingindo 254 °C no centro da placa e 97,3 °C na face não exposta ao final da simulação. Os revestimentos de perlita expandida reduziram substancialmente a propagação térmica, mantendo o centro da placa entre 53,6 °C (10 mm) e 39,6 °C (20 mm). O aerogel de sílica apresentou desempenho superior, com temperaturas de 33,7 °C (10 mm) e 28,9 °C (20 mm) no centro da espessura, além de níveis mínimos na face não exposta. Em todas as configurações, o aquecimento permaneceu majoritariamente confinado ao revestimento. **Conclusão**: Os resultados confirmam a elevada eficiência térmica do aerogel de sílica, seguido pela perlita expandida, na mitigação da propagação de calor em elementos de concreto. A espessura do revestimento demonstrou influência direta na redução dos gradientes térmicos. Embora promissor, o aerogel apresenta limitações práticas relacionadas ao custo e disponibilidade comercial, ao passo que a perlita configura alternativa economicamente viável e tecnicamente eficaz. Recomenda-se a continuidade da investigação incorporando análises termomecânicas, fissuração, *spalling* e ciclos térmicos, não contemplados nesta etapa devido às restrições do software.

Palavras-chave

Concreto; incêndio; perlita expandida; simulação numérica; termoacústico.

Submetido em: 01/12/2025 – **Aprovado em**: 11/12/2025 – **Publicado em**: 12/12/2025

1 Graduanda do Curso de Engenharia Civil da Universidade de Araraquara- UNIARA, São Paulo. E-mail: lborges123456789@uniara.edu.br.
2 Orientador. Docente Curso de Engenharia Civil da Universidade de Araraquara- UNIARA. São Paulo. E-mail: jequaresma@uniara.edu.br.

http://dx.doi.org/10.35265/2236-6717-265-13239
FORTALEZA-CE. EDIÇÃO 265. V.13. ANO 2025.

Thermoacoustic Coating Based on Expanded Perlite for Reinforced Concrete Elements under Fire Conditions:

A Numerical Comparative and Interpretative Analysis

ABSTRACT

Introduction: Prolonged exposure of concrete elements to high temperatures leads to physicochemical degradation that may compromise structural integrity, particularly in the absence of passive fire protection systems. Among commercially available insulating materials, expanded perlite and silica aerogel stand out due to their low thermal conductivity, although they differ substantially in performance, cost, and availability. **Objective:** To comparatively evaluate the thermal performance of concrete slabs subjected to severe heating, both unprotected and protected with expanded perlite or silica aerogel coatings of different thicknesses, quantifying their effectiveness in delaying heat propagation. **Methodology:** Concrete slabs measuring 300 x 200 x 150 mm were developed through numerical modeling using the computational program SOLIDWORKS Simulation 2024. and subjected to a transient thermal analysis lasting 3,600 s. A constant temperature of 700 °C was applied to the exposed surface, while the other faces were considered adiabatic. Insulating layers of 10 mm and 20 mm were applied to the heated face. Temperature evolution was recorded at four key points: exposed surface, mid-thickness, unexposed surface, and coating–concrete interface. Thermal properties were defined based on technical standards and specialized literature. **Results:** The unprotected slab exhibited significant thermal penetration, reaching 254 °C at mid-thickness and 97.3 °C at the unexposed face after 3,600 s. Expanded perlite coatings substantially reduced heat transfer, maintaining mid-thickness temperatures between 53.6 °C (10 mm) and 39.6 °C (20 mm). Silica aerogel demonstrated even greater efficiency, with temperatures of 33.7 °C (10 mm) and 28.9 °C (20 mm) at mid-thickness and minimal heating at the unexposed face. In all protected models, heat remained predominantly confined to the insulating layer. **Conclusion:** Silica aerogel showed the highest thermal efficiency, followed by expanded perlite, both proving capable of delaying heat propagation in concrete elements. Thermal attenuation increased with coating thickness. Despite its superior performance, silica aerogel faces practical limitations due to cost and market availability, whereas expanded perlite offers a technically effective and economically viable alternative. Future research should incorporate thermo-mechanical coupling, cracking, spalling phenomena, and thermal cycling, which could not be addressed in this study due to software constraints.

Keywords

Concrete; fire; expanded perlite; numerical simulation; thermoacoustic.

1 INTRODUÇÃO

A segurança contra incêndio e pânico em edificações é um tema de crescente relevância, sobretudo porque, até o início da década de 1970, não recebia ênfase adequada, em virtude da pouquidade de relevantes incêndios até este período. No Brasil, eventos como os incêndios no Edifício Joelma, em 1974, e na Boate Kiss, em 2013, marcaram um ponto de inflexão na formulação de diretrizes voltadas à preservação da vida humana, do patrimônio e do meio ambiente. Nesse contexto, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a NBR 15200:2024, sobre Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, estabelecendo padrões específicos para o dimensionamento e a verificação de estruturas de concreto em situação de incêndio.

As estruturas de concreto são reconhecidas por sua alta resistência ao fogo devido às suas propriedades térmicas intrínsecas, como a incombustibilidade e a baixa condutividade térmica. Todavia, quando submetidas a elevadas temperaturas, sofrem perda progressiva de resistência mecânica e redução do módulo de elasticidade dos materiais constituintes, o que propicia processos de degradação polifásica que podem culminar no colapso estrutural (COSTA, 2002).

Sob tal perspectiva, a utilização de materiais cimentícios suplementares (*Supplementary Cementitious Materials*, SCM) apresenta-se como alternativa promissora para aprimorar o desempenho das estruturas de concreto em incêndios (KURDOWSKI, 2014). À vista disso, a perlita expandida destaca-se por suas propriedades físicas, por sua baixa densidade aparente, elevada estabilidade térmica, resistência ao fogo e contribuição para o isolamento acústico, configurando-se como um material de grande potencial para aplicação em soluções de proteção passiva, especialmente em revestimentos de estruturas de concreto (KOTWICA et al., 2017).

Por sua vez, os aerogéis de sílica, materiais nanoestruturados, são reconhecidos como um dos mais eficientes isolantes térmicos disponíveis, devido à sua elevada porosidade, baixa condutividade térmica e baixo índice de refração (FRICKE, 1988; FRICKE; EMMERLING, 1992; KIM; HYUN, 2001; CARRAHER, 2005; SCHULTZ et al., 2005a). No entanto, o alto custo e a limitada disponibilidade restringem sua aplicação em larga escala na construção civil (KALIKOSKI, 2020). Assim, a comparação entre a perlita expandida e o aerogel de sílica revela-se pertinente para a identificação de alternativas economicamente viáveis, tecnicamente eficazes e ambientalmente sustentáveis.

Apesar da relevância do tema, a literatura ainda carece de investigações que explorem, de maneira aprofundada, o comportamento térmico da perlita expandida em situações de incêndio por meio de ferramentas computacionais (KOTWICA et al., 2017). A simulação numérica constitui um recurso metodológico de grande importância, pois permite analisar o campo de temperaturas, a propagação do calor e os efeitos de diferentes espessuras e materiais de revestimento sob condições críticas.

Programas Computacionais de Análises por Elementos Finitos (FEA), permitem a aplicação de curvas de incêndio padronizadas, como a ISO 834:2014 - Ensaios de Resistência ao Fogo, viabilizando a previsão do desempenho de elementos estruturais sem a necessidade inicial de ensaios laboratoriais complexos e onerosos.

O trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de pesquisas bibliográficas e de simulação numérica, em programa computacional, o desempenho térmico da perlita expandida utilizada como revestimento em elementos de concreto submetidas a incêndio, estabelecendo o aerogel de sílica como parâmetro de comparação. Busca-se, assim, contribuir para o avanço do conhecimento técnico acerca da aplicação da perlita expandida, identificando suas potencialidades e limitações frente a um material de referência de alto desempenho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos do Fogo

Previamente à abordagem dos conceitos do fogo, faz-se necessário compreender algumas definições fundamentais conforme apresentadas na Instrução Técnica de incêndio do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (2025):

a) Fogo: Reação química de oxidação caracterizada pela emissão de calor e luz;
b) Incêndio: Fogo em descontrole e com intensidade elevada, capaz de causar danos e prejuízos à vida, ao meio ambiente e ao patrimônio;
c) Carga de Incêndio: Entende-se pela soma das energias calorificas possíveis a serem liberadas pela combustão, envolvendo todos os materiais combustíveis de um ambiente;
d) Combustível: Refere-se à substância capaz de queimar e alimentar a combustão (sólidos, líquidos ou gasosos ou metais);
e) Comburente: Compete a substância que proporciona a reação química, intensificando a combustão (geralmente, oxigênio);
f) Calor: Forma de energia que permite elevar a temperatura. É gerada da transformação de outra energia, por intermédio de processo físico ou químico;
g) Reação em Cadeia: Processo de liberação de energia que gera uma nova reação, promovendo nova liberação de energia, mantendo um ciclo fechado de combustão.

A norma ABNT NBR 13860:1997 estabelece que o fogo é um processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz. Isto é, em conformidade com Bretano (2007), uma rápida oxidação entre o material combustível, sólido, líquido ou gasoso, e o oxigênio do ar, provocada por uma fonte de calor, resultando em luz e calor.

Seito (2008) aponta algumas definições sobre incêndio: “O incêndio é o fogo fora de controle (NBR 13860, ABNT, 1997)” e “incêndio é a combustão rápida, disseminando-se de forma descontrolada no tempo e no espaço (ISO 8421-1, CBPMESP, 2010)”.

Portanto, o incêndio é um descontrole do fogo, que se desenvolve excepcionalmente ao controle humano, causando danos não previstos.

Para Bretano (2007), a propagação do fogo ocorre com a ocorrência simultânea de três elementos essenciais, material combustível, comburente e fonte de calor, em um modelo conhecido como triângulo do fogo, no qual esses três elementos são representados nos lados de um triângulo. No entanto, a IT 02 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (2025) compreende que, para que o fogo exista, são necessários quatro elementos: material combustível, agente oxidante, denominado comburente (geralmente oxigênio), calor e reação em cadeia, designado tetraedro do fogo.

A incidência de calor sobre o material provoca sua decomposição, denominada pirolise, que gera gases combustíveis. Em sequência, os gases gerados reagem com o oxigênio, produzindo calor, gases e partículas solidas que comporão a fumaça. Este calor produzido na reação de combustão retorna a incidir sobre os materiais combustíveis, reativando a reação química; por isso, dá-se o nome de reação em cadeia. (GOUVEIA, 2006).

A ausência de um dos elementos essenciais nos modelos do triângulo do fogo e do tetraedro do fogo impede o início da ignição. Por conseguinte, é possível identificar múltiplas maneiras de reduzir o risco de incêndio com a diminuição da quantidade de material combustível no ambiente, a redução do teor de oxigênio no local, a minimização da exposição do material combustível ao calor e a redução da probabilidade de propagação das reações em cadeia.

2.2. Etapas de Desenvolvimento de um Incêndio

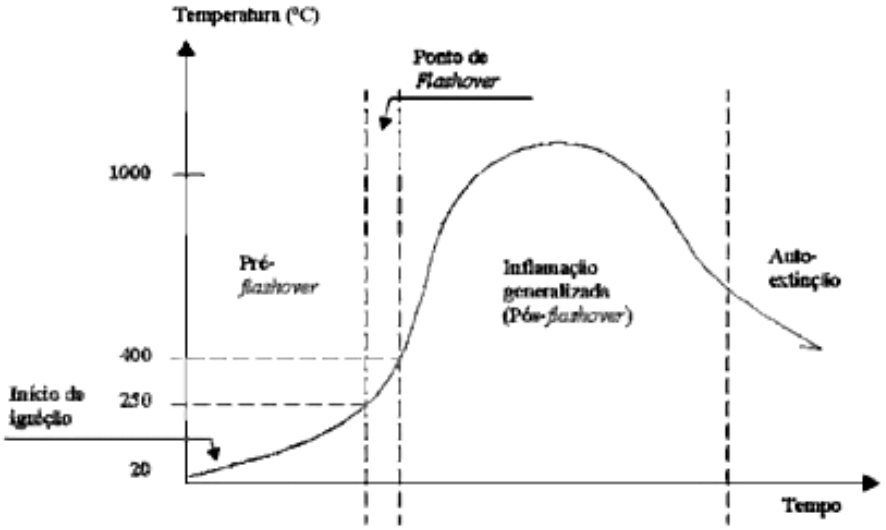
Conforme Seito et al. (2008), a evolução de um incêndio em uma edificação ocorre em três etapas distintas. Inicialmente, o fogo começa a se desenvolver gradualmente, levando de cinco a vinte minutos para atingir a ignição. Em seguida, na fase de inflamação generalizada, as temperaturas aumentam a níveis extremamente altos e, se não houver intervenção, o incêndio continuará a se expandir até consumir todo o combustível disponível. Por último, durante a fase de resfriamento, a temperatura ambiente diminui gradualmente ao longo do tempo.

Neste sentido, o desenvolvimento de um incêndio pode ser analisado por meio de uma curva tempo-temperatura (Figura 1). Tal curva representa um modelo que descreve um incêndio em um compartimento, considerando uma distribuição uniforme de temperaturas desde o momento da ignição até a sua extinção.

Isto posto, na fase inicial de ignição, o fogo se propaga a alguns materiais no compartimento, produzindo uma grande quantidade de fumaça que prejudica a visibilidade (GOUVEIA, 2006). Isso acontece devido à decomposição dos combustíveis sólidos, em um processo chamado pirólise, no qual os gases combustíveis desprendem-se dos materiais por intermédio do aquecimento do ambiente.

Nesse estágio, não havendo interferência, os gases combustíveis inflamam-se e propagam o incêndio, contribuindo para que as condições para a preservação da vida humana sejam bastante precárias.

Figura 1. Curva de desenvolvimento de um incêndio compartimentado.



Fonte: *Moreira, 2002.*

Quando o incêndio alcança o ponto de *flashover*, caracterizado por temperaturas entre 250 e 400 °C no compartimento, inicia-se a fase de inflamação intensa (GOUVEIA, 2006), em virtude de a ignição ocorrer a partir dos gases combustíveis resultantes da queima e do aumento gradual da temperatura, o que leva à ignição simultânea, assemelhando-se a uma explosão. Nessa etapa, as temperaturas são elevadas, há grande produção de fumaça e, se a resistência ao fogo do compartimento não for adequada, o fogo propaga-se rapidamente. O *flashover* ocorre entre o final da fase do crescimento e o início da fase de desenvolvimento total de um incêndio (CMBSC, 2018).

Finalmente, quando aproximadamente 60 a 80% do material combustível no compartimento é consumido, o incêndio entra na fase de extinção (GOUVEIA, 2006). Nessa fase, o ambiente começa a se resfriar gradualmente, podendo ocorrer colapso de elementos estruturais e de vedação. Caso o material combustível não tenha sido completamente consumido pelo fogo, existe a possibilidade de reinício do incêndio nesse estágio.

2.3. Sistemas e Medidas de Proteção Contra Incêndio e Pânico em Edificações

Os sistemas e medidas de proteção e combate a incêndio são imprescindíveis em uma edificação, uma vez que visam proteger uma coletividade, a vida humana, o patrimônio e o meio ambiente (IT 02 - CBPMESP, 2025). Por esta razão, prevenir um incêndio refere-se ao somatório do correto dimensionamento e instalação dos sistemas e das medidas de segurança contra incêndio, bem como à educação pública acerca das ações para impedir um incêndio.

Sob essa ótica, um sistema de segurança contra incêndio abrange a combinação de proteção ativa e passiva. A proteção ativa é conceituada, conforme a NBR 14432 (2001), como o tipo de proteção contra incêndio que é ativada manual ou automaticamente em resposta a um princípio de incêndio, como chuveiros automáticos, extintores de incêndio, hidrantes etc. Enquanto a proteção passiva é determinada como o conjunto de medidas correspondente ao sistema construtivo da edificação, não exigindo nenhum tipo de acionamento em situações de incêndio, como compartimentação horizontal e vertical, rotas de fuga e resistência ao fogo, materiais de acabamento e revestimentos apropriados, que possuam TRRF (SILVA, 2012). À vista disso, a proteção passiva certifica a resistência ao fogo, promove a fuga dos usuários e facilita a aproximação ou o acesso do Corpo de Bombeiros.

A compartimentalização desempenha múltiplos papeis na proteção passiva. Isso inclui medidas urbanísticas, como distâncias de separação entre edificações, medidas arquitetônicas que afetam a forma de espaços fechados, terraços e sacadas, bem como as funções dos espaços compartimentados, que podem ser áreas permanentes ou transitórias, e os projetos estruturais em situação de incêndio (COSTA, 2012).

Por outro lado, Brentano (2007) define proteção passiva como todas as formas de proteção incorporadas ao projeto arquitetônico para prevenir incêndios e reduzir a probabilidade de sua propagação e os efeitos de um incêndio já ocorrido. Essas medidas são integradas aos projetos de edificação, garantindo a localização adequada dos equipamentos que possam iniciar incêndios.

2.3.1. Compartimentação

Um compartimento é definido como uma divisão interna dentro de uma edificação, projetada para evitar a disseminação do fogo para outras áreas. Para isso, os componentes construtivos devem ser capazes de resistir ao fogo, de acordo com as normas técnicas, garantindo a proteção dos espaços adjacentes por meio de sua capacidade de isolamento e vedação (GOUVEIA, 2006).

De acordo com a IT 03 (2025), o isolamento térmico refere-se à capacidade de um elemento construtivo de compartimentação de resistir à exposição ao fogo por um período específico, evitando a transmissão de calor para outros elementos. Isso cria uma barreira térmica que protege as pessoas próximas à superfície durante o tempo de resistência ao fogo.

A compartimentação vertical tem o objetivo de impedir a propagação de calor ou gases de forma vertical. Isso inclui a utilização de lajes com espessura mínima adequada para atender aos requisitos de isolamento térmico e estanqueidade, bem como parapeitos ou marquises de fachada, portas corta-fogo e selantes resistentes ao fogo (*firestops*). Por outro lado, a compartimentação horizontal visa evitar a propagação de chamas e gases em sentido horizontal, como em átrios, escadas e rampas de circulação. Deve respeitar os parâmetros estabelecidos para a compartimentação de áreas, conforme a IT Nº 09 do CBPMESP (2025).

Neste contexto, a compartimentação horizontal envolve paredes que atendem às características de isolamento e estanqueidade, portas corta-fogo, distâncias mínimas entre aberturas de compartimentos e *firestops* capazes de vedar todas as ligações horizontais entre compartimentos no mesmo pavimento.

2.3.2. Resistência ao Fogo

A resistência ao fogo é, consoante a Instrução Técnica Nº 03, do CBPMESP (2025), a propriedade de um elemento construtivo de suportar a ação do fogo por um período específico, mantendo sua integridade, isolamento térmico, estabilidade de forma e posição, além de vedar a passagem de gases e chamas do interior para o exterior do compartimento.

Segundo Ferreira (2019), o isolamento refere-se à:

> Capacidade do elemento construtivo, nesse caso, o elemento de vedação, de impedir o fluxo de calor do interior do compartimento para fora deste, em intensidade tal que promova a ignição espontânea do material presente no compartimento adjacente. O último aspecto da resistência ao fogo, a estabilidade de forma e posição, se refere à capacidade do elemento de permanecer na posição em que foi construído e não sofrer deformações excessivas em uma situação de incêndio. (FERREIRA, 2019, p. 14).

O Quadro 1 apresenta um resumo do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) para os elementos estruturais, segundo a IT 8 Parte 1 (2025), que depende, prioritariamente, do tipo de ocupação e da altura de incêndio do edifício.

Quadro 1 - Tempos requeridos de resistência ao fogo

Grupo	Ocupação/ Uso	Divisão	Profundidade do subsolo hs		Altura da edificação h			
			Classe S2 hs > 10m	Classe S1 hs ≤ 10m	Classe P1 h ≤ 6m	Classe P2 6m < h ≤ 12m	Classe P3 12m < h ≤ 23m	Classe P4 23m < h ≤ 30m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60	30	30	60	90
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60	60	90
C	Comercial varejista	C-1	90	60	60	60	60	90
		C-2 e C-3	90	60	60	60	60	90

D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-4	90	60	30	60	60	90
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60	30	30	60	90
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6, F-8, F-10 e F-11	90	60	60	60	60	90
		F-3, F-4 e F-7	90	60	**Ver item A.2.3.3**		30	60
		F-9	90	60	30	60	60	90
G	Serviços automotivos	G-1 a G-5	120	90	30	60	60	90
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 e H-4	90	60	30	60	60	90
		H-2, H-3, H-5 e H6	90	60	30	60	60	90
I	Industrial	I-1	90	60	30	30	30	60
		I-2	120	90	30	30	60	90
		I-3	120	90	60	60	90	120
J	Depósitos	J-1	60	30	**Ver item A.2.3.4.**		30	30
		J-2	90	60	60	60	60	60
		J-3	90	60	60	60	60	120
		J-4	120	90	60	60	90	120
L	Explosivos	L-1, L-2 e L-3	120	120	120	-		
M	Especial	M-1	150	150	150	-		
		M-2	-		120	120	-	-
		M-5	120	90	60	60	90	120
		M-3	120	90	90	90	120	120
K	Energia	K-1	120	90	90	90	120	120

Fonte: *Adaptado de IT N° 8 Parte 1 do CBPMESP, 2025.*

Silva (2012) explica, ainda, que a altura de incêndio é a distância entre o ponto de saída e o nível de descarga e o piso do último pavimento, exceto em áticos, casas de máquinas, barriletes, reservatórios de água e elementos similares.

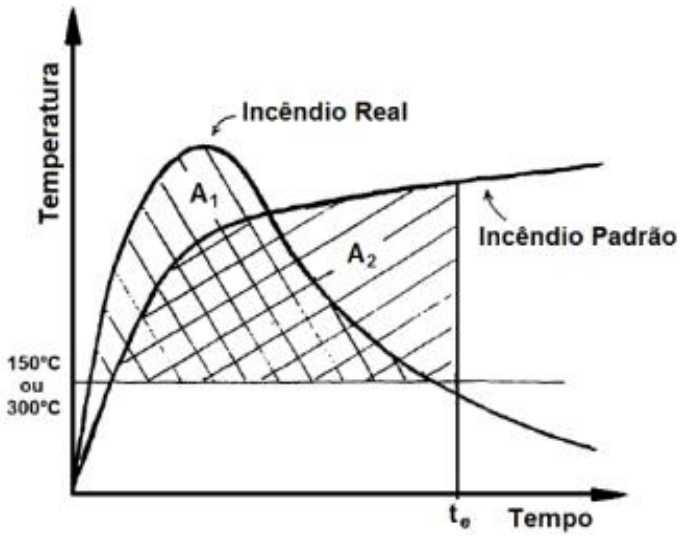
2.3.3. Tempo Requerido de Resistência ao Fogo – TRRF

O Decreto Estadual nº 63.911/2018 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, por meio da Instrução Técnica nº 08/2025, estabelece as exigências aplicáveis aos elementos estruturais e de compartimentação das edificações, definindo os Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF) que devem ser atendidos. Essas medidas são projetadas para evitar o colapso estrutural durante um incêndio, garantindo a saída segura dos ocupantes e o acesso adequado às operações de combate ao fogo.

O TRRF é um parâmetro de projeto que não corresponde ao tempo de duração do incêndio, ao tempo de evacuação da edificação ou ao tempo de resposta do Corpo de Bombeiros. Ele é determinado empiricamente, considerando a provável severidade do incêndio, as dificuldades no controle do fogo e as consequências do colapso estrutural, incluindo os riscos às equipes de combate e a possibilidade de ruína, especialmente em edifícios mais altos (BERTO, 2019).

Para verificar a resistência de um elemento estrutural durante um incêndio, é necessário compreender seu comportamento sob altas temperaturas. Para tanto, utiliza-se o modelo fictício padrão de incêndio. Esse modelo é importante para determinar o campo de temperatura no concreto durante o incêndio, exigindo o conhecimento do tempo de duração do incêndio (SILVA, 2012). Levando em consideração que essa é uma curva teórica e não uma representação exata de um incêndio real, as normas e códigos, regularmente, especificam tempos fictícios elevados para incorporar um fator de segurança adequado (Figura 2).

Figura 2. Curvas de temperatura-tempo dos incêndios.



Fonte: Thomas et al., 1997.

As normas brasileiras ABNT NBR 14432:2001 e ABNT 5628:2022 recomendam a Equação 1 para a elevação padronizada de temperatura em função do tempo, com base na ISO 834 (2019).

$$\theta_g = 345 \log_{10}(8t + 1) + \theta_{g,0} \quad (1)$$

Sendo:

θ_g = temperatura dos gases no ambiente em chamas (° C)

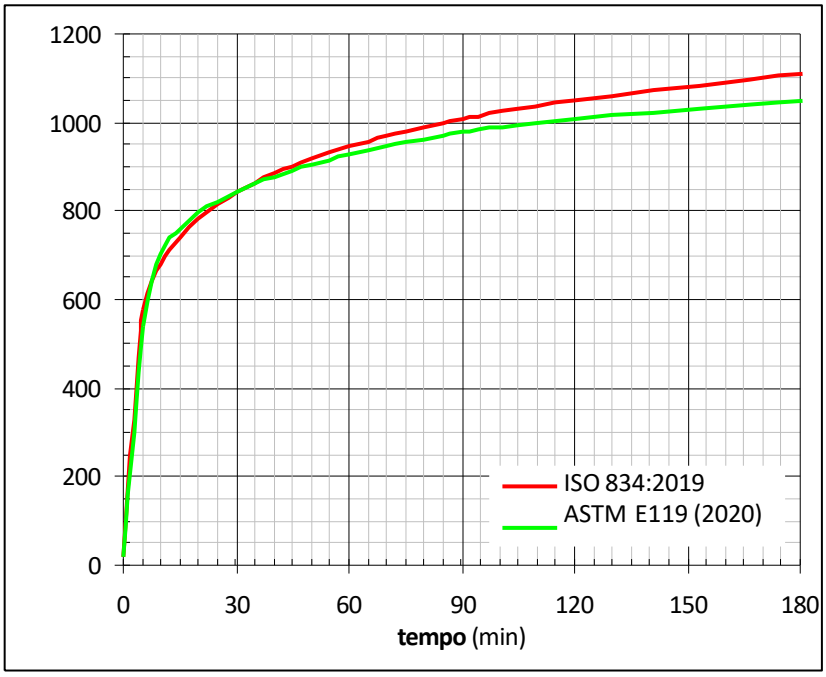
$\theta_{g,0}$ = temperatura dos gases no instante t = 0, normalmente admitida 20 °C

t = tempo (min)

A curva ISO 834:2019 (Gráfico 1) é uma padronização derivada das curvas tradicionais americanas ASTM E-119 (2020) e britânicas BS 476 (2004). Embora essas curvas sejam semelhantes e tenham a mesma origem, existiam diferenças nas especificações de ensaio de cada uma (MALHOTRA, 1980). A padronização internacional tornou-se necessária para facilitar o comércio de produtos entre os países da União Europeia.

Em 1961, a *International Organization for Standardization* (ISO) criou a Comissão Técnica ISO/TC 92, composta por membros de diversos países, incluindo o Brasil, para avaliar a possibilidade de harmonizar as metodologias das normas ASTM E-119 (2007) e BS 476 (1932). O objetivo era propor um conjunto de especificações internacionais para os testes de resistência ao fogo de elementos construtivos (MALHOTRA, 1982).

Gráfico 1 - Curvas nominais para materiais celulósicos.



Fonte: USP, 2008.

Tabela 1 – Curva-padrão ASTM E119.

Tempo (min)	q (°C)
0	20
5	538
10	704
15	760
20	795
25	821
30	843
35	862
40	878
45	892
50	905
55	916
60	927
65	937
70	946
75	955
80	963
85	971
90	978

120	1.010
240	1.093
480	1.260

Fonte: Adaptado de USP, 2008.

Segundo Silva (2012), o TRRF é obtido pelo método tabular e equivalente. Para o método tubular, os TRRF são determinados de forma empírica, fruto do consenso da sociedade, e padronizados por meio de normas ou regulamentos, em função das dimensões e do tipo de utilização do edifício. O método do tempo equivalente permite reduzir o TRRF em até 30 minutos para algumas edificações com características favoráveis à segurança contra incêndio (PIGNATTA, 2014).

2.4. Comportamento do Concreto Armado em Altas Temperaturas

De modo simplificado, a composição do concreto é, em concordância com Souza Júnior (2019):

I. Cimento + água = pasta;
II. Pasta + agregado miúdo = argamassa;
III. Argamassa + agregado graúdo = concreto.

As estruturas de concreto devem apresentar um nível satisfatório de desempenho, comportando-se adequadamente tanto durante a execução quanto ao longo de sua vida útil. As estruturas devem resistir às ações previstas, às condições ambientais e a eventuais situações acidentais, sem apresentar danos significativos. O projeto estrutural, nesse contexto, tem a função de garantir que as estruturas cumpram suas funções com eficiência, evitando custos excessivos e imprevistos com manutenção e reparos (SOUZA, 2015).

Para assegurar a durabilidade, é fundamental considerar os mecanismos de deterioração e envelhecimento do concreto e da estrutura como um conjunto (BASTOS, 2006). Assim, os elementos de concreto precisam ser projetados e executados de forma a manter sua segurança, funcionalidade e estabilidade ao longo de toda a vida útil, em conformidade com as condições ambientais previstas no projeto (SOUZA, 2015).

Sob essa ótica, compreender o comportamento dos materiais durante um incêndio é essencial para o dimensionamento estrutural, uma vez que o aumento da temperatura reduz o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, podendo gerar esforços internos adicionais (SOUZA, 2015). Quando exposto ao fogo, o concreto eleva sua temperatura de forma gradual, pois parte da energia térmica é utilizada na evaporação da água presente em sua matriz, processo que ocorre entre 100 °C e 300 °C sem ocasionar perdas significativas de resistência (CÁNOVAS, 1988).

A análise do comportamento de estruturas de concreto em situação de incêndio requer o entendimento de suas propriedades térmicas, como calor específico, massa específica, coeficiente de dilatação térmica e condutividade, além de suas propriedades mecânicas, entre elas as resistências à compressão e à tração, o módulo de elasticidade e a relação tensão-deformação (SOUSA e SILVA, 2015).

Quando submetido à ação do fogo, o concreto armado passa por transformações de natureza física e química. O aumento de temperatura provoca modificações estruturais no material, enquanto o calor excessivo desencadeia processos como a desidratação da pasta de cimento e as mudanças volumétricas dos agregados, gerando manifestações patológicas associadas a essas reações (BAUER, 2008).

Embora a probabilidade seja pequena, a degradação estrutural de edifícios de concreto em incêndios não é incomum. Embora o concreto seja um material incombustível, de baixa condutividade térmica e, não emite gases tóxicos quando aquecido, em situações de incêndio, o concreto pode sofrer fissuração e lascamento, expondo a armadura ao calor e reduzindo a capacidade resistente da seção (COELHO, 2010).

2.4.1. Efeitos do incêndio no concreto

Mehta e Monteiro (1994) destacam que o desempenho do concreto sob temperaturas elevadas é condicionado por diversos fatores interdependentes, como sua composição, permeabilidade, dimensões do elemento e a velocidade com que a temperatura aumenta. A interação desses aspectos determina a intensidade e o tipo de degradação que o material pode sofrer durante um incêndio.

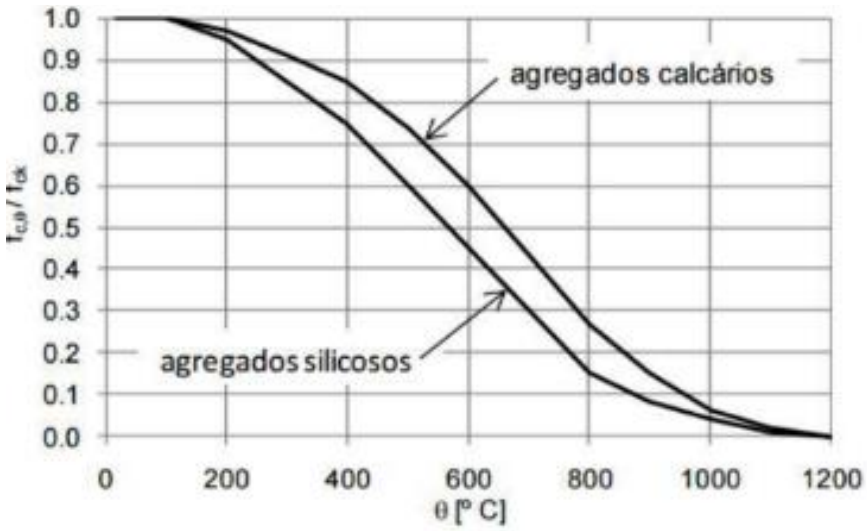
Costa et al. (2002) descrevem que os danos térmicos no concreto podem se manifestar por meio de fissuras, estalos superficiais (pipocamentos) e lascamentos (*spalling*). Devido à composição heterogênea, formada pela pasta de cimento e pelos agregados graúdos e miúdos, o processo de deterioração não ocorre de maneira uniforme, resultando em perda de resistência mecânica e redução do módulo de elasticidade. Essa degradação compromete a rigidez e pode levar ao colapso de elementos estruturais, evidenciando a importância da composição do concreto em cenários de incêndio.

Segundo Lima et al. (2004), uma vantagem relevante do concreto em comparação com outros materiais estruturais, especialmente o aço, é sua elevada resistência ao fogo. Embora sua resistência diminua à medida que a temperatura se eleva, o concreto ainda é capaz de manter sua integridade estrutural por um período considerável antes de atingir o colapso.

A resistência à compressão do concreto diminui com o aumento da temperatura, e isso pode ser visualizado em gráficos específicos (Figura 3). A figura ilustra como a resistência e as propriedades mecânicas do concreto mudam em função da temperatura, destacando a importância de entender essas relações para garantir a segurança estrutural em caso de incêndio.

Os agregados, responsáveis por aproximadamente 60% a 80% do volume total do concreto, desempenham papel central no comportamento térmico do material. Alterações nas propriedades desses componentes durante o aquecimento influenciam significativamente o desempenho global do concreto. Como os agregados possuem coeficientes de dilatação térmica distintos, tendem a ocorrer expansões internas desuniformes quando submetidos a temperaturas elevadas (LIMA et al., 2004).

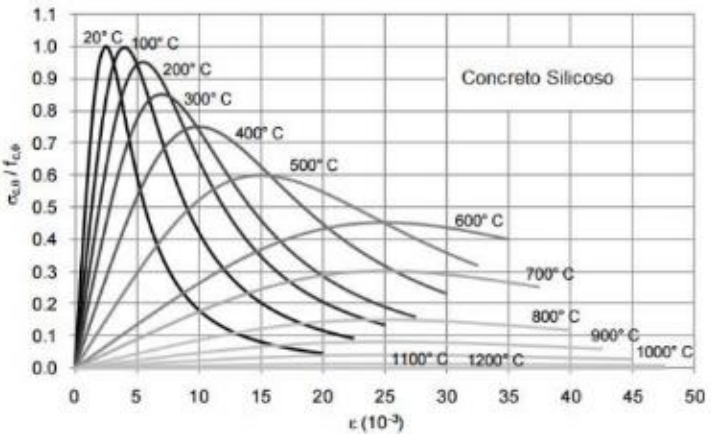
Figura 3. Redução da resistência à compressão do concreto em função da temperatura.



Fonte: Vieira, 2015.

A norma europeia EN 1992-1-2 aponta que o módulo de elasticidade dos concretos é fortemente afetado pela elevação da temperatura. As curvas de deformação apresentadas nas Figuras 4 e 5 evidenciam a perda gradual de rigidez para diferentes faixas térmicas.

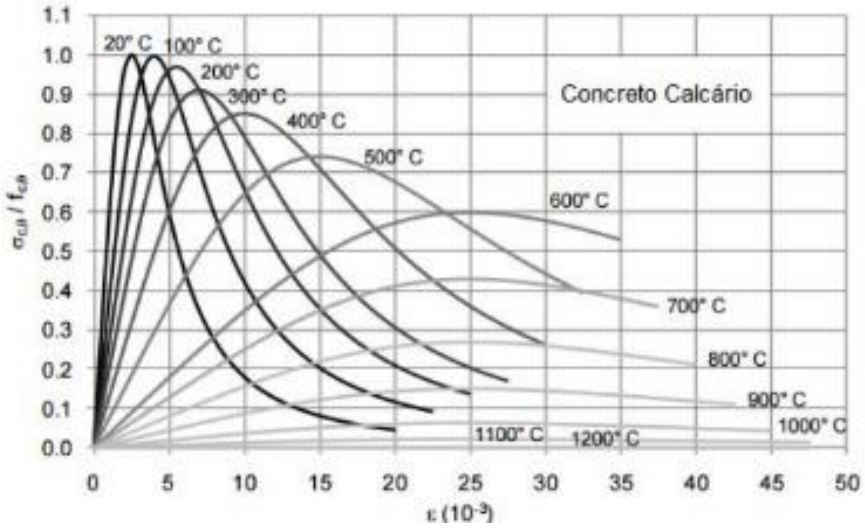
Figura 4. Curvas tensão-deformação dos concretos em função da temperatura.



Fonte: Vieira, 2015.

Concretos silicosos, conforme indicado, apresentam sensibilidade maior ao calor quando comparados aos concretos calcários.

Figura 5. Curvas tensão-deformação dos concretos em função da temperatura.



Fonte: Vieira, 2015.

O Quadro 2 compila estudos que analisam as alterações físico-químicas observadas no concreto submetido a altas temperaturas.

Quadro 2 - Resumo das transformações físico-químicas no concreto durante o incêndio.

Temperatura	Efeitos no Concreto
20 a 100 °C	Ocorre a evaporação da água livre nos poros, gerando retração do concreto, com aumento da porosidade e causando micro-fissuras. Pouca alteração da resistência mecânica.
150 °C	Pico do primeiro estágio de decomposição do silicato de cálcio hidratado.
100 a 300 °C	Perda de água ligada fisicamente ao concreto nos poros, ocorrendo a contração da pasta, provocando micro-fissuras.
350 °C	Ruptura de alguns agregados do tipo seixos de rio.
374 °C	A partir desta temperatura não existe mais água livre nos poros.
400 a 600 °C	Perda de água ligada quimicamente ao concreto, com decomposição dos produtos de hidratação e desidratação do hidróxido de cálcio. Resultando em grande queda na resistência, retração de volume e aumento de fissuras.
700 °C	Dissociação do $CaCO_3$ em $CaO + CO_2$.
720 °C	Segundo pico da decomposição do silicato de cálcio hidratado.
800 °C	Perda total da água quimicamente combinada.
1.200 °C	Início da sinterização do concreto.
1.400 °C	Concreto sinterizado.

Fonte: Adaptado de Costa et al. (2002); Castellote et al. (2003); Georgali e Tsakiridis (2005); Marcelli (2007).

Mehta e Monteiro (1994) ressaltam, também, que o concreto mantém resistência suficiente para permanecer estável por certo período mesmo quando exposto a temperaturas entre 700 e 800 °C, o que possibilita a realização de operações de combate ao fogo e resgate com risco reduzido de colapso imediato. Em condições normais de serviço (cerca de 25 °C), o concreto apresenta comportamento relativamente homogêneo; contudo, quando submetido a temperaturas elevadas, passa a se degradar e a responder estruturalmente como um material heterogêneo.

2.5. Materiais Aplicados à Proteção Passiva em Estruturas de Concreto Armado

2.5.1. Perlita Expandida

A perlita, um mineral de origem vulcânica, é encontrado apenas em algumas regiões do mundo (ERDOGAN, 2015; KONG et al., 2016; SCHUMACHER, 2011). Sua principal característica distintiva é a capacidade de expandir de quatro a vinte vezes seu volume original quando aquecida a altas temperaturas. Especificamente, ao ser aquecida acima de 900 °C, a perlita moída se expande de maneira semelhante ao milho de pipoca. Este fenômeno ocorre devido à presença de água retida no mineral cru, que, ao evaporar-se durante o aquecimento, forma inúmeras pequenas bolhas de ar interconectadas. Como resultado, a perlita se torna um produto de baixa densidade com notáveis propriedades físicas, incluindo um ponto de fusão entre 1085-1250 °C, calor específico de 0,20 cal/g.°C, massa específica aparente de 80-100 kg/m³ e umidade inferior a 0,5%. Quimicamente, a perlita é um aluminossilicato amorfo.

Diversas aplicações deste material são discutidas na literatura. A exemplo, a perlita expandida é utilizada para a remoção de íons como cádmio, níquel e zinco (SILBER et al., 2012; TORAB-MOSTAEI et al., 2010). Utilizando a equação de Langmuir, foi calculada a capacidade máxima de adsorção de 1,79 mg Cd(II)/g de perlita e 2,24 mg Ni(II)/g de perlita. A perlita expandida também tem sido usada como adsorvente de radionuclídeos (AKKAYA, 2013) e para a produção de nanopartículas magnéticas de FeCl2/FeCl3, posteriormente usadas na adsorção do corante verde malaquita, com um máximo de adsorção de cerca de 77% à temperatura ambiente (HEYDARTAEMEH et al., 2014).

Em termos aplicados à proteção passiva, a perlita pode atuar (i) como agregado leve em argamassas de revestimento (camada externa isolante) ou (ii) como preenchimento em sistemas multicamadas (ERDOGAN; SAĞLAM, 2015; PÉREZ et al., 2021). A seleção do traço deve considerar granulometria, ligantes (cimento/*pozzolanas*), relação água/aglomerante, aderência ao concreto, retração e estabilidade térmica ((KOTWICA et al., 2017).

Resíduos de perlita expandida também foram empregados como aditivo cimentício *pozolânico*, mostrando-se um bom material para a indústria da construção (KOTWICA et al., 2017). Outras aplicações incluem a degradação fotocatalítica, onde demonstrou-se que a proporção ideal de B/Ti depositada é de 0,57, atingindo uma degradação de 94% (WANG et al., 2015), e como suporte de enzimas (RODRIGUEZ et al., 2017). Como material de referência econômico-ambiental, a perlita apresenta custo por volume inferior ao do aerogel e disponibilidade comercial em território nacional, o que torna pertinente o comparativo de desempenho térmico em elementos de concreto expostos à ISO 834 via simulação (PÉREZ et al., 2021; GARCIA, 2020).

2.5.2. Aerogéis de Sílica

Os aerogéis de sílica constituem uma das famílias de materiais mais estudadas para isolamento térmico devido à combinação de elevada porosidade, baixa densidade e estrutura nanoporosa que limita os mecanismos de transferência de calor convencionais. Estruturalmente, trata-se de redes tridimensionais contínuas de dióxido de silício (SiO_2) com poros de dimensões nanométricas, que podem superar 90 a 95% de porosidade, resultando em frações sólidas extremamente reduzidas (JIN et al., 2022; ZHANG et al., 2023).

O desempenho térmico dos aerogéis está relacionado ao acoplamento multimodal entre condução no esqueleto sólido, condução no gás confinado e transferência radiativa. Em poros nanométricos, ocorre o chamado efeito Knudsen, que reduz a contribuição do transporte gasoso; contudo, a radiação térmica pode ser significativa em produtos sem opacificantes, sendo comum a adição de aditivos para mitigar esse efeito (AHMED; KUMAR; ANAND, 2021; LI et al., 2023).

A condutividade térmica de aerogéis de sílica varia de acordo com o processo de síntese, densidade, grau de hidratação e forma física do material. Valores entre 0,013 e 0,033 W/ (m.k) são comumente reportados em mantas e placas comerciais aplicadas na construção civil (JIN et al., 2022; NOSRATI; BERARDI, 2018). Entretanto, Brosset et al. (2023) alertam que há inconsistências e variabilidade nos dados disponíveis na literatura, com registros de condutividades fora do intervalo fisicamente plausível, o que exige cautela na escolha de parâmetros para modelagem numérica.

Quanto à síntese, os processos clássicos baseiam-se no método sol-gel com secagem supercrítica, mas técnicas alternativas, como a secagem em pressão ambiente (APD), vêm sendo aprimoradas para reduzir custos e ampliar a robustez mecânica (AHMED; KUMAR; ANAND, 2021; GARCIA, 2020). A forma final do produto, mantas flexíveis, placas rígidas, granulados ou revestimentos, é determinante para a aplicação em edificações, sendo que mantas e painéis são os mais empregados em *retrofit* e sistemas de fachada (BERARDI, 2015; JIN et al., 2022).

Efetivamente, aerogéis de sílica apresentam elevada eficiência em isolamento térmico, contribuindo para a redução de perdas energéticas e aumento da resistência ao fogo de elementos construtivos (AHMED; KUMAR; ANAND, 2021; ZHANG et al., 2023). Entretanto, limitações relacionadas ao custo elevado, à fragilidade mecânica e à variabilidade dos parâmetros térmicos restringem sua aplicação em larga escala, sobretudo em países em desenvolvimento (GARCIA, 2020; BERARDI, 2015).

3 METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como um estudo aplicado e exploratório, baseado em simulações numéricas para avaliar o desempenho térmico de placas de concreto submetidas a aquecimento extremo, nas quais foram conduzidas no ambiente SOLIDWORKS *Simulation* 2024, utilizando o módulo de análise térmica transiente por elementos finitos. A escolha por simulações computacionais, em substituição a ensaios laboratoriais em forno, deve-se à sua comprovada eficiência quanto à redução de custos, agilidade na execução, flexibilidade para testar diferentes cenários e validade científica reconhecida na literatura (DIAS, 2009; COELHO, 2010).

A amostra analisada consiste em modelos tridimensionais de placas de concreto submetidas ou não à aplicação de revestimentos isolantes em uma das faces. Foram avaliadas três configurações: concreto sem revestimento, concreto com revestimento de perlita expandida e concreto com revestimento de aerogel de sílica. A placa de base possui dimensões de 300 mm × 200 mm × 150 mm, representativa de elementos estruturais de pequena espessura, tais como paredes delgadas, painéis pré-moldados ou elementos secundários sujeitos à ação térmica, enquanto os revestimentos foram modelados com espessuras de 10 mm e 20 mm, aderidos à face exposta ao aquecimento.

3.1. Propriedades dos materiais

As propriedades térmicas utilizadas na análise foram definidas a partir da literatura especializada e das recomendações normativas do Eurocode 2 – Parte 1-2 (CEN, 2004), que estabelece valores de condutividade térmica, calor específico e densidade em função da temperatura para o concreto.

Para o concreto, considera-se, conforme Costa, 2002; CEN, 2004 e NBR 15200:2024:

- Módulo de elasticidade: 28 GPa;
- Coeficiente de dilatação térmica: 10^{-5}/°C;
- Coeficiente de Poisson 0,20;
- Massa específica: 2.400 kg/m³;
- Calor específico: 880 J/kg.K a 25 °C e;
- Condutividade térmica de 1,75 W/m.K.

Quanto ao revestimento de perlita expandida, com base em Kotwica et al. (2017) e Erdogan (2015), admite-se:

- Módulo de elasticidade: 10 MPa;
- Coeficiente de dilatação térmica: 10^{-5}/°C;
- Coeficiente de Poisson 0,268;
- Massa específica: 100 kg/m³;
- Calor específico: 900 J/kg.K a 25 °C e;
- Condutividade térmica: 0,055 W/m.K.

Para o revestimento de aerogel de sílica, conforme Fricke e Emmerling (1992) e Nosrati e Berardi (2018), considera-se:

- Módulo de elasticidade: 7 MPa;
- Coeficiente de dilatação térmica: 10-5/°C;
- Coeficiente de Poisson 0,20;
- Massa específica: 125 kg/m³;
- Calor específico de 800 J/kg.K a 25 °C e;
- Condutividade térmica: 0,016 W/m.K.

Todos esses parâmetros foram inseridos no software como funções dependentes da temperatura, de modo a representar, de maneira fidedigna, o comportamento térmico dos materiais analisados.

3.2. Condições de Contorno

O estudo considerou uma análise térmica transiente. Atribuiu-se inicialmente à placa a uma temperatura uniforme de 25 °C, representando uma condição ambiente. Já a face frontal da placa - ou do revestimento, nos modelos protegidos - foi submetida a um carregamento térmico de 700 °C, simulando uma condição de exposição a incêndio. Essa temperatura fixa foi adotada em substituição à curva ISO 834, visando avaliar comparativamente o efeito isolante dos revestimentos sob uma condição padronizada de severidade (DRYSDALE, 2011).

As demais faces foram tratadas como adiabáticas, sem troca relevante de calor com o meio, conforme prática comum em modelagens térmicas de elementos submetidos a fogo em apenas uma de suas faces (HARMATHY, 1993).

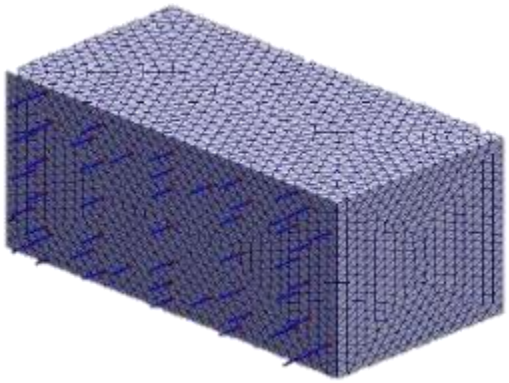
O contato entre o concreto e os revestimentos foi modelado como condução térmica perfeita, sem resistência térmica adicional, seguindo recomendações para análises em que o objetivo é isolar o desempenho dos materiais (GUSTAVSSON; FRANSSON, 2011).

3.3. Discretização do modelo e geração da malha

A discretização do domínio foi realizada por meio de malha sólida com elementos tetraédricos, de malha mesclada com base em curvatura do programa computacional. Adotou-se tamanho de elemento mínimo e máximo de 10 mm. Essa configuração assegura refinamento suficiente nas regiões próximas à face exposta ao aquecimento e ao longo da espessura da placa, permitindo capturar adequadamente os gradientes térmicos sem onerar excessivamente o custo computacional.

A Figura 6 ilustra a discretização final do modelo, evidenciando a regularidade geométrica e a uniformidade dos elementos, condições que favorecem a estabilidade da solução numérica em análises térmicas transientes.

Figura 6. Discretização final e geração de malha.

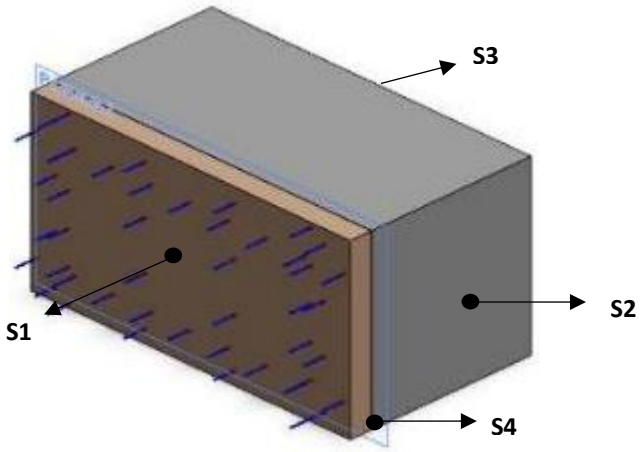


Fonte: Autoria própria, 2025.

3.4. Critérios de análise

A avaliação quantitativa baseou-se no monitoramento da evolução da temperatura em pontos estratégicos da placa (Figura 7), em que S1 refere-se à face exposta ao fogo; S2 ao centro geométrico da espessura da placa; S3 à face não exposta ao fogo e; S4, à Interface revestimento-concreto.

Figura 7. Ponto de aplicação da temperatura e dos pontos S1, S2, S3, S4.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Esses pontos permitiram avaliar a eficiência dos revestimentos na atenuação do fluxo térmico e no retardo da elevação de temperatura no concreto. Os impactos serão analisados com base em dois parâmetros principais, sendo eles (i) a redução da temperatura (ΔT) em comparação ao concreto sem revestimento, para cada instante de análise e (ii) o tempo necessário para que a face não exposta alcance determinadas temperaturas de referência, relacionadas a limites de segurança para estruturas de concreto.

3.5. Limitações do Estudo

Embora as simulações desenvolvidas permitam avaliar com precisão a evolução térmica nos modelos, algumas limitações inerentes ao método adotado devem ser reconhecidas. A análise foi conduzida exclusivamente no domínio térmico, sem considerar efeitos mecânicos associados ao aquecimento, tais como fissuração térmica, dilatação diferencial, perda de rigidez, instabilidade ou lascamentos (*spalling*), fenômenos que podem alterar significativamente o comportamento de elementos reais em situação de incêndio.

As propriedades térmicas dos materiais foram consideradas homogêneas e isotrópicas, sem variação por umidade ou microestrutura, e o contato entre concreto e revestimentos foi modelado como perfeitamente aderido, desconsiderando imperfeições ou descontinuidades comuns em sistemas aplicados em obra. Além disso, adotou-se uma condição de aquecimento uniforme na superfície exposta e ausência de fluxo térmico nas faces não expostas, o que representa uma idealização em relação aos padrões complexos de transferência de calor em incêndios reais. Tais simplificações, ainda que adequadas para fins comparativos e para análises paramétricas, devem ser consideradas na interpretação dos resultados e na extrapolação para sistemas construtivos em escala real.

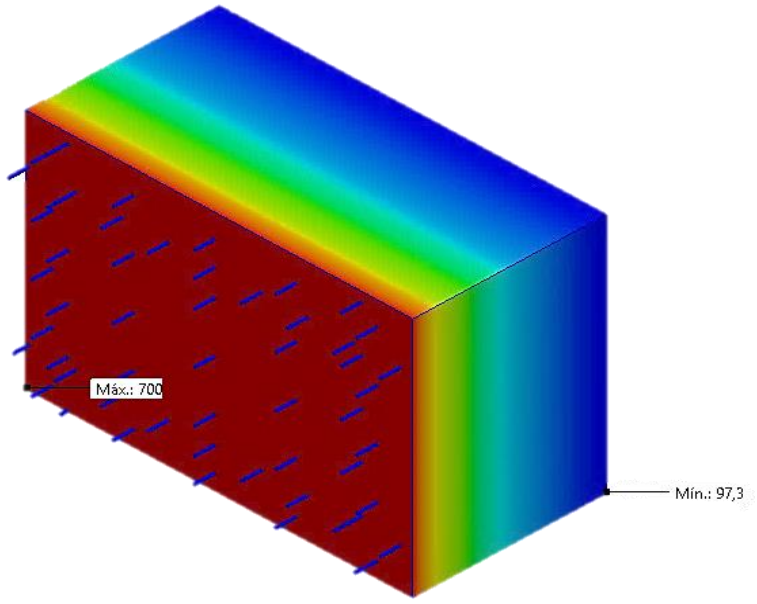
4 RESULTADOS

Os resultados foram obtidos por intermédio das simulações térmicas transientes realizadas no software. Para cada configuração analisada (concreto sem revestimento, concreto com revestimento de perlita expandida e concreto com revestimento de aerogel de sílica) foram extraídas as temperaturas nos pontos de monitoramento definidos na metodologia. Os resultados são apresentados para os tempos de 60 s, 300 s, 600 s, 900 s, 1200 s, 1500 s, 1800 s, 2400 s, 3000 s e 3600 s, permitindo comparar a taxa de propagação térmica e o efeito isolante de cada revestimento.

4.1. Desempenho térmico da placa de concreto sem revestimento

A resposta térmica da placa de concreto sem revestimento foi avaliada a partir do aumento das temperaturas nos pontos de monitoramento definidos: face exposta ao fogo (S1), centro da espessura da placa (S2) e face não exposta ao fogo (S3). A simulação transiente, com duração total de 3.600 s, permitiu caracterizar o processo de propagação do calor ao longo da espessura do material e a resposta térmica do concreto em condição não protegida. A Figura 8 apresenta o campo térmico resultante da simulação da placa de concreto sem revestimento, enquanto a Tabela 2 e o Gráfico 2 sintetizam os valores obtidos ao longo do tempo.

Figura 8. Campo Térmico resultante para placa de concreto sem revestimento a 3.600 s.



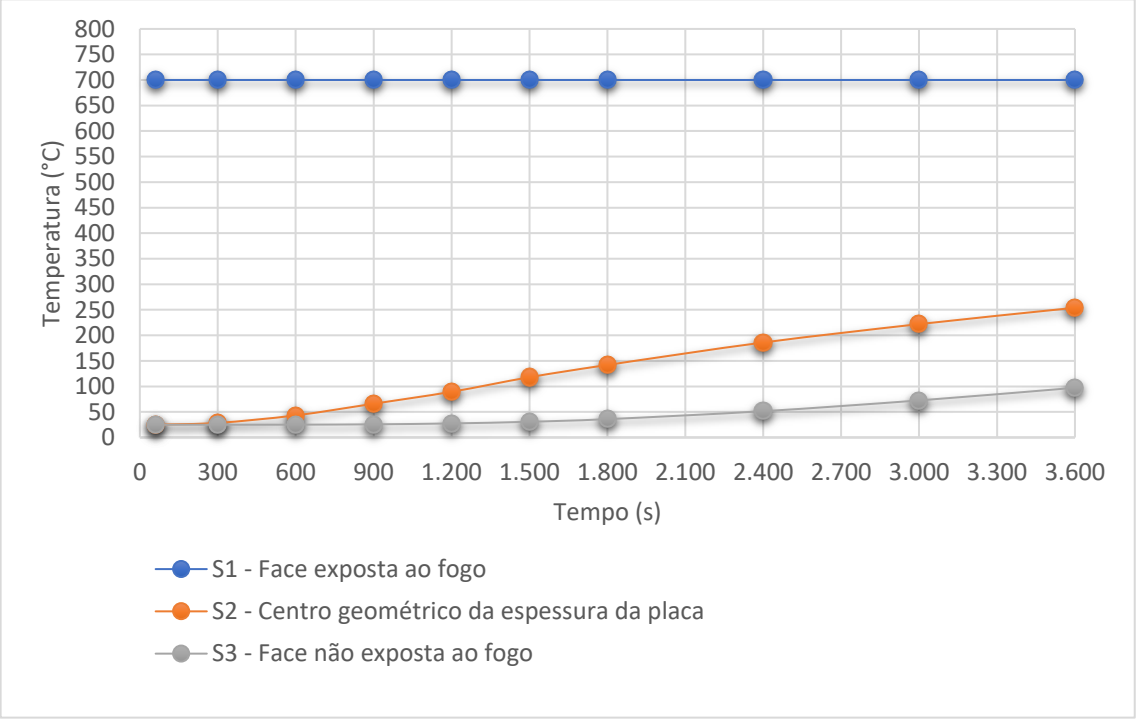
Fonte: Autoria própria, 2025.

Tabela 2 – Curva Tempo x Temperatura referente à placa de concreto sem revestimento.

Tempo (s)	Temperatura (°C)		
	S1 - Face exposta ao fogo	S2 - Centro geométrico da espessura da placa	S3 - Face não exposta ao fogo
60	700	25,1	25
300	700	28,6	25
600	700	43,3	25,1
900	700	66,1	25,8
1.200	700	89,5	27,5
1.500	700	118	30,8
1.800	700	142	35,9
2.400	700	186	51,5
3.000	700	222	72,6
3.600	700	254	97,3

Fonte: Autoria própria, 2025.

Gráfico 2 – Curva Tempo x Temperatura referente à placa de concreto sem revestimento.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A face exposta (S1) manteve-se continuamente próxima aos 700 °C durante todo o ensaio, refletindo a condição de contorno imposta.

No interior da placa (S2), observou-se incremento gradual da temperatura, partindo de 25,1 °C aos 60 s e atingindo 254 °C ao final do período de simulação.

Já a face oposta (S3) permaneceu em baixas temperaturas nos primeiros instantes, evoluindo de 25 °C para 97,3 °C ao final dos 3.600 s.

Esses resultados estabelecem o comportamento térmico de referência da placa de concreto, servindo como base comparativa para avaliar a eficácia dos revestimentos isolantes apresentados nas subseções seguintes.

4.2. Desempenho térmico da placa de concreto revestida com 10 mm de perlita expandida

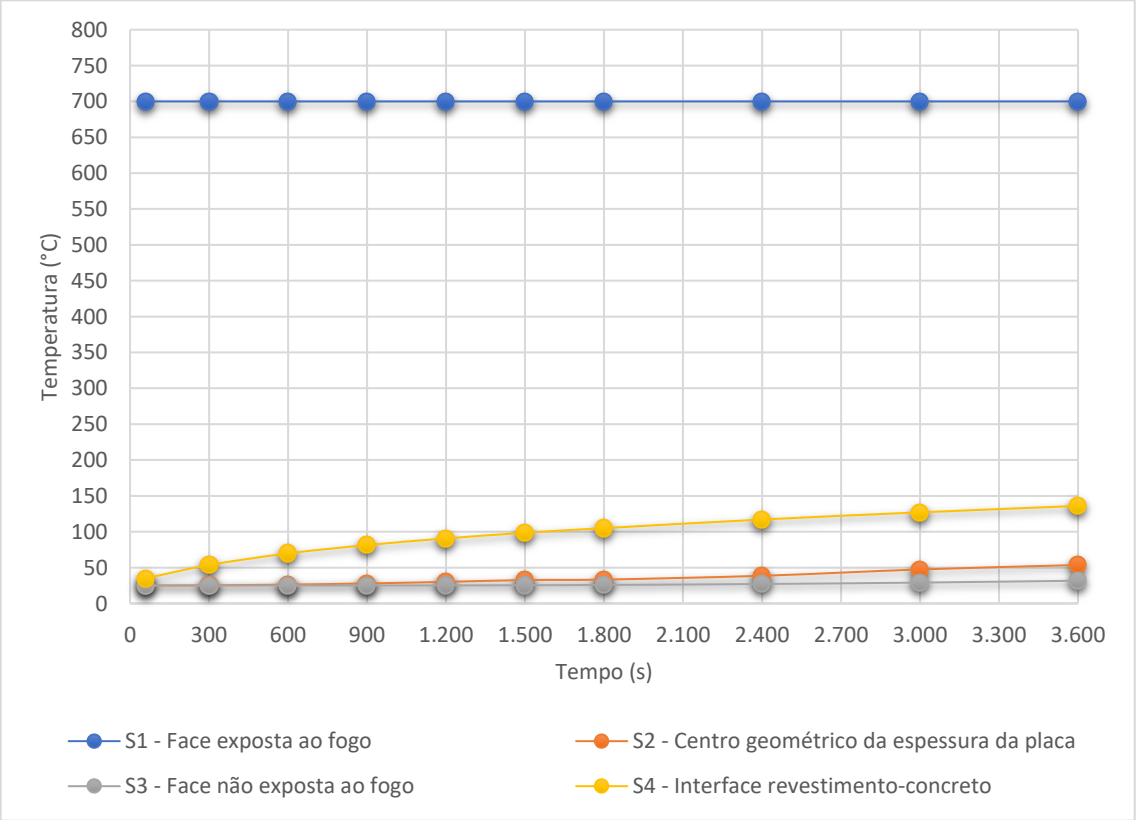
O crescimento térmico da placa de concreto revestida com 10 mm de perlita expandida foi analisada nos quatro pontos definidos na metodologia: face exposta ao fogo (S1), centro da espessura da placa (S2), face não exposta (S3) e interface revestimento–concreto (S4). A simulação térmica permitiu caracterizar o comportamento conjunto do revestimento e do substrato de concreto ao longo dos 3.600 s de exposição. A Tabela 3 e o Gráfico 3 sintetizam a evolução da temperatura nos pontos avaliados, à medida que a Figura 9 apresenta o campo térmico resultante ao final da simulação.

Tabela 3 – Curva Tempo x Temperatura referente à placa de concreto revestida com 10 mm de perlita expandida.

	Temperatura (°C)			
Tempo (s)	**S1 - Face exposta ao fogo**	**S2 - Centro geométrico da espessura da placa**	**S3 - Face não exposta ao fogo**	**S4 - Interface revestimento-concreto**
60	700	25	25	35,1
300	700	25,3	25	53,6
600	700	26,3	25	69,8
900	700	27,9	25,1	81,4
1.200	700	30,1	25,2	90,7
1.500	700	32,6	25,4	98,5
1.800	700	33,3	25,8	105
2.400	700	38,6	27,1	117
3.000	700	47,4	29,1	127
3.600	700	53,6	31,7	136

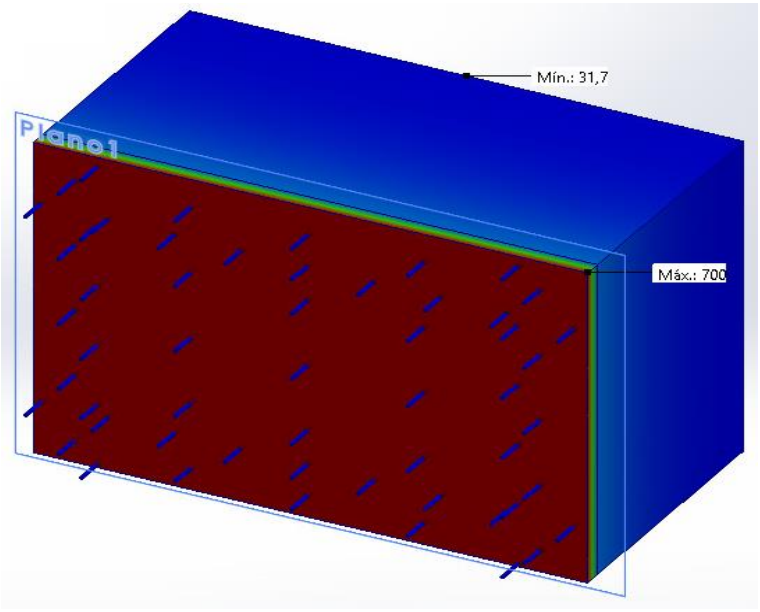
Fonte: Autoria própria, 2025.

Gráfico 3 – Curva Tempo x Temperatura referente à placa de concreto revestida com 10 mm de perlita expandida.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 9. Campo Térmico resultante para placa de concreto revestida com 10mm de perlita expandida a 3.600 s.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Os resultados mostram que a face exposta ao fogo (S1) mantém-se estável em aproximadamente 700 °C, refletindo a condição de contorno imposta. A interface revestimento–concreto (S4), ponto mais próximo da fonte de calor após o revestimento, apresentou incremento progressivo da temperatura, atingindo 136 °C ao final de 3.600 s. Esse comportamento indica que a perlita expandida retardou a transferência térmica para a camada estrutural.

No interior da placa, o centro geométrico (S2) permaneceu em temperaturas significativamente inferiores às observadas no modelo sem proteção, variando de 25 °C no início para 57,6 °C ao final da simulação. A face não exposta (S3) apresentou variação térmica ainda mais moderada, alcançando apenas 31,7 °C após 3.600 s, evidenciando que a perlita atua de maneira eficaz na redução do fluxo térmico, limitando a elevação de temperatura no interior do concreto ao longo do período analisado.

A partir desse desempenho, torna-se possível analisar de forma comparativa como o aumento da espessura do revestimento modifica a resposta térmica do sistema, o que é apresentado na avaliação da placa protegida com 20 mm de perlita expandida.

4.3. Desempenho térmico da placa de concreto revestida com 20 mm de perlita expandida

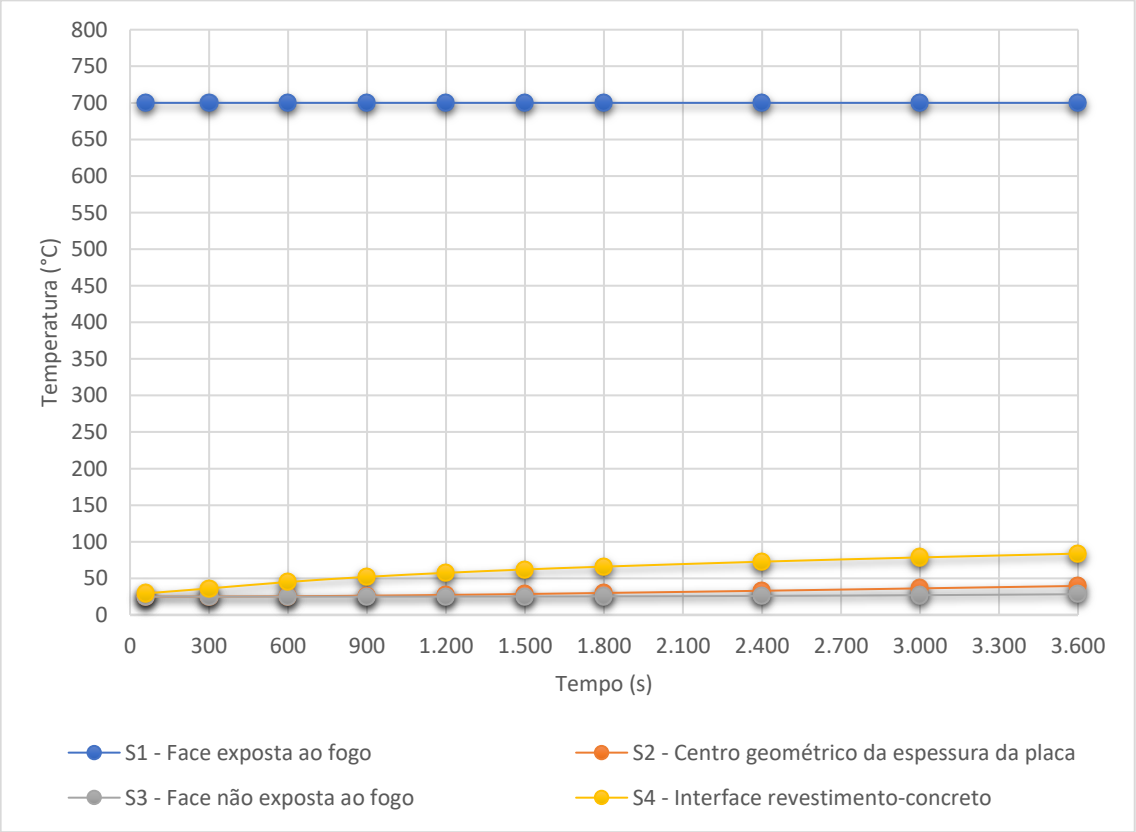
A placa de concreto protegida com 20 mm de perlita expandida apresentou menores gradientes térmicos internos e propagação de calor ainda mais lenta ao longo do período de exposição de 3.600 s comparado aos demais cenários simulados anteriormente. A Tabela 4 e o Gráfico 4 apresentam os valores obtidos nos quatro pontos de apuração (S1, S2, S3 e S4).

Tabela 4 – Curva Tempo x Temperatura referente à placa de concreto revestida com 20 mm de perlita expandida.

Tempo (s)	Temperatura (°C)			
	S1 - Face exposta ao fogo	S2 - Centro geométrico da espessura da placa	S3 - Face não exposta ao fogo	S4 - Interface revestimento-concreto
60	700	25	25	29,5
300	700	25,1	25	36,2
600	700	25,5	25	45
900	700	26,3	25	52
1.200	700	27,3	25,1	57,5
1.500	700	28,6	25,2	62,1
1.800	700	30	25,4	66
2.400	700	33	26	72,8
3.000	700	36,3	27	78,6
3.600	700	39,6	28,3	83,8

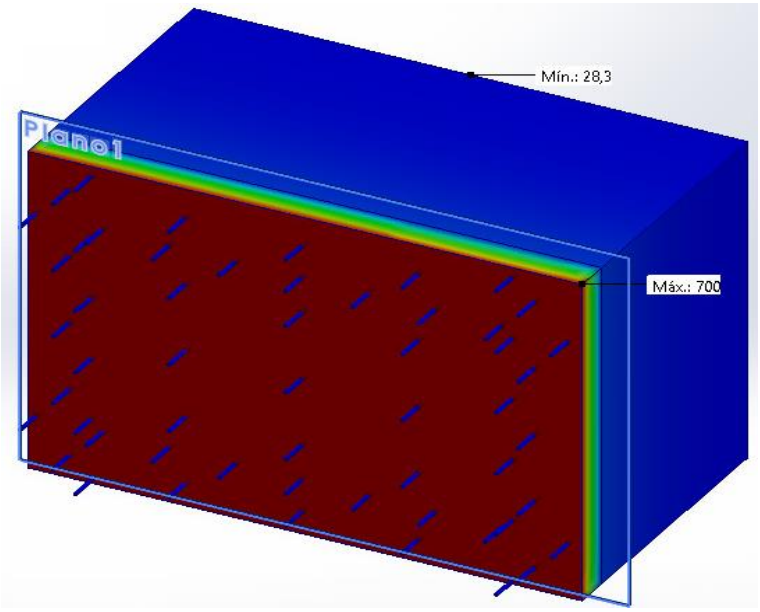
Fonte: Autoria própria, 2025.

Gráfico 4 – Curva Tempo x Temperatura referente à placa de concreto revestida com 20 mm de perlita expandida.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 10. Campo Térmico resultante para placa de concreto revestida com 20mm de perlita expandida a 3.600 s.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A partir da Figura 10, nota-se que a perlita expandida atua como barreira térmica eficiente, reduzindo significativamente o fluxo de calor transmitido ao concreto, em que o calor permanece predominantemente confinado ao revestimento, com gradientes suaves no concreto e ausência de penetração térmica significativa mesmo após longos períodos de exposição.

A região central do concreto (S2) apresentou aquecimento reduzido, evoluindo de 25 °C para 39,6 °C ao final da simulação. Já a face não exposta ao fogo (S3) manteve-se praticamente estável durante grande parte do ensaio, atingindo apenas 28,3 °C aos 3.600 s, indicando que a energia térmica não foi propagada com intensidade suficiente para alterar significativamente a temperatura desse ponto.

Os resultados obtidos para 20 mm de perlita expandida evidenciam o impacto direto da espessura na atenuação térmica, permitindo contrastar seu desempenho com materiais de maior capacidade isolante, como o aerogel de sílica, abordado no item seguinte.

4.4. Desempenho térmico da placa de concreto revestida com 10 mm de aerogel de sílica

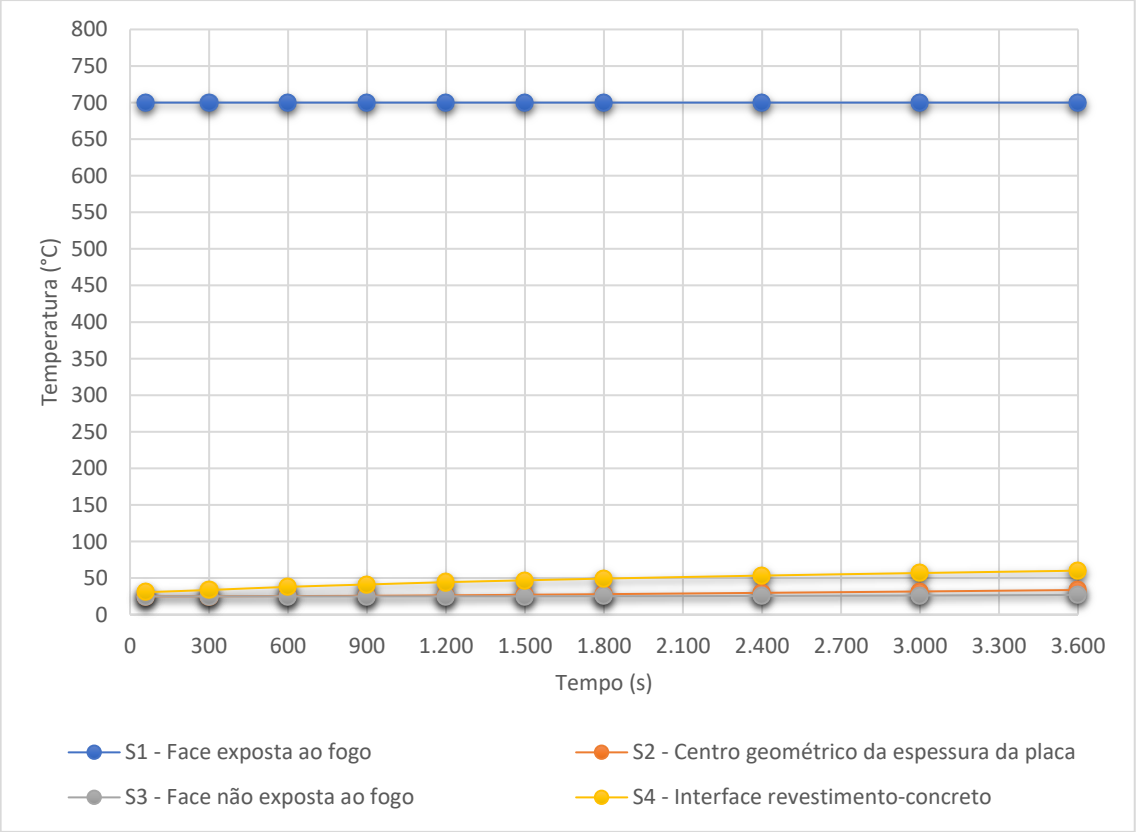
A solução térmica da placa de concreto revestida com 10 mm de aerogel de sílica foi analisada ao longo de 3.600 s de simulação, com averiguação das temperaturas nos quatro pontos definidos. A Tabela 5 e o Gráfico 5 apresentam o aumento temporal do campo térmico obtido para esta configuração, enquanto a Figura 11 apresenta o campo térmico resultante ao final da simulação.

Tabela 5 – Curva Tempo x Temperatura referente à placa de concreto revestida com 10 mm de aerogel de sílica.

Tempo (s)	Temperatura (°C)			
	S1 - Face exposta ao fogo	S2 - Centro geométrico da espessura da placa	S3 - Face não exposta ao fogo	S4 - Interface revestimento-concreto
60	700	25	25	30,7
300	700	25,1	25	33,7
600	700	25,4	25	38
900	700	25,8	25	41,2
1.200	700	26,4	25,1	44,4
1.500	700	27,2	25,1	46,9
1.800	700	28	25,2	49,3
2.400	700	29,8	25,6	53,4
3.000	700	31,7	26,2	56,9
3.600	700	33,7	27	60,1

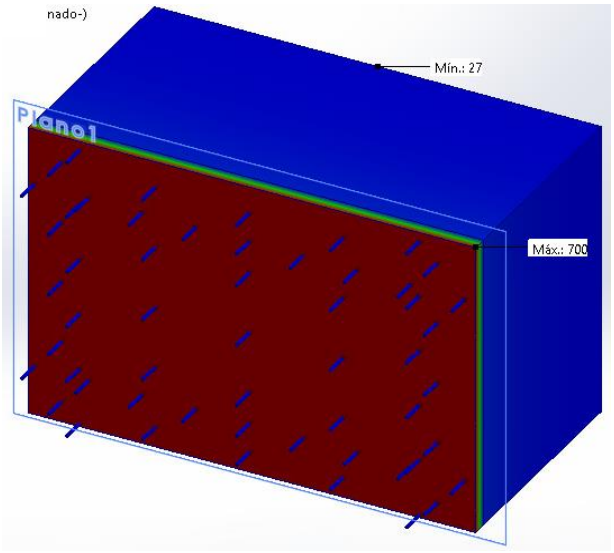
Fonte: Autoria própria, 2025.

Gráfico 5 – Curva Tempo x Temperatura referente à placa de concreto revestida com 10 mm de aerogel de sílica.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 11. Campo Térmico resultante para placa de concreto revestida com 10mm de aerogel de sílica a 3.600 s.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A face exposta (S1) permaneceu estável em 700 °C, em atendimento à condição de contorno aplicada à placa. Já a interface revestimento-concreto (S4) apresentou elevação moderada e gradual, iniciando em 30,7 °C aos 60 segundos e atingindo apenas 60,1 °C ao final da simulação, demonstrando a baixa condutividade térmica do aerogel, no qual reduz significativamente o fluxo de calor transferido para o concreto.

No centro da espessura da placa (S2), as temperaturas mantiveram-se próximas da condição inicial até aproximadamente 1.800 s, passando de 25 °C para apenas 33,7 °C ao final do ensaio. A face não exposta (S3) seguiu tendência semelhante, atingindo um máximo de 27 °C, o que confirma que a energia térmica absorvida durante o período de exposição foi fortemente atenuada antes de alcançar a superfície oposta do elemento.

4.5. Desempenho térmico da placa de concreto revestida com 20 mm de aerogel de sílica

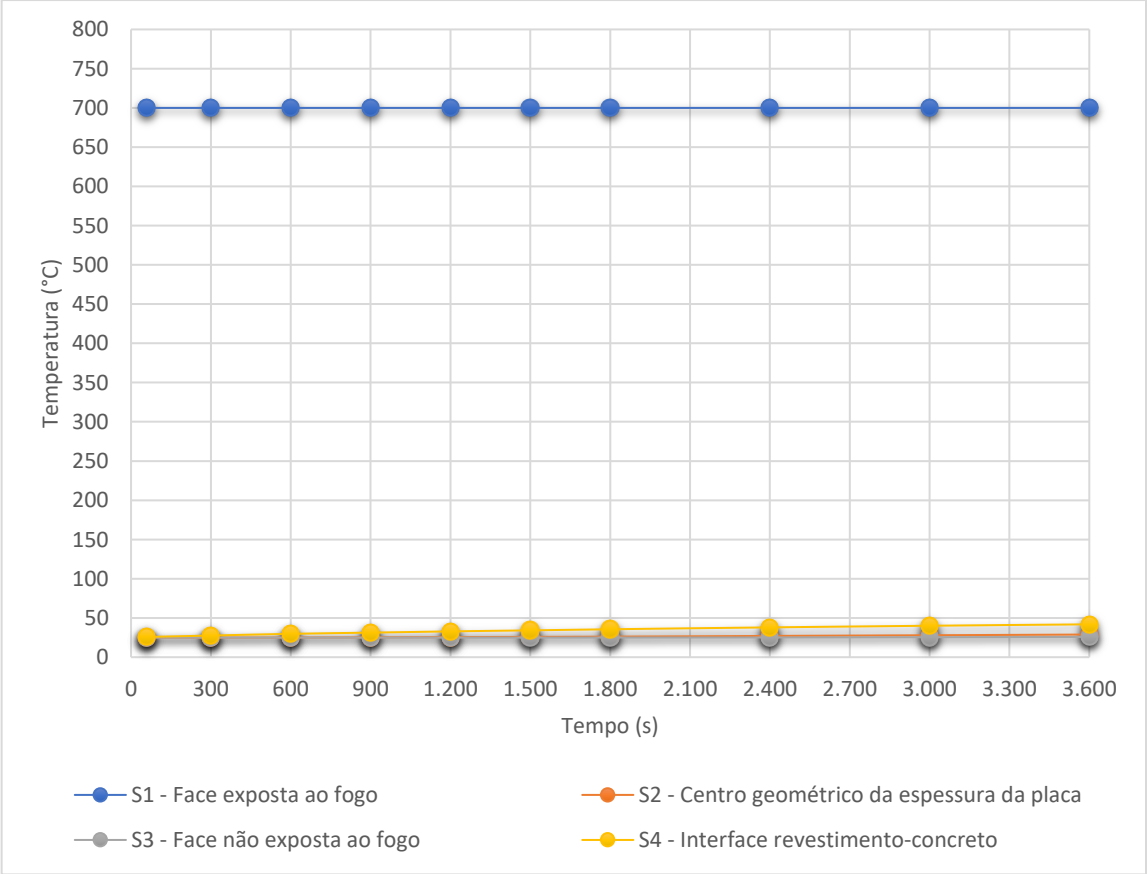
A resposta térmica da placa de concreto revestida com 20 mm de aerogel de sílica foi monitorada nos quatro pontos estabelecidos (S1, S2, S3 e S4) ao longo dos 3.600 s de simulação térmica transiente. A Tabela 5 apresenta os valores registrados enquanto o Gráfico 5 ilustra o crescimento temporal correspondente.

Tabela 6 – Curva Tempo x Temperatura referente à placa de concreto revestida com 20 mm de aerogel de sílica.

Tempo (s)	Temperatura (°C)			
	S1 - Face exposta ao fogo	S2 - Centro geométrico da espessura da placa	S3 - Face não exposta ao fogo	S4 - Interface revestimento-concreto
60	700	25	25	25,8
300	700	25	25	27,6
600	700	25,1	25	29,8
900	700	25,3	25	31,3
1.200	700	25,6	25	32,9
1.500	700	25,9	25	34,2
1.800	700	26,2	25,1	35,6
2.400	700	27,1	25,2	38
3.000	700	28	25,5	40,1
3.600	700	28,9	25,8	41,9

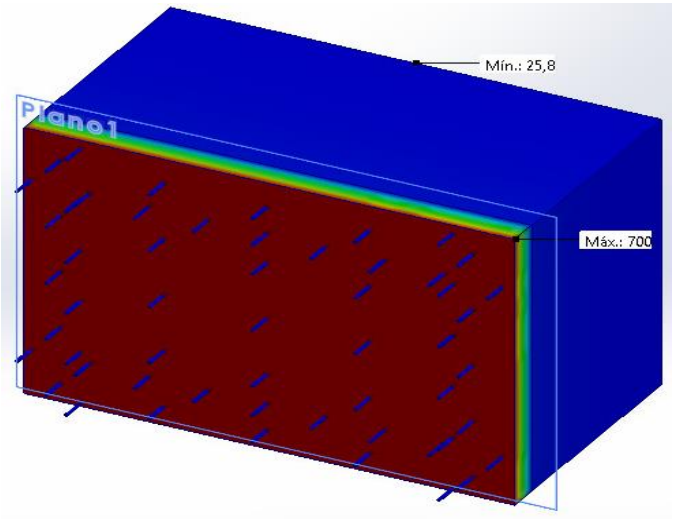
Fonte: Autoria própria, 2025.

Gráfico 6 – Curva Tempo x Temperatura referente à placa de concreto revestida com 20 mm de aerogel de sílica.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 12. Campo Térmico resultante para placa de concreto revestida com 20mm de aerogel de sílica a 3.600 s.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Os resultados mostram que a face exposta (S1) permaneceu constante em 700 °C, conforme condição de contorno aplicada. Na interface revestimento–concreto (S4), observou-se incremento moderado das temperaturas, iniciando em 25,8 °C e atingindo 41,9 °C ao final da simulação. No centro da espessura (S2), a temperatura variou entre 25 °C e 28,9 °C ao longo dos 3.600 s. Já a face não exposta ao fogo (S3) apresentou elevação discreta, partindo de 25 °C e alcançando 25,8 °C no tempo final.

Tais resultados consolidam o efeito isolante superior do aerogel de sílica, encerrando a apresentação dos desempenhos simulados e fornecendo subsídios para a interpretação crítica integrada desenvolvida no capítulo de discussão.

5 DISCUSSÃO

A análise dos modelos computacionais evidencia diferenças marcantes no comportamento térmico das placas de concreto submetidas a aquecimento severo, especialmente quando comparadas as situações com e sem revestimento isolante. O concreto não protegido apresentou progressão térmica típica de materiais homogêneos expostos a aquecimento unidirecional, com elevação progressiva da temperatura no interior da placa, atingindo valores superiores a 250 °C no centro da espessura após 3.600 s. Embora esses níveis não representem, isoladamente, risco imediato de perda de capacidade estrutural, Drysdale (2011) e Harmathy (1993) destacam que temperaturas acima de 300 °C já ocasionam alterações relevantes na microestrutura do concreto, acelerando processos de desidratação e induzindo gradientes térmicos capazes de gerar tensões de origem térmica. Deste modo, o comportamento observado confirma o papel limitado do concreto enquanto barreira térmica quando não associado a materiais de baixa condutividade.

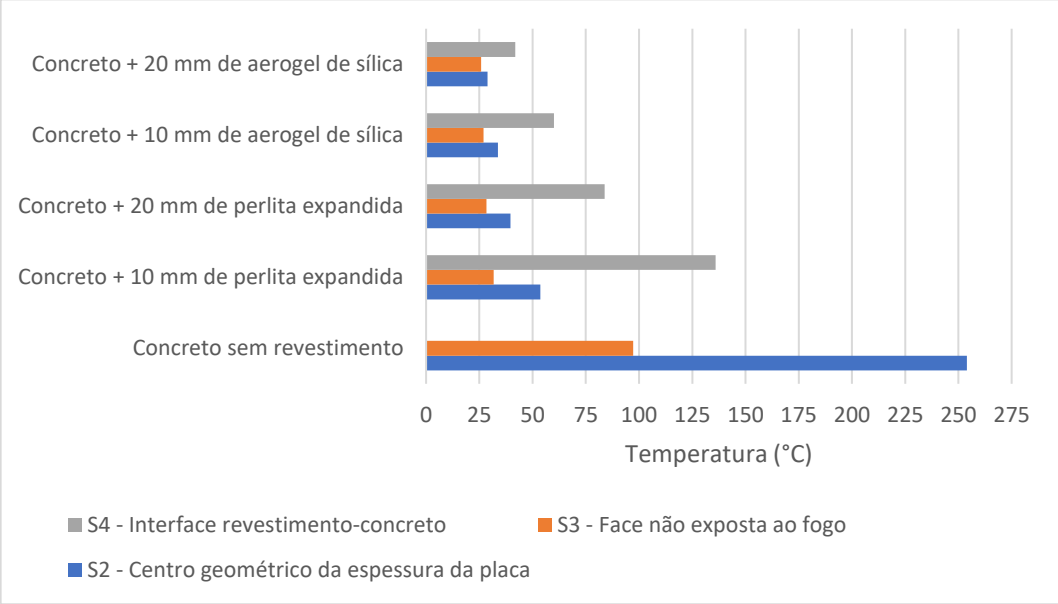
A Tabela 7 e o Gráfico 7 apresentam uma síntese comparativa das temperaturas registradas aos 3.600 s nas diferentes configurações simuladas, permitindo uma avaliação direta da capacidade isolante de cada revestimento. Os valores correspondem aos três pontos de monitoramento mais representativos do comportamento térmico global da placa: o centro da espessura (S2), a face não exposta (S3) e a interface revestimento–concreto (S4). Essa sistematização possibilita visualizar, de maneira integrada, a magnitude da redução do fluxo térmico proporcionada pelos revestimentos, bem como a influência da espessura e do tipo de material isolante sobre o desempenho da placa.

Tabela 7 – Comparação síntese das temperaturas aos 3.600 s para todos os modelos simulados.

Configurações das Placas	Temperatura (°C)		
	S2	S3	S4
Concreto sem revestimento	254	97,3	-
Concreto revestido com 10 mm de perlita expandida	53,6	31,7	136
Concreto revestido com 20 mm de perlita expandida	39,6	28,3	83,8
Concreto revestido com 10 mm de aerogel de sílica	33,7	27	60,1
Concreto revestido com 20 mm de aerogel de sílica	28,9	25,8	41,9

Fonte: Autoria própria, 2025.

Gráfico 7 – Gráfico comparativo das temperaturas aos 3.600 s para cada configuração simulada.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A introdução dos revestimentos modificou substancialmente a transferência de calor para o interior da placa. A perlita expandida, mesmo com espessura de 10 mm, produziu redução significativa na temperatura da interface revestimento–concreto e nos demais pontos monitorados. Essa atenuação térmica decorre de sua baixa condutividade térmica e elevada porosidade, características amplamente documentadas em estudos experimentais (KOTWICA et al., 2017; ERDOGAN, 2015). Nos resultados obtidos, a interface atingiu aproximadamente metade da temperatura observada na placa sem proteção, e o centro da espessura manteve-se abaixo de 60 °C ao final do ensaio. Esses valores indicam que a perlita atua, efetivamente, como amortecedor térmico, reduzindo o fluxo de calor incidente e retardando sua penetração no concreto.

Já, a ampliação da espessura do revestimento para 20 mm intensificou esse efeito, diminuindo ainda mais o gradiente térmico ao longo da espessura da placa.

A evolução de temperatura no centro do concreto permaneceu quase estacionária, e a face não exposta apresentou elevação mínima, comportamento condizente com investigações que apontam relação quase linear entre espessura de materiais cerâmicos porosos e resistência térmica (FRANSSON; GUSTAVSSON, 2011). Esse desempenho evidencia o potencial da perlita expandida para aplicação como revestimento de proteção passiva, especialmente em elementos de pequena espessura, nos quais atrasos mesmo modestos na propagação térmica podem ser decisivos para a manutenção da integridade estrutural em cenários reais de incêndio.

O aerogel de sílica, por sua vez, apresentou desempenho ainda mais expressivo, coerente com sua reconhecida posição como um dos isolantes térmicos mais eficientes atualmente disponíveis (NOSRATI; BERARDI, 2018). Na espessura de 10 mm, o material foi capaz de manter temperaturas extremamente baixas na interface revestimento–concreto e impedir, quase em sua totalidade, alterações térmicas significativas no centro da espessura e na face oposta. Esse comportamento decorre da nanoestrutura altamente porosa do aerogel, responsável por condutividades térmicas cerca de um terço das observadas na perlita e até cinquenta vezes menores que as do concreto. A espessura de 20 mm potencializou ainda mais essa resposta, resultando em níveis de temperatura quase invariáveis em todo o domínio de concreto.

Do ponto de vista prático, os resultados sugerem que tanto a perlita expandida quanto o aerogel de sílica são alternativas viáveis para mitigação dos efeitos térmicos em elementos estruturais de concreto. Contudo, o aerogel apresenta desempenho muito superior, sobretudo quando se busca atrasar de maneira expressiva o avanço da frente térmica, sendo especialmente promissor em aplicações onde espessuras reduzidas são exigidas — como *retrofit* de estruturas existentes ou proteção de elementos esbeltos.

Apesar da consistência entre as tendências obtidas numericamente e aquelas reportadas na literatura, é imprescindível reconhecer que o modelo adotado representa uma idealização do comportamento real de elementos estruturais expostos ao fogo. A análise restringiu-se ao acoplamento puramente térmico, desconsiderando fenômenos mecânicos e físico-químicos que influenciam de forma decisiva a resposta do concreto em incêndios, tais como fissuração devido a gradientes térmicos, perda de rigidez, expansão diferencial, instabilidade global, *spalling* explosivo e degradação por ciclos sucessivos de aquecimento e resfriamento. Tais mecanismos, frequentemente observados em ensaios de laboratório, podem alterar significativamente o campo térmico, afetar a aderência do revestimento e reduzir a eficiência global da proteção. Assim, embora os resultados apresentados forneçam evidências robustas do potencial dos revestimentos investigados, sua aplicação prática deve ser interpretada à luz dessas limitações, reforçando a necessidade de estudos complementares para avaliar o comportamento acoplado termomecânico em condições reais de incêndio.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nas simulações térmicas permitiram caracterizar, de forma sistemática, o comportamento de placas de concreto submetidas a aquecimento extremo e avaliar a eficácia de diferentes camadas isolantes à base de perlita expandida e aerogel de sílica. A análise do modelo sem revestimento evidenciou a elevada suscetibilidade do concreto à propagação de calor, com temperaturas superiores a 250 °C no centro da espessura e aproximadamente 100 °C na face não exposta após 3.600 s.

A inclusão de revestimentos isolantes modificou substancialmente o regime térmico da placa. As camadas de perlita expandida, nas espessuras avaliadas, reduziram de maneira significativa o fluxo térmico, retardando o avanço da frente de calor e limitando as temperaturas no concreto estrutural. Já o aerogel de sílica apresentou desempenho ainda mais expressivo, particularmente na espessura de 20 mm, condição na qual o gradiente térmico foi praticamente confinado ao revestimento, preservando o concreto em temperaturas próximas à condição ambiente. Esse comportamento está alinhado às propriedades intrínsecas do material confirmando sua adequação como solução de proteção passiva em cenários de incêndio.

Do ponto de vista de engenharia aplicada, entretanto, é necessário ponderar que o aerogel, apesar de seu desempenho técnico notável, ainda apresenta custo elevado e disponibilidade limitada no mercado brasileiro, fatores que podem restringir sua adoção em larga escala. A perlita expandida, por outro lado, possui ampla oferta, baixo custo e facilidade de aplicação, o que a posiciona como uma alternativa economicamente competitiva para intervenções em obras correntes. Assim, a escolha do revestimento deve considerar não apenas sua eficiência térmica, mas também critérios de viabilidade construtiva, custo-benefício e acessibilidade regional dos materiais.

Contudo, embora o estudo tenha alcançado seus objetivos ao demonstrar a capacidade isolante dos revestimentos e estabelecer relações quantitativas claras entre materiais, espessuras e resposta térmica, algumas limitações devem ser consideradas. As simulações foram conduzidas exclusivamente no domínio térmico e em condições idealizadas de contorno, sem incorporar mecanismos acoplados como fissuração, dilatação diferencial, perda de rigidez, *spalling*, efeitos higrotérmicos ou ciclos térmicos repetitivos. Tais fenômenos, amplamente descritos em incêndios reais, podem alterar de modo significativo o comportamento do concreto e dos sistemas de proteção.

Diante disso, a continuidade da pesquisa é não apenas recomendada, mas fundamental. Estudos futuros incluirão análises termomecânicas acopladas, modelagem de degradação por ciclos térmicos e avaliação do desempenho estrutural residual, de modo a ampliar a aplicabilidade dos resultados e aproximar ainda mais o modelo numérico de situações reais de incêndio. A evolução dos modelos permitirá avaliar, com maior profundidade, os mecanismos de falha e a contribuição efetiva dos revestimentos na integridade estrutural de elementos de concreto sob elevadas temperaturas.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo**. NBR 5628. 2001.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações**. NBR 14432. 2001.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento**. NBR 15200. 2024.

AHMED, A.; KUMAR, A.; ANAND, A. Silica aerogel**:** Synthesis, properties, and applications. Current **Opinion in Chemical Engineering**, v. 35, p. 100739, 2021. Disponível em: https://bit.ly/3Md3BeP. Acesso em: 5 jan. 2025.

AKKAYA, R. Effects of pH, concentration and temperature on radionuclides sorption onto polyhydroxyethyl methacrylate-expanded perlite composite. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 295, p. 351–355, 2013.

ANDOLFATO, R. P. **Controle tecnológico básico do concreto**. Ilha Solteira: UNESP, 2002. Disponível em: https://bit.ly/44AB2yj. Acesso em: 13 maio 2024.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials**. ASTM E119. 2020.

BASTOS, P. S. **Fundamentos do concreto armado**. UNESP, 2006.

BAUER, F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BERARDI, U. A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings. **Energy and Buildings**, v. 75, p. 409–422, 2015. Disponível em: https://bit.ly/4iy1VJ2. Acesso em: 5 jan. 2025.

BOTELHO, M. H. C. **Concreto armado, eu te amo: para arquitetos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

BRENTANO, T. **Instalações hidráulicas de combate a incêndios nas edificações**. 3. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

BROSSET, C. et al. Aerogel thermal conductivity: how measurement methods and data analysis can impact results. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, v. 105, p. 1–16, 2023. Disponível em: https://bit.ly/4omVeLj. Acesso em: 5 jan. 2025.

BS – BRITISH STANDARDS INSTITUTE. **Fire tests on building materials and structures**. BS 476. 2004.

CASTELLOTE, M. et al. **Microstructure:** solid phases. In: Course on Effect of Heat on Concrete. Udine: International Centre for Mechanical Sciences, 2003.

CHEHADE, F. et al. Numerical investigation of the behavior of reinforced concrete slabs under standard fire exposure. **Materials**, v. 14, n. 15, p. 4176, 2021. Disponível em: https://bit.ly/4rC1ykX. Acesso em: 22 jan. 2025.

COELHO, R. S. **Estudo numérico do comportamento de pilares de concreto armado em situação de incêndio**. 2010. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

COSTA, C. N. **Estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

DIAS, W. M. C. Fire safety of reinforced concrete flat slab buildings. **Engineering Structures**, v. 31, n. 3, p. 722–732, 2009. Disponível em: http://bit.ly/3MvHIaI. Acesso em: 22 jan. 2025.

DE OLIVEIRA, C. R.; MORENO JR., A. L. Efeito do fogo nas estruturas de concreto reforçadas com FRP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009, IBRACON. **Anais** [...]. 2009.

DRYSDALE, D**. An introduction to fire dynamics**. 3. ed. Chichester: Wiley, 2011.

ERDOGAN, S. T. Properties of ground perlite geopolymer mortars. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, 2015.

ERDOGAN, Y. S.; SAĞLAM, A. R. The use of expanded perlite in building materials. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 257–262, 2015. Disponível em: https://bit.ly/4orwy4b. Acesso em: 26 nov. 2024.

FERREIRA, L. H. **Análise de risco de incêndio em edificações históricas**. UFOP, 2019.

GARCIA, J. J. **Aerogéis de sílica: propriedades, síntese e aplicações em materiais de construção**. 2020. Dissertação (Mestrado) – UFRGS. Disponível em: https://bit.ly/48w1PND. Acesso em: 5 jan. 2025.

GOUVEIA, A. M. C. **Análise de risco de incêndio em sítios históricos**. IPHAN, Brasília, 2006.

GUSTAVSSON, L.; FRANSSON, J. Thermal contact resistance at interfaces in layered materials subjected to fire exposure. **Fire and Materials**, 2011.

HEYDARTAEMEH, M. R. et al. $FeCl_2$/$FeCl_3$ perlite nanoparticles as a novel magnetic material for adsorption of green malachite dye**. Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, p. 3383–3392, 2014.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Fire-resistance tests — Elements of building construction**. ISO 834. 2019.

IT – INSTRUÇÃO TÉCNICA. CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Conceitos básicos de segurança contra incêndio**. IT 02. São Paulo, 2025.

IT – INSTRUÇÃO TÉCNICA. CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Terminologia de segurança contra incêndio**. IT 03. São Paulo, 2025.

IT – INSTRUÇÃO TÉCNICA. CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resistência ao fogo dos elementos de construção**. IT 08. São Paulo, 2025.

IT – INSTRUÇÃO TÉCNICA. CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Compartimentação horizontal e vertical**. IT 09. São Paulo, 2025.

JIN, H. et al. Recent advances in silica aerogels for thermal insulation: synthesis strategies and applications**. Journal of Sol-Gel Science and Technology**, v. 103, p. 415–432, 2022. Disponível em: https://bit.ly/4orrHQy. Acesso em: 5 jan. 2025.

KALIKOSKI, R. R. **Aerogéis híbridos de sílica e suas possíveis aplicações para isolamento térmico**. Porto Alegre: UFRGS, 2020. Disponível em: https://bit.ly/4pLlwYJ. Acesso em: 5 jan. 2025.

KONG, X. et al. Building energy storage panel based on paraffin/expanded perlite: preparation and thermal performance study. **Materials**, v. 9, p. 70, 2016.

KOTWICA, L. et al. Utilization of waste expanded perlite as new effective supplementary cementitious material. **Journal of Cleaner Production**, 2016.

MALHOTRA, H. L. **Design of fire-resisting structures**. New York: Surrey University Press, 1982.

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil**: causas e soluções para danos e prejuízos em obras. São Paulo: Pini, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994.

MOREIRA, P. E. R. **Reação ao fogo dos materiais e tempo de escape em centros comerciais no Brasil**. Ouro Preto: UFOP, 2002.

NOSRATI, A.; BERARDI, U. Hygrothermal performance of aerogel-enhanced insulation materials. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 158–174, 2018. Disponível em: http://bit.ly/4pKyy8W. Acesso em: 22 jan. 2025.

PÉREZ, M. A. et al. Lightweight mortars with expanded perlite for passive fire protection. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102923, 2021. Disponível em: http://bit.ly/44vgO98. Acesso em: 26 nov. 2024.

RIGOBELLO, R. et al. Numerical modeling of reinforced concrete columns under fire**. Fire Safety Journal**, v. 45, n. 2, p. 89–102, 2010. Disponível em: https://bit.ly/4ajwaBh. Acesso em: 22 jan. 2025.

RODRIGUEZ, J. et al. Modification and characterization of natural aluminosilicates, expanded perlite, and its application to immobilize α-amylase from A. oryzae**. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**, 2017.

SEITO, A. I. et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SILBER, A. et al. Zinc adsorption by perlite: Effects of pH, strength, temperature, and pre-use as growth substrate. **Geoderma**, v. 170, p. 159–167, 2012.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**: conforme ABNT NBR 15200:2012. São Paulo: Blucher, 2012.

SOUSA JÚNIOR, T. F. **Estruturas de concreto armado**. Disponível em: https://bit.ly/440IXVp. Acesso em: 13 maio 2024.

TORAB-MOSTAEDI, M. et al**.** Removal of cadmium and nickel from aqueous solution using expanded perlite. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 27, p. 299–308, 2010.

USP. **Ação térmica em situação de incêndio**. Disponível em: https://bit.ly/48bzUDF. Acesso em: 29 maio 2024.

VIEIRA, A.; VIDAL, V. V. **Características residuais do concreto armado após incêndio**. CBMSC, 2015.

WANG, X. et al**.** Enhanced visible light photocatalytic activity of a floating photocatalyst based on B–N-codoped TiO_2 grafted on expanded perlite. **RSC Advances**, v. 5, p. 41385–41392, 2015.

ZHANG, J. et al. Silica aerogels for thermal insulation: recent developments and challenges. **Materials Today Sustainability**, v. 20, p. 100220, 2023. Disponível em: https://bit.ly/49K6LR9. Acesso em: 5 jan. 2025.