

PUCRS / ESCOLA POLITÉCNICA / ENGENHARIA CIVIL

TCC 2024/2

**ANÁLISE DO TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES
SEM FUNÇÃO ESTRUTURAL, ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

Autora: Trueicy Lizeth Nuñez Soares (trueicy.nunez94@edu.pucrs.br)

Orientador: Prof. Dr. Jacinto Manuel Antunes de Almeida (jacinto.almeida@pucrs.br)

Resumo

De acordo com a Resolução Técnica 02 (CBMRS, 2014), as medidas de segurança contra incêndios são classificadas em passivas, que funcionam sem necessidade de ação inicial, e ativas, que requerem intervenção direta. Este estudo tem como objetivo principal analisar e avaliar o Tempo de Resistência ao Fogo (TRF) considerando o critério de isolamento térmico da NBR 10636 (ABNT, 2022) para paredes sem função estrutural, de concreto e blocos cerâmicos, utilizadas na proteção passiva de compartimentação, quando expostas a altas temperaturas, utilizando a modelagem computacional pelo método dos elementos finitos e comparar com resultados obtidos em experimentos. Se efetivo, pode auxiliar na estimativa teórica de Tempo de Resistência ao Fogo (TRF), visto que o resultado obtido através de testes em laboratório acarreta custos elevados. Verificou-se que simulações onde se considerou o calor específico e a condutividade térmica do material com valores fixos tendem a ser mais conservadoras e fornecem uma margem de segurança adicional, mas podem não prever todas as nuances do comportamento térmico real do material. Em contraste, as simulações com propriedades variáveis oferecem uma visão mais detalhada e precisa, mas são mais complexas de modelar e podem exigir uma modelagem em 3D.

Palavras-chave: Segurança contra incêndio, tempo de resistência ao fogo, paredes sem função estrutural, modelagem computacional.

1 INTRODUÇÃO

A prevenção de incêndios tem avançado significativamente ao longo dos anos, seja em termos de pesquisas, tecnologia ou até mesmo na atualização das normas. Embora, infelizmente, muitos desses avanços tenham sido impulsionados por catástrofes, como a da boate Kiss, estes podem ser aproveitados para aprimorar o dimensionamento das proteções, utilizando as diretrizes já estabelecidas.

No Rio Grande do Sul, a determinação de medidas de proteção contra incêndio é regida pelo Decreto nº 51.803, de 10 de setembro de 2014, que regulamenta a Lei Complementar nº 14.376

e suas alterações, para edificações novas, e pela Resolução Técnica nº 05 – Parte 7.2 do Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Sul (CBMRS, 2021), para edificações existentes. Em ambos os casos, as normas listam as proteções necessárias para a edificação, dependendo da área, altura e ocupação.

De acordo com a Resolução Técnica 02 (CBMRS, 2014), as medidas de segurança contra incêndios são classificadas em passivas, que não dependem de ação inicial para funcionar, e as ativas, que requerem intervenção direta. A análise do Decreto nº 51.803 (Rio Grande do Sul, 2014) mostra que para novas edificações, deve ser prevista a proteção passiva de compartimentação vertical quando a área for superior a 750 m² e a altura exceder 12 m. Essa medida de segurança requer a observação do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF). Para edificações existentes, a RT 05 - Parte 7.2 (CBMRS, 2021) apresenta requisitos menos restritivos. Devido às limitações das construções já estabelecidas, o TRRF é exigido apenas nas saídas de emergência. Essa abordagem considera as dificuldades de adaptação das edificações antigas às normas de segurança atuais, focando na proteção das rotas de evacuação.

A RT 02 (CBMRS, 2014) define o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) como o intervalo durante o qual os elementos construtivos de uma edificação devem manter sua resistência ao fogo. De acordo com o Eurocode 6 Parte 1-2 (2005), para determinar esse tempo, é necessário que o elemento construtivo, quando exposto ao incêndio-padrão, mantenha sua capacidade de carga, sem colapsar. Além disso, o elemento deve garantir a estanqueidade, impedindo a passagem de chamas e gases quentes, de modo a evitar a propagação do incêndio para outras áreas. Por fim, é crucial que o elemento limite a transferência de calor para o lado não exposto, assegurando que a temperatura média na superfície não exposta não ultrapasse 140 °C e que o aumento máximo em qualquer ponto dessa superfície não exceda 180 °C.

Por outro lado, a Instrução Técnica (IT) nº 08 do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de São Paulo (CBMSP, 2019), utilizada para a análise do TRRF no Rio Grande do Sul, determina que a comprovação desse tempo deve ser realizada exclusivamente por meio de ensaios de resistência ao fogo em laboratórios, pelo atendimento a tabelas baseadas em ensaios, ou por métodos matemáticos devidamente reconhecidos. Esses métodos matemáticos são amplamente empregados em softwares que realizam simulações computacionais e análises térmicas, como o Mecway v.26, que utiliza uma técnica numérica avançada. Conforme descrito no tutorial do software (2024), o método dos elementos finitos é utilizado para obter respostas aproximadas a problemas físicos, como a análise de um objeto submetido a um fluxo de calor interno e a um fluxo de calor por convecção em sua superfície externa. Este método representa o objeto por

meio de um conjunto de formas simples, denominadas elementos. Cada elemento possui propriedades específicas de material e está conectado aos adjacentes, por meio de nós. Esse conjunto de elementos interconectados é conhecido como malha.

Por fim, este trabalho tem o objetivo de realizar simulações computacionais de paredes em concreto e blocos cerâmicos, utilizadas na proteção passiva de compartimentação, sem função estrutural, através do software Mecway, que utiliza o método dos elementos finitos. Além disso, busca-se determinar o tempo de resistência ao fogo de acordo com os critérios estabelecidos na NBR 10636 (ABNT, 2022) e, por fim, realizar a comparação com os resultados obtidos em ensaios de laboratório, retirados da IT 08 e Eurocode 6. Se comprovada a eficácia, essa abordagem pode auxiliar na estimativa teórica do TRF, apresentando-se como um método mais viável, quando comparado aos testes em laboratório. O escopo do trabalho será limitado a determinadas paredes não estruturais, além de considerar autores selecionados da literatura e normas de referência específicas, incluindo a IT 08 (CBMSP, 2019).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Critérios de Transmissão de Calor

Para a transferência de calor, normalmente são levados em conta os mecanismos de condução, convecção e radiação. Esse processo pode ser entendido como a movimentação de energia térmica de uma área para outra, devido à diferença de temperatura entre elas. A condução térmica refere-se ao processo pelo qual o calor é transmitido de uma região de alta temperatura para uma região de temperatura mais baixa dentro de um meio. Em materiais sólidos isolantes, essa transferência de calor ocorre através da energia transmitida pelas vibrações da rede molecular (Ribeiro, 2004).

O fenômeno pelo qual o calor é transferido entre as partes em movimento de um fluido ou entre o fluido e superfícies sólidas com diferentes temperaturas é denominado convecção. Ao contrário da convecção e da condução, a radiação térmica não requer a presença de um meio material para se propagar. Esse processo de transferência de calor entre corpos ocorre através da emissão ou absorção de radiações eletromagnéticas. O mecanismo da radiação envolve a emissão de ondas eletromagnéticas por um corpo aquecido, que, ao serem absorvidas por um receptor, convertem-se em energia térmica (Ribeiro, 2004).

O EUROCODE 2 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010) indica os coeficiente de convecção de $0,25\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e de radiação de $0,7$, quando a peça está em contato

com o fogo, e os coeficiente de convecção de $0,25\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e de radiação de $0,4$, quando a face não está exposta diretamente ao fogo.

A análise dos fatores e a identificação das causas que desencadeiam incêndios revelam que cada ocorrência possui suas particularidades (Bernardi et al., 2020). Contudo, para fins de simplificação, no Brasil, adota-se a curva de incêndio-padrão conforme estabelecido pela NBR 15200 (ABNT, 2024). Esta curva é calculada utilizando a equação 1 especificada pela ISO 834 (2014):

$$\theta_g = \theta_o + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

t é o tempo em minutos;

θ_o é a temperatura inicial, em $^{\circ}\text{C}$;

θ_g é a temperatura dos gases, no instante t , em $^{\circ}\text{C}$.

Para o calor específico, a NBR 15200 (ABNT, 2024) determina valores, obtidos através das equações 2, 3, 4 e 5, variando-se a temperatura:

$$c_p(\theta) = 900 \text{ (J/kg } ^{\circ}\text{C)} \text{ para } 20 \text{ } ^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (\text{equação 2})$$

$$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \text{ (J/kg } ^{\circ}\text{C)} \text{ para } 100 \text{ } ^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (\text{equação 3})$$

$$c_p(\theta) = 1\,000 + (\theta - 200)/2 \text{ (J/kg } ^{\circ}\text{C)} \text{ para } 200 \text{ } ^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (\text{equação 4})$$

$$c_p(\theta) = 1\,100 \text{ (J/kg } ^{\circ}\text{C)} \text{ para } 400 \text{ } ^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1\,200 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

θ é a temperatura do concreto, expresso em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Para fins de simplificação, é possível adotar o valor de $1.000 \text{ J/kg.}^{\circ}\text{C}$ para o calor específico, assumindo que a relação entre o calor específico e a temperatura permanece constante.

Os valores de condutividade térmica, expressos em watts por metro e por grau Celsius ($\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$), devem ser obtidos a partir da equação 6, retirada da NBR 15200 (ABNT, 2024):

$$\lambda = 1,36 - 0,136 \frac{\theta_c}{100} + 0,0057 \left(\frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

θ_c é a temperatura do concreto, expresso em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

A NBR 15200 (ABNT, 2024), determina que se pode considerar a relação entre a condutividade térmica do concreto e a temperatura de forma constante. Neste caso, utiliza-se o valor de $1,3 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$.

2.2 Modelagem Térmica de Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos destaca-se por sua habilidade em analisar estruturas extremamente complexas de maneira mais realista. Esse método possibilita a simulação eficiente de variadas configurações geométricas, tipos de carregamentos e condições de contorno, tudo por meio da utilização de recursos computacionais sofisticados. Fundamentado na discretização de uma estrutura em elementos finitos, ele se baseia em propriedades de comportamento previamente determinadas (Lazzari, 2015).

Conforme descreve o manual do software Mecway v.26 (2024), os elementos são ligados por pontos específicos, conhecidos como nós, que são essenciais na definição da geometria do objeto. Adicionalmente, os nós funcionam como pontos de cálculo para as equações que descrevem o comportamento do sistema e possibilitam a aplicação de condições de contorno e cargas. A malha é definida como o conjunto de todos os elementos finitos e nós que segmentam o domínio. No Mecway v.26, pode-se determinar a quantidade de subdivisões a serem realizadas ao longo dos eixos X, Y e Z. Na ausência de seleção de elementos específicos para subdivisão, o software executará a subdivisão em toda a malha. Este método de subdivisão é compatível com diferentes tipos de elementos, tais como elementos lineares (line), triangulares (tri) e quadriláteros (quad), onde a temperatura é interpolada em cada um dos nós ao longo do tempo de modelagem.

A precisão dos resultados é diretamente influenciada pela qualidade da malha. Visto que, malhas finas garantem maior precisão, porém demandam de mais recursos computacionais, enquanto malhas grossas, embora mais rápidas de calcular, apresentam menos precisão (Soriano, 2003).

Soriano (2003) destaca que a utilização de elementos mais sofisticados, juntamente com leis refinadas para a descrição de variáveis desconhecidas, aprimora a representação do modelo matemático. Isso implica que, a sofisticação de cada elemento pode reduzir a complexidade do sistema como um todo. Além disso, Soriano (2003) sublinha que a eficiência abrange a qualidade do próprio elemento, a maneira como foi implementado, as rotinas para a modelagem e resolução do sistema global de equações, e o tratamento dos resultados, visando facilitar a interpretação por parte do usuário. Portanto, a eficiência não se limita apenas ao desempenho computacional, mas também inclui a usabilidade e precisão do modelo.

O manual do software Mecway v.26 (2024) também menciona que a análise térmica transitória proporciona um histórico temporal das variações de temperatura em uma estrutura. Em outras palavras, ela demonstra como a temperatura se altera no interior da estrutura ao longo do tempo.

Nesta análise, é possível estabelecer cargas térmicas dependentes do tempo, definir restrições que limitem a temperatura a valores específicos, e, também, especificar a distribuição inicial de temperatura na estrutura. Isso possibilita simular e analisar a resposta da estrutura a diferentes condições térmicas ao longo do tempo.

2.3 TRF Experimentais da Literatura, IT 08 e Eurocode 6

IT 08 (CBMSP, 2019), estabelece que as propriedades térmicas e o desempenho dos materiais de revestimento contra incêndio devem ser avaliados mediante ensaios realizados em laboratórios, seja nacional ou internacional, que possuam reconhecimento mundial. Cumpre destacar que, além dos ensaios, a IT 08 também admite, para comprovação do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), a utilização de modelos matemáticos devidamente regulamentados.

A tabela 1 apresenta um resumo dos Tempos de Resistência ao Fogo (TRFs) compilados por Almeida (2024), extraídos da Instrução Técnicas 08, do EUROCODE 6, bem como os resultados de ensaios de paredes retirados do Manual de Desempenho da empresa Pauluzzi Produtos Cerâmicos (2017), o qual descreve os modelos de blocos cerâmicos ensaiados, suas dimensões e a espessura dos revestimentos.

Tabela 1: TRF obtidos através de ensaios

Parede (Referência)	Tipo de parede	Espessura bloco (cm)	Revestimento (cm)	TRF (min)
1 (IT08)	Cerâmico maciço (A)	10	sem	90
2 (IT08)	Cerâmico maciço (B)	10	sem	90
3 (IT08)	Cerâmico maciço C)	10	sem	90
4 (IT08)	Cerâmico maciço (C)	10	2x2,5cm	240
5 (IT08)	Bloco de concreto	14x19x39 (30mm)	sem	90
6 (EC2)	Concreto	10	sem	90
8 (EC2)	Concreto	15	sem	180
9 (EC2)	Concreto	17,5	sem	240
10 (Pauluzzi)	Bloco cerâmico	14x19x29	1x3,00cm	180
11 (Pauluzzi)	Bloco cerâmico	19x19x29	2x2,00 cm	240
12 (Pauluzzi)	Bloco cerâmico	14x19x29	2x1,5cm	240

(fonte: Almeida, 2024)

As paredes listadas na Tabela 1 falharam primeiramente no critério de isolamento térmico, o que destaca a importância de analisar esse critério. Embora tenham mantido os outros dois critérios (estabilidade e estanqueidade), a falha no isolamento térmico é crucial, pois é o primeiro a comprometer a segurança em situações de incêndio. A análise detalhada do isolamento térmico é essencial para garantir que as paredes possam efetivamente limitar a transferência de calor e proteger as áreas não expostas ao fogo.

2.4 Trabalhos publicados relacionados ao tema

Foi conduzida uma pesquisa abrangente sobre trabalhos de outros autores que realizaram simulações computacionais para analisar o tempo de resistência ao fogo. A partir dessa pesquisa, foi elaborado um compilado que inclui alguns dos resultados obtidos por Rodovalho e Corrêa (2019), por Bernardi et al. (2020), bem por Almeida (2024). O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 2:

Tabela 2: Resultados de simulações obtidas por Rodovalho e Corrêa (2019), Bernardi et al. (2020) e Almeida (2024)

Tipo	Dimensões (cm)	Revestimento (cm)	TRF teo (min)	Erro (%)
Bloco cerâmico maciço (A)	10	sem	70	-22,22
Bloco cerâmico maciço (B)	10	sem	46	-48,89
Bloco cerâmico maciço (C)	10	sem	89	-1,11
Bloco cerâmico maciço (D)	10	2x2,50	251	4,58
Bloco de concreto	14x19x39 (30mm)	sem	110	12,22
Bloco de concreto	10	sem	96	6,67
Bloco de concreto	15	sem	204	13,33
Bloco de concreto	17,5	sem	239	-0,42
Bloco de concreto vazado	14x19x39	2x1,50	137	14,16
Viga em concreto armado	30x16	sem	60	3,67

(fonte: Autora, 2024)

De forma geral, os resultados obtidos nas simulações foram próximos aos resultados experimentais, o que pode demonstrar a confiabilidade dos modelos utilizados. Por exemplo,

para o bloco cerâmico maciço (D), a diferença entre o tempo teórico de resistência ao fogo (TRF) e o experimental foi de apenas 4,58%, indicando uma boa precisão do modelo.

Vale salientar que os resultados experimentais devem ser superiores aos teóricos para garantir a segurança. Isso é observado, por exemplo, no bloco cerâmico maciço (C), onde o erro foi de -1,11%, indicando que o valor experimental foi maior que o teórico. Essa margem de segurança adicional é essencial para assegurar que as estruturas possam suportar condições reais de uso e eventuais variações não previstas nos modelos teóricos.

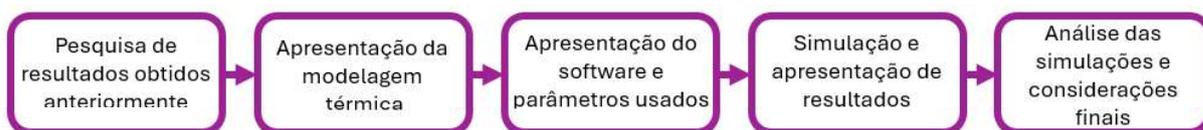
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Método de Pesquisa

O presente trabalho descreve uma pesquisa quantitativa de natureza aplicada, cujo objetivo é exploratório. Investigações foram realizadas em normas nacionais e internacionais, bem como no estudo de autores que realizaram pesquisas similares. Esta pesquisa foi conduzida por meio de análise comparativa realizada a partir de simulações computacionais e resultados empíricos, os quais envolvem uma investigação detalhada e intensiva de situações específicas dentro de um contexto real, possibilitando uma compreensão aprofundada dos fenômenos observados.

O desenvolvimento do trabalho foi estruturado em cinco etapas distintas, conforme ilustrado na figura 1. As etapas são as seguintes:

Figura 1: Fluxograma das etapas do trabalho



(fonte: Autora, 2024)

3.2 Método de Trabalho

Para a execução deste trabalho, foi empregado o software Mecway v.26 com o propósito de desenvolver modelagens das paredes previamente testadas em laboratório, visando a comparação com os resultados obtidos nesses ensaios. As paredes modeladas foram selecionadas com base na IT 08 (2019), bem como do Eurocode 6 (2005). Este procedimento permitiu uma análise detalhada e comparativa entre os dados simulados e os resultados empíricos, assegurando a validação e a precisão das modelagens realizadas.

Foi modelado um bloco de cada uma das paredes escolhidas, incluindo blocos de concreto e blocos cerâmicos maciços, em 2D. Inicialmente, foram adicionados os nós, de acordo com as dimensões de cada bloco, nos eixos x e y. Em seguida, foi criado um elemento do tipo

quadrático, desenhado pela seleção dos quatro nós. A partir desse ponto, foram adicionadas as configurações de análise relacionadas ao transiente térmico. Na janela de configuração, foi selecionado primeiramente o solver de código livre Calculix e, posteriormente, o solver interno do Mecway para fins de comparação. Foi verificado que a alteração de solver não gerou grandes variações nos resultados, portanto utilizou-se o Calculix, visto demandar menos processamento computacional.

Em seguida, foi adicionado o *time period*, que variou para cada parede, utilizando o tempo obtido pelo TRRF ensaiado, com um *time step* de 1 minuto para todas as paredes modeladas. Para as propriedades dos materiais, houve variações. Primeiramente, foram selecionados os valores fixos de calor específico e condutividade térmica, para os blocos de concreto, sendo utilizados 1000 J/kg.°C e 1,3 W/m.°C, respectivamente. Posteriormente, foram utilizados os valores variáveis de acordo com a temperatura, conforme apresentados na Tabela 3, obtidos através das equações contantes na NBR 15200 (ABNT, 2024).

Tabela 3: Condutividade térmica e calor específico do concreto

Temperatura (°C)	Condutividade Térmica W/m°C	Calor específico J/kg°C
20	1,33	900
100	1,23	900
150	1,17	950
200	1,11	1000
250	1,06	1025
300	1,00	1050
350	0,95	1075
400	0,91	1100
450	0,86	1100
500	0,82	1100
550	0,78	1100
600	0,75	1100
650	0,72	1100
700	0,69	1100
750	0,66	1100
800	0,64	1100
850	0,62	1100

(fonte: Autora, 2024)

Nos blocos vazados, as propriedades térmicas do ar foram inicialmente definidas utilizando valores fixos de calor específico e condutividade térmica, sendo 1076 J/kg.°C e 0,3 W/m.°C, respectivamente, conforme consta na tabela 4, para a temperatura de 500 °C. Foram

considerados, também, valores constantes de revestimento, indicados por Santos et al. (2015), sendo 1000 J/kg.°C e 1,15 W/m.°C. Posteriormente, foram aplicados valores variáveis, utilizando-se os mesmos valores de Rodovalho e Corrêa (2019), alterando-se apenas o valor de temperatura inicial de 17 °C, para 20 °C, apresentados na Tabela 4.

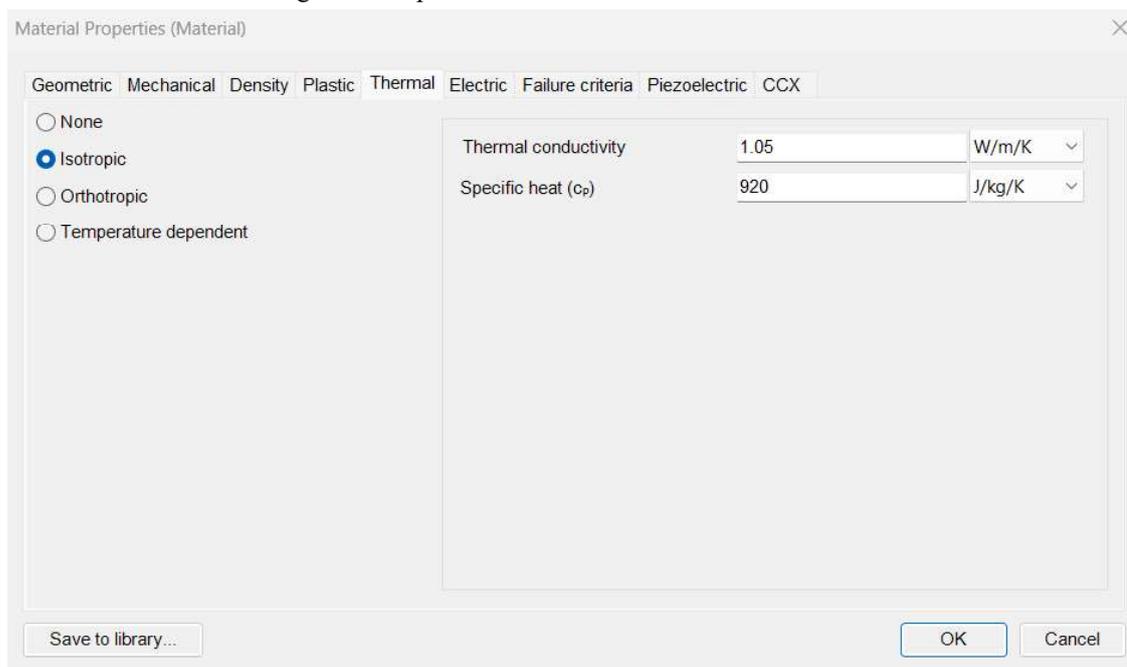
Tabela 4: Condutividade térmica e calor específico do ar

Temperatura T (°C)	Condutividade térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)
20	0,100	1012
60	0,130	1017
80	0,160	1019
100	0,200	1022
200	0,250	1035
300	0,275	1047
400	0,290	1059
500	0,300	1076
1000	0,300	1139
1500	0,300	1139

(fonte: Adaptado de Rodovalho e Corrêa, 2019)

Para os blocos cerâmicos maciços, foram adotados valores fixos de condutividade térmica e calor específico, sendo 1,05 W/m.°C e 920 J/kg.°C, respectivamente, conforme indicado por Santos et al. (2015) e representado na figura 2.

Figura 2: Propriedades cerâmicas utilizadas no software



(fonte: Autora, 2024)

A NBR 14432 (ABNT, 2001) estabelece os critérios de temperatura para o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF). Esta norma determina que um elemento construtivo deve ser capaz de impedir, na face não exposta ao incêndio, incrementos de temperatura superiores a 140°C na média de cinco pontos de medição, localizados na região central da parede, conforme descreve a NBR 10636 (ABNT, 2022), ou superiores a 180°C em qualquer ponto individual de medição. Esses critérios são essenciais para garantir a segurança estrutural e a integridade dos elementos construtivos em situações de incêndio, contribuindo para a proteção das edificações e de seus ocupantes. Optou-se por adotar o segundo critério para as paredes, considerando que, por se tratar de um material monolítico, a modelagem não apresenta variação ao longo dos pontos da face não exposta ao incêndio. Em contrapartida, para a parede vazada de concreto, foi utilizado o critério mais restritivo. Essa escolha se deve à variação de temperatura ao longo dos pontos da face não exposta, causada pela presença do ar nos vazios do bloco. Em todos os modelos desenvolvidos, foi adotada uma temperatura inicial de 20°C. Este valor foi consistentemente aplicado como condição inicial para garantir a uniformidade e a comparabilidade dos resultados obtidos nas diferentes simulações.

4 APLICAÇÃO TEÓRICA

Foram realizadas simulações abrangentes de quatro paredes de blocos de concreto e duas de blocos cerâmicos maciços, sem função estrutural. Para os blocos de concreto, as propriedades

de calor específico e condutividade térmica do material foram alteradas entre fixas e variáveis, conforme a temperatura. A seguir, serão apresentados os detalhes específicos de cada uma das peças modeladas. Para as paredes em concreto armado não foram modeladas as armaduras, visto que este material não influenciaria no tempo de resistência ao fogo quando posicionado no interior do elemento. As modelagens foram feitas em 2D, representando apenas uma faixa do bloco ou parede, desconsiderando-se a argamassa de assentamento.

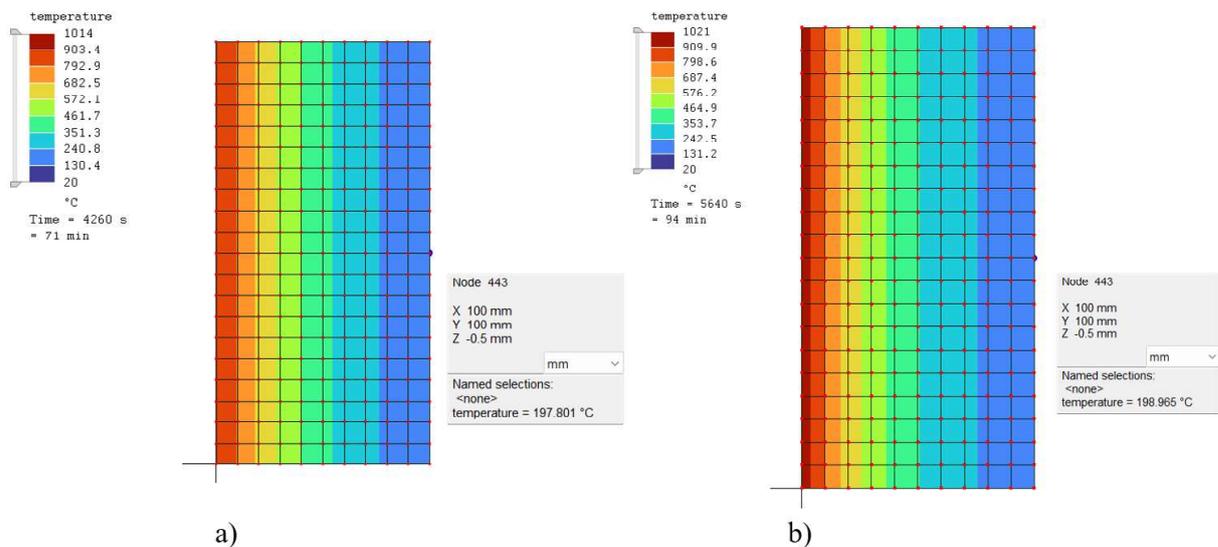
4.1 Paredes modeladas

4.1.1 Parede de concreto armado monolítico, espessura de 10 cm

Foi modelada uma parede de concreto com espessura de 10 cm, com dimensões de 100 x 100 mm, sem revestimento. Os resultados do Tempo de Resistência ao Fogo (TRF) foram extraídos do Eurocode para fins de comparação. Inicialmente, as propriedades do concreto, sendo calor específico e condutividade térmica, foram consideradas fixas e, posteriormente, foram ajustadas para variar de acordo com a temperatura, aplicados com valores constantes na tabela 3. O intuito de realizar a modelagem das duas maneiras é comparar quais resultados se aproximam mais dos obtidos em laboratório.

Para o modelo, foi utilizada uma malha inicial composta por 200 elementos, cada um com dimensões de 10x10 mm. Para fins de comparação, essa malha foi refinada, sendo dividida em duas, resultando em uma nova malha com 800 elementos de 5x5 mm. No entanto, a variação nos resultados entre as duas malhas foi inferior a 5%. Portanto, optou-se por utilizar a malha original de 200 elementos, pois ela demandava menos processamento computacional, resultando em menor tempo. Para a determinação do Tempo de Resistência ao Fogo (TRF), foi adotado o critério de que qualquer ponto da face não exposta ao fogo não deveria ultrapassar a temperatura máxima de 180°C, acrescida da temperatura inicial de 20°C. Esse parâmetro foi aplicado a todas as paredes de concreto, com exceção das paredes vazadas. Após o processamento das duas malhas, verificou-se que o tempo necessário para o modelo atingir uma temperatura imediatamente inferior a 200°C foi de 71 minutos para o modelo com propriedades fixas e de 94 minutos para o modelo com propriedades variando conforme a temperatura, conforme ilustrado na figura 3.

Figura 3: Resultado do processamento da 1ª parede: a) propriedades fixas; b) propriedades variadas;

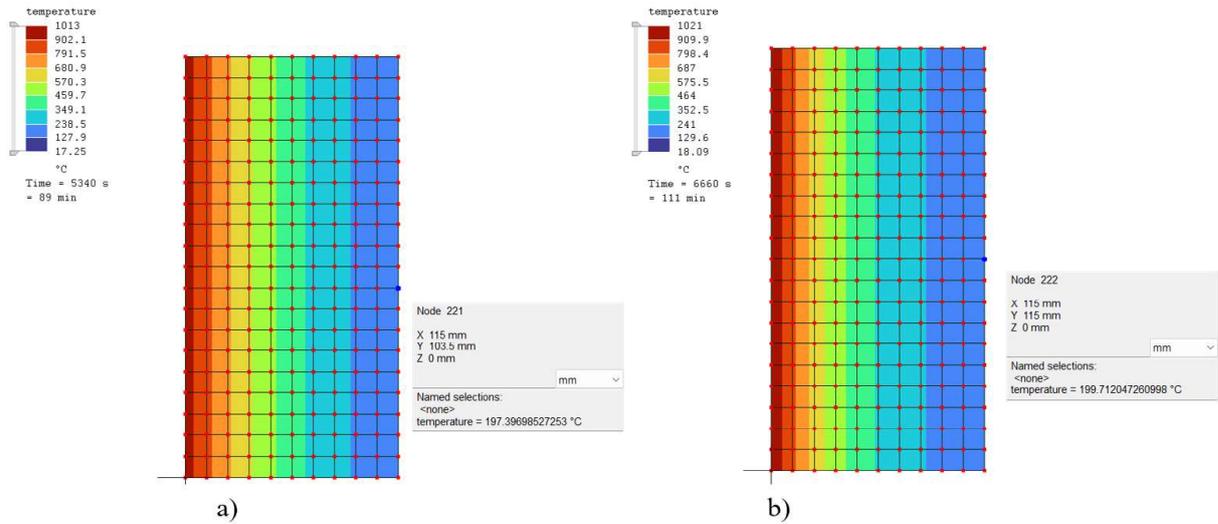


(fonte: Autora, 2024)

4.1.2 Parede de concreto armado monolítico, espessura de 11,50 cm

Posteriormente foi realizada a modelagem de uma parede de concreto, com espessura de 11,50 cm e dimensões de 115 x 230 mm, sem revestimento, utilizando o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) da IT 08, para fins de comparação. Assim como no primeiro modelo, foram realizadas duas simulações, uma com valores de calor específico e condutividade térmica fixas e outra com valores variáveis, para o concreto. A malha utilizada consistiu em 200 elementos com dimensões de 11,5 x 11,5 mm. No final da simulação, verificou-se que o tempo necessário para o modelo atingir uma temperatura imediatamente inferior a 200°C foi de 89 minutos para o modelo com propriedades fixas e de 111 minutos para o modelo com propriedades variando conforme a temperatura, podendo ser observado na figura 4.

Figura 4: Resultado do processamento da 2ª parede: a) propriedades fixas; b) propriedades variadas;

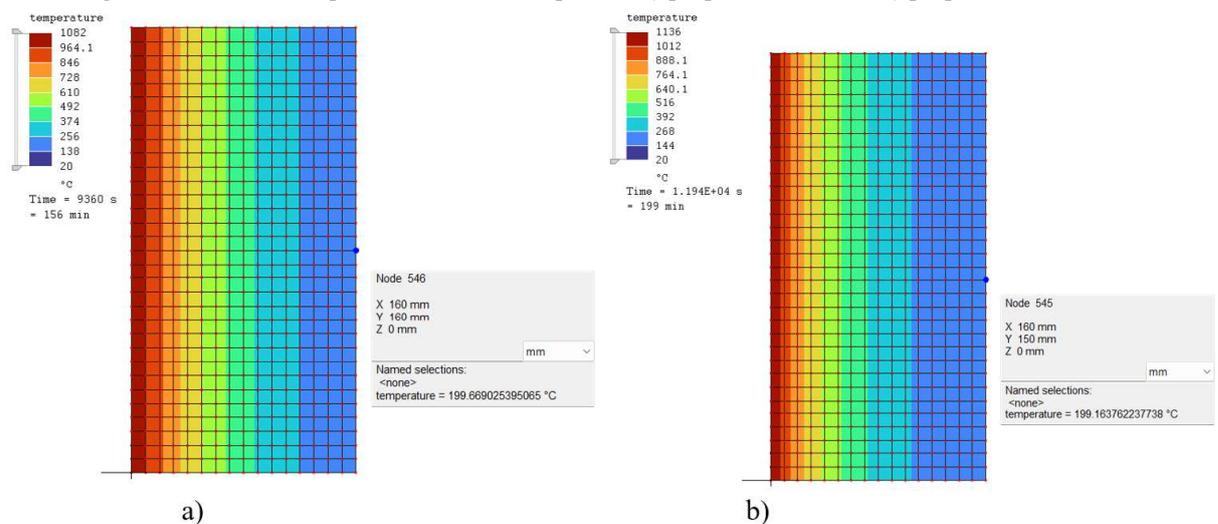


(fonte: Autora, 2024)

4.1.3 Parede de concreto armado monolítico, espessura de 16 cm

A terceira modelagem, também baseada na tabela de blocos ensaiados da IT 08, e simulada com propriedades, sendo calor específico e condutividade térmica, fixas e variáveis conforme a temperatura, tinha 16 cm de espessura e dimensões de 160 x 320 mm. A malha foi refinada de forma a resultar em 512 elementos de 10 x 10 mm. Após o processamento dos modelos, observou-se que o tempo necessário para o modelo atingir uma temperatura ligeiramente inferior a 200°C foi de 156 minutos para o modelo com propriedades fixas e de 199 minutos para o modelo com propriedades variáveis, conforme ilustrado na figura 5.

Figura 5: Resultado do processamento da 3ª parede: a) propriedades fixas; b) propriedades variadas;

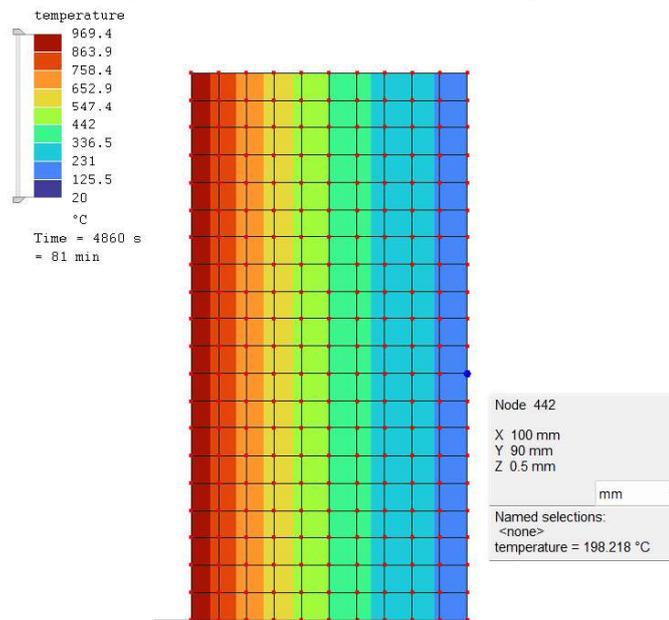


(fonte: Autora, 2024)

4.1.4 Parede de bloco cerâmico maciço, espessura de 10 cm

A IT 08 também apresenta alguns blocos de material cerâmico em sua tabela. Com base nessa instrução técnica, também foram retirados os resultados e especificações para a modelagem da quarta parede, utilizando um bloco cerâmico maciço, sem revestimento e dimensões de 100 x 200 mm. A malha foi dividida em 200 elementos de 10 x 10 mm e, para este modelo, foram utilizados apenas valores simplificados de calor específico e condutividade térmica do material. A ideia na simulação do bloco cerâmico foi modelar dois blocos com as mesmas características, alterando apenas a espessura, e avaliar se o erro das simulações é proporcional ao aumento da espessura. Após a conclusão da simulação, verificou-se que o tempo necessário para o modelo atingir uma temperatura imediatamente inferior a 200°C foi de 81 minutos, conforme ilustrado na figura 6.

Figura 6: Resultado de simulação da 4ª parede

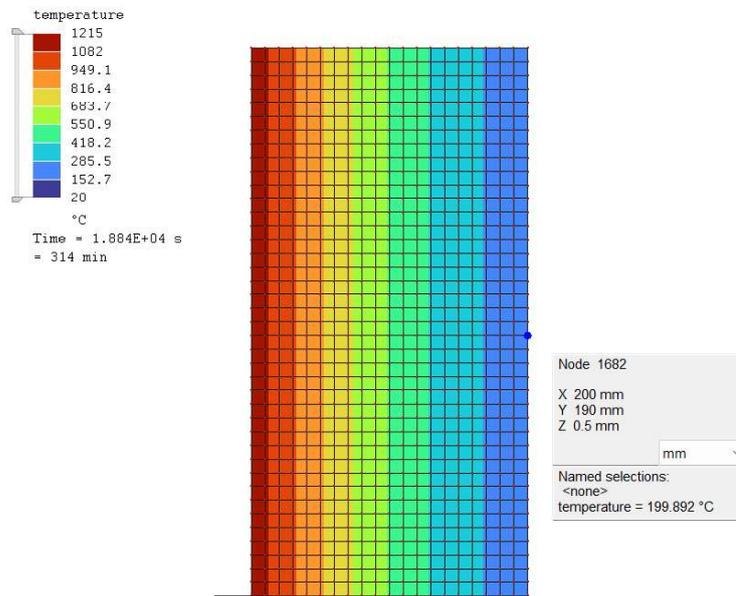


(fonte: Autora, 2024)

4.1.5 Parede de bloco cerâmico maciço, espessura de 20 cm

A quinta parede foi, basicamente, a mesma utilizada na quarta modelagem, com a alteração da espessura para 20 cm, resultando em um bloco com dimensões de 200 x 400 mm. Também, com especificações retiradas da IT 08, realizando-se a simulação, apenas, com valores simplificados para o calor específico e condutividade térmica do material. A malha utilizada consistiu em 800 elementos, cada um com dimensões de 10 x 10 mm. Por fim, o tempo necessário para o modelo atingir uma temperatura imediatamente inferior a 200°C foi de 314 minutos, conforme ilustrado na figura 7.

Figura 7: Resultado da simulação da 5ª parede

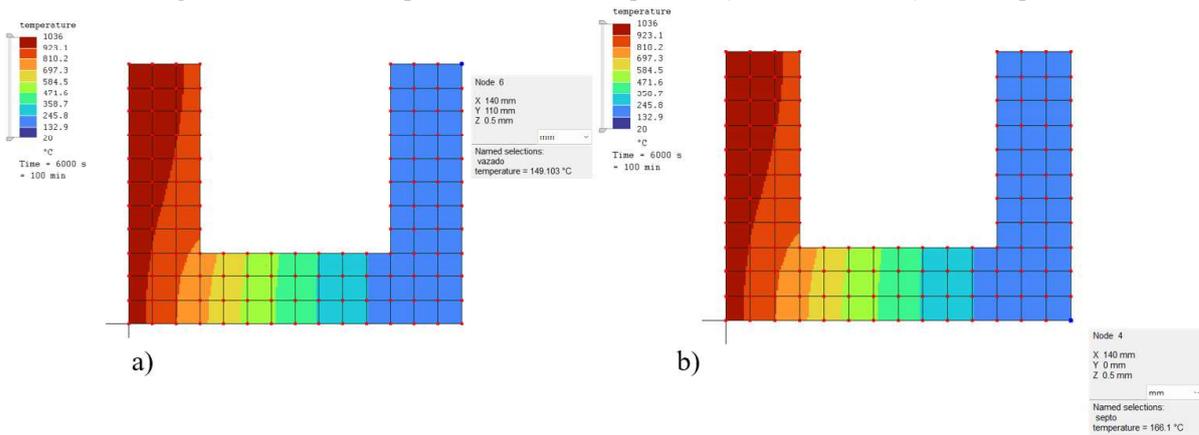


(fonte: Autora, 2024)

4.1.6 Parede de bloco vazado de concreto, espessura de 14 cm (propriedades de calor específico e condutividade térmica fixas)

Retornando para simulações de paredes de concreto, o quinto caso tratou-se de uma seção do bloco, contendo apenas metade do vazado, com dimensões de 140 x 110 mm, com o objetivo de verificar a aproximação com os valores obtidos em ensaios laboratoriais. O Tempo de Resistência ao Fogo (TRF) de referência foi extraído da IT 08. O modelo resultou em dois materiais distintos, com propriedades diferentes, sendo calor específico e condutividade térmica, para o ar e o concreto, sendo utilizados valores fixos para ambos. A parte correspondente ao ar foi representada por uma malha de 64 elementos, enquanto a parte de concreto foi representada por uma malha de 90 elementos, todos com dimensões de 10x10 mm. Para a determinação do TRF, utilizou-se a média entre dois pontos: o ponto mais desfavorável, localizado no septo, e o ponto mais favorável, localizado no vazado. Considerando que a IT 08 não especifica a espessura do septo, foi adotada uma espessura de 3 cm no modelo. Após o processamento, o TRF resultante foi de 100 minutos. A figura 8 ilustra os dois pontos em que foram analisadas as temperaturas.

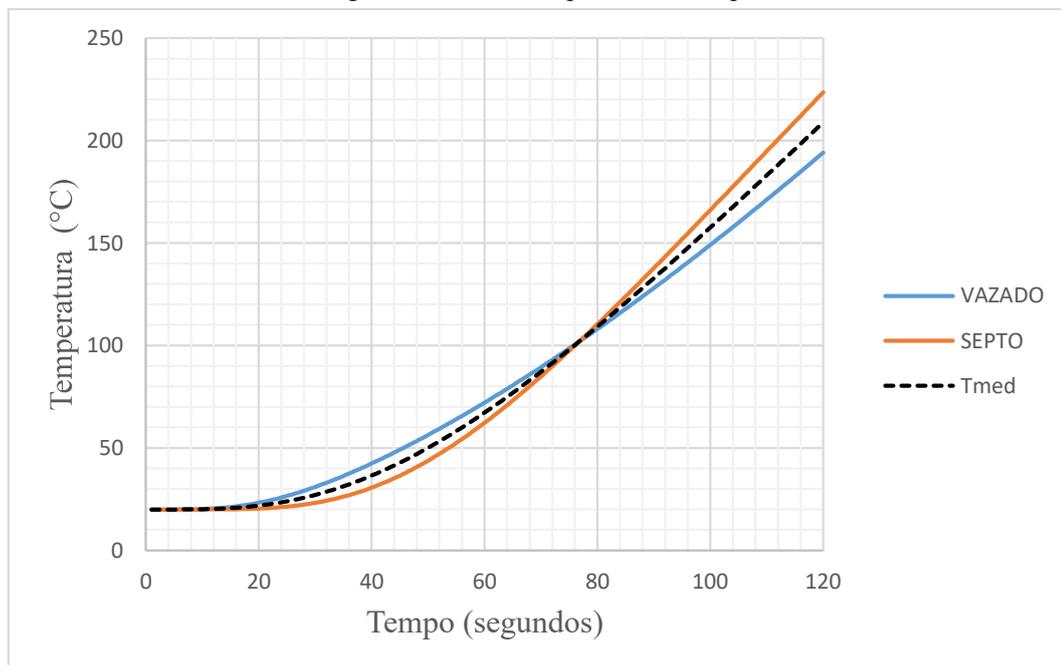
Figura 8: Resultado do processamento da 6ª parede: a) nó do vazado; b) nó do septo;



(fonte: Autora, 2024)

A figura 9 ilustra um gráfico que relaciona Temperatura (°C) e Tempo (segundos). Este gráfico apresenta as curvas de temperatura correspondentes ao septo e ao vazado, bem como a média entre esses dois pontos, tornando melhor a visualização de variação entre os diferentes pontos da face não exposta.

Figura 9: Gráfico Temperatura x Tempo



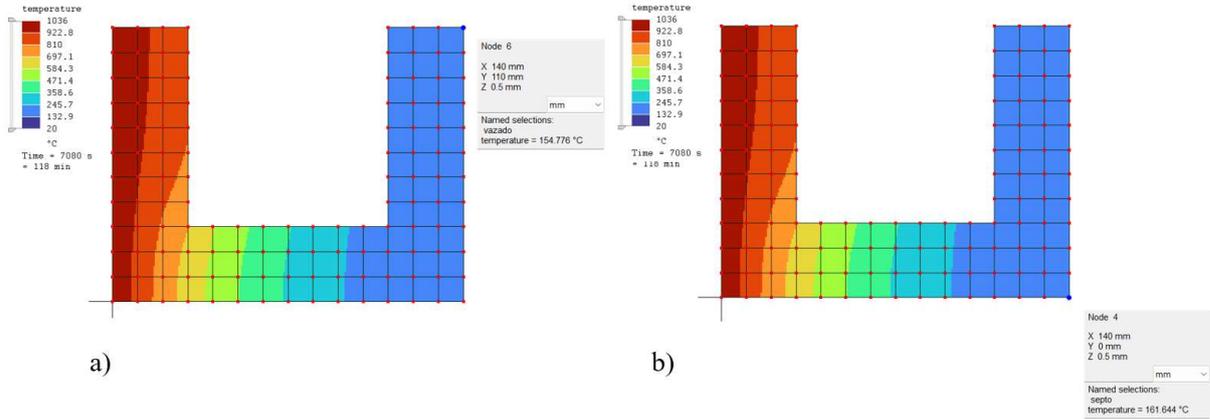
(fonte: Autora, 2024)

4.1.7 Parede de bloco vazado de concreto, espessura de 14 cm (propriedades de calor específico e condutividade térmica variáveis)

A modelagem do bloco de concreto vazado foi replicada, desta vez ajustando as propriedades térmicas, sendo calor específico e condutividade térmica, do ar e do concreto para que variem

conforme a temperatura. Utilizou-se o mesmo critério para a determinação do Tempo de Resistência ao Fogo (TRF), calculando a média entre os pontos de medição no vazado e no septo. Após o processamento dos dados, o TRF resultante foi de 118 minutos. A Figura 10 ilustra os dois pontos específicos onde as temperaturas foram analisadas.

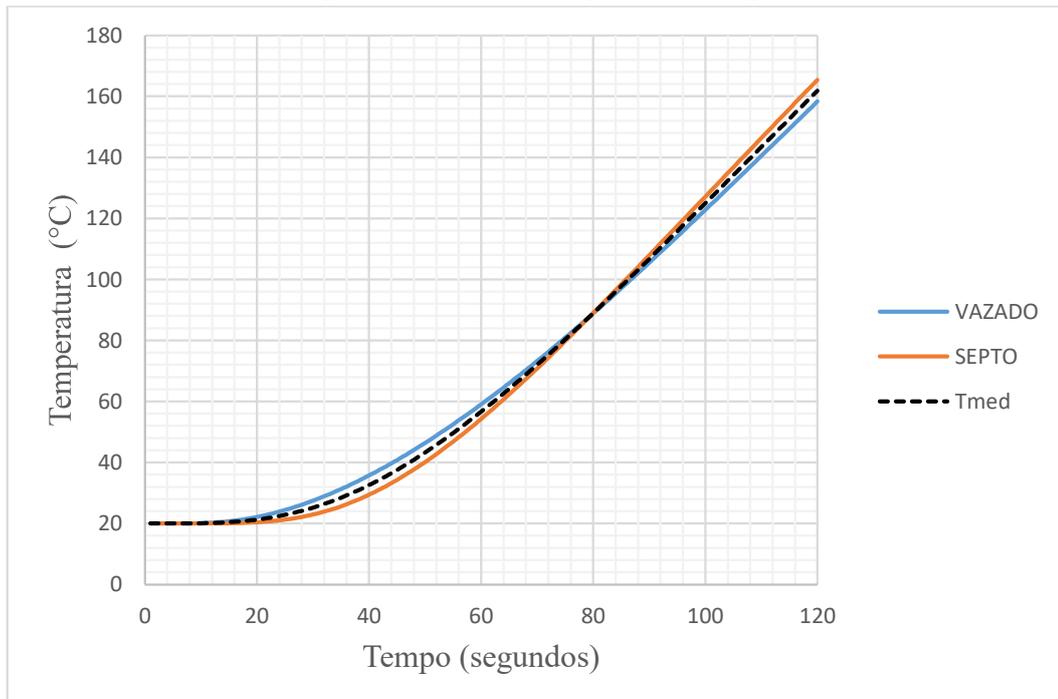
Figura 10: Resultado do processamento da 7ª parede: a) nó do vazado; b) nó do septo;



(fonte: Autora, 2024)

A figura 11 ilustra um gráfico que relaciona Temperatura (°C) e Tempo (segundos). Este gráfico apresenta as curvas de temperatura correspondentes ao septo e ao vazado, bem como a média entre esses dois pontos.

Figura 11: Gráfico de Temperatura x Tempo

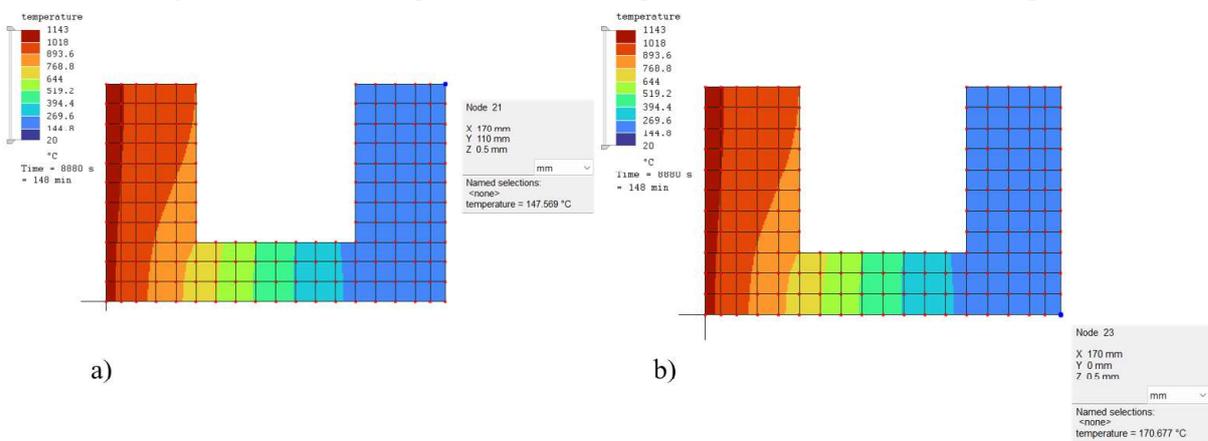


(fonte: Autora, 2024)

4.1.8 Parede de bloco vazado de concreto, com revestimento, espessura de 14 cm (propriedades de calor específico e condutividade térmica fixas)

O bloco de concreto vazado foi replicado, com as mesmas dimensões, com revestimento de argamassa, com espessura de 1,50 cm, e propriedades, sendo calor específico e condutividade térmica, do concreto, ar e revestimento, fixas. Após o processamento dos dados, o TRF resultante foi de 148 minutos, obtido a partir da média dos pontos mais e menos favorável. A Figura 12 ilustra os dois pontos específicos onde as temperaturas foram analisadas.

Figura 12: Resultado do processamento da 8ª parede: a) nó do vazado; b) nó do septo;

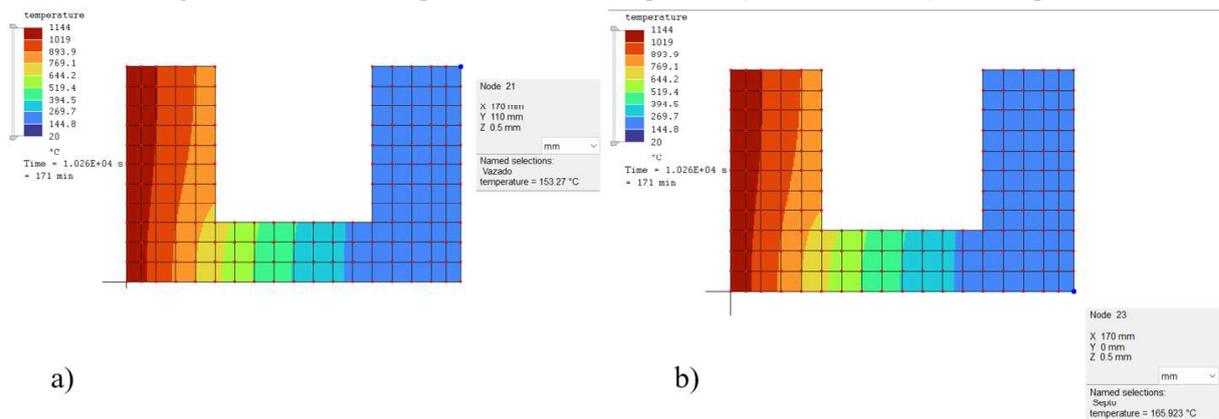


(fonte: Autora, 2024)

4.1.9 Parede de bloco vazado de concreto, com revestimento, espessura de 14 cm (propriedades de calor específico e condutividade térmica variáveis)

Por fim, o bloco de concreto vazado foi replicado, com as mesmas dimensões, agora, com revestimento de argamassa, com espessura de 1,50 cm. A simulação foi realizada alterando-se as propriedades térmicas, sendo calor específico e condutividade térmica, do concreto e do ar dependendo de temperatura. O calor específico e condutividade térmica do revestimento foram preenchidas como contantes. O tempo de resistência foi de 171 minutos, calculados a partir da média dos pontos do septo e vazado. A Figura 13 ilustra os dois pontos específicos onde as temperaturas foram analisadas.

Figura 13: Resultado do processamento da 9ª parede: a) nó do vazado; b) nó do septo;



(fonte: Autora, 2024)

4.2 Resultado e análise

A Tabela 5 fornece um resumo detalhado dos resultados obtidos nas modelagens realizadas, juntamente com os valores de referência extraídos do Eurocode 6 e da IT 08. Esta tabela permite uma comparação clara e concisa entre os dados simulados e os parâmetros normativos estabelecidos, facilitando a análise da conformidade e desempenho dos materiais modelados.

É importante destacar que as paredes de concreto foram modeladas de duas maneiras distintas: uma utilizando valores simplificados de condutividade térmica e calor específico, e outra com valores que variam conforme a temperatura. Os resultados dessas simulações são apresentados na Tabela 5, categorizados como propriedades fixas e propriedades variáveis.

Adicionalmente, vale ressaltar que os tempos de resistência ao fogo obtidos através do software não foram arredondados. Em contraste, os valores apresentados no Eurocode 6 e na IT 08 são arredondados em intervalos de 30 minutos. Essa diferença na apresentação dos dados pode resultar em variações significativas nos comparativos entre os métodos.

Tabela 5: Resultados obtidos

Parede	Espessura (cm)	TRF de referência (minutos)	TRF modelado (minutos)	Δ (%)
Parede de concreto armado monolítico (propriedades fixas)	10	90	71	-21,11%
Parede de concreto armado monolítico (propriedades variáveis)			94	4,44%
Parede de concreto armado monolítico (propriedades fixas)	11,5	90	89	-1,11%
Parede de concreto armado monolítico (propriedades variáveis)			111	23,33%
Parede de concreto armado monolítico (propriedades fixas)	16	180	156	-13,33%
Parede de concreto armado monolítico (propriedades variáveis)			199	10,56%
Parede de Bloco Cerâmico maciço	10	90	81	-10,00%
Parede de Bloco Cerâmico maciço	20	360	314	-12,78%
Parede de Bloco de Concreto vazado(propriedades fixas)	14	90	100	11,11%
Parede de Bloco de Concreto(propriedades variáveis)	14		118	31,11%
Parede de Bloco de Concreto vazado(propriedades fixas) com revestimento de 1,50 cm	14	120	148	23,33%
Parede de Bloco de Concreto(propriedades variáveis) com revestimento de 1,50 cm	14		171	42,50%

(fonte: Autora, 2024)

Avaliando os dados das paredes de concreto, verificou-se que as simulações com condutividade térmica e calor específico fixos tendem a ser mais próximas dos resultados de laboratório, como mostrado na Tabela 5, onde a variação percentual (Δ %) é geralmente menor em comparação com as simulações com propriedades variáveis.

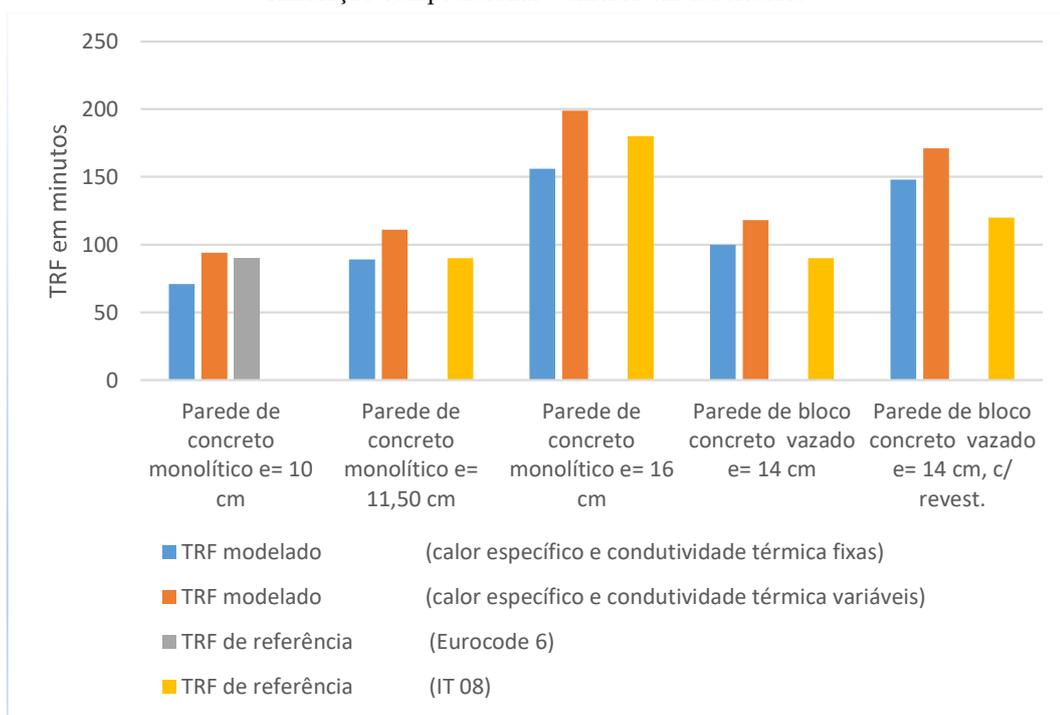
As médias de erro foram de -0,22% para as modelagens com calor específico e condutividade térmica fixos e 22,39% para as modelagens onde foram utilizados os valores de calor específico e condutividade térmica variáveis de acordo com a temperatura, indicando que as modelagens com propriedades fixas são mais conservadoras, apresentando valores menores que os obtidos em laboratório. Ao calcular o erro absoluto, a média das modelagens com calor específico e condutividade térmica fixos é de 14,20%, enquanto as de propriedades variáveis permanecem

as mesmas. Isso confirma que a média de erro é menor para as simulações com propriedades fixas.

Os dados sugerem que as simulações para os blocos cerâmicos são conservadoras, apresentando resultados menores que os obtidos em laboratório. A intenção de simular o mesmo bloco com diferentes espessuras é verificar se o erro das simulações seria proporcional ao aumento da espessura. Observou-se que, embora o erro seja maior para o bloco de maior espessura, os resultados indicam que o erro não foi tão significativo quanto esperado. Isso pode sugerir que blocos mais espessos podem ter diferentes efeitos de borda em comparação com blocos mais finos, o que pode influenciar os resultados das simulações. Em outras palavras, a resposta térmica de um bloco de 20 cm pode ser mais complexa do que simplesmente o dobro da de um bloco de 10 cm.

A figura 14 apresenta um gráfico de barras comparando os resultados obtidos por meio de simulações de software com os resultados experimentais de laboratório, para os casos em que as propriedades térmicas foram variadas. Essa visualização facilita a identificação das diferenças entre os resultados, para o concreto, onde se utilizou os valores do calor específico e condutividade térmica de forma simplificada e com valores variando de acordo com a temperatura.

Figura 14: Paredes de concreto analisadas e resultados do tempo de resistência ao fogo obtidos através de simulação computacional e ensaios em laboratório.



(fonte: Autora, 2024)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, ao analisar os resultados obtidos, considerando que o objetivo deste trabalho é avaliar se as paredes simuladas através do software apresentam valores próximos aos obtidos em ensaios laboratoriais, observa-se que o software pode se tornar um aliado valioso na avaliação teórica do Tempo de Resistência ao Fogo (TRF). Isso é particularmente relevante, visto que os ensaios em laboratório geralmente envolvem custos significativamente mais elevados.

Os resultados deste estudo mostram valores próximos aos obtidos em laboratório, retirados da IT 08 e do Eurocode 6, e aos apresentados em trabalhos publicados por Rodovalho e Corrêa (2019), Bernardi et al. (2020), e Almeida (2024). As simulações com propriedades de condutividade térmica e calor específico fixas tendem a ser mais conservadoras, apresentando resultados menores que os obtidos em laboratório, com uma média de erro de -0,22%. Em contraste, as simulações com propriedades variáveis mostraram uma média de erro de 22,39%, indicando uma maior discrepância em relação aos resultados experimentais.

As simulações com condutividade térmica e calor específico fixos fornecem uma margem de segurança adicional, o que é benéfico para garantir a integridade das paredes. Além disso, esse tipo de modelagem é mais simples e rápida de implementar, economizando tempo e recursos computacionais. No entanto, essas simulações podem não capturar todas as nuances do comportamento térmico real do material, resultando em menor precisão.

Por outro lado, as propriedades térmicas de calor específico e condutividade térmica variáveis podem oferecer uma visão mais detalhada e precisa, especialmente para materiais com comportamento não linear, mas são mais complexas de modelar e podem exigir uma modelagem em 3D.

Para aprimorar a precisão das simulações e obter resultados mais próximos dos valores experimentais, sugere-se realizar simulações com o bloco cerâmico inteiro, em vez de apenas 1/4, ajustando as propriedades conforme a temperatura para capturar melhor a distribuição de calor e tensões. Recomenda-se também a modelagem de mais blocos ensaiados experimentalmente, conforme indicado na Tabela 1 do referencial teórico, para ampliar a base de dados e validar ainda mais os modelos de simulação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10636**: Materiais de construção - Determinação da resistência ao fogo de elementos construtivos. Rio de Janeiro, 2022.

ALMEIDA, Jacinto A.; FILHO, Luiz C. P. S. **Modelagem térmica de paredes não estruturais em situação de incêndio através de uma ferramenta computacional de baixo custo e de fácil utilização**. In: CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO SOBRE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO, 7., 2024, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: CILASCI, 2024.

BERNARDI, Ana Paula; LAZZARI, Bruna Manica; LAZZARI, Paula Manica; FERREIRA, Matheus Wanglon. **Análise termo-estrutural de uma viga em situação de incêndio**. In: **Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**, 2020, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: CBPAT, 2020. 12 p.

European Standard EN 1996-1-2 - **Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design**. 2005. 85 p.

European Standard EN 1992-1-2 - **Design of concrete structures - Part 1-2 General rules - Structural fire design**. 2010. 109 p.

LAZZARI, B. M. **Análise por elementos finitos de peças de concreto armado e protendido sob estados planos de tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015, 171 p.

MEWAY. **Manual Mecway: Finite Element Analysis**. Version 26, 2024. Disponível em: <https://mecway.com/manual.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

PAULUZZI. **Manual Pauluzzi NBR 15575**. Disponível em: https://pauluzzi.com.br/dl/manual_pauluzzi_nbr_15575_download_pdf_03.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024.

RIBEIRO, R. Bruno. **Curso de Método dos Elementos Finitos**. Disponível em: https://www.professores.uff.br/rbrunow/wp-content/uploads/sites/99/2017/08/Curso_MEF1.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024.

RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 51.803, de 10 de setembro de 2014. Regulamenta a Lei Complementar nº 14.376. Atualizado até o Decreto nº 57.393, de 2023, 109 p.

RIO GRANDE DO SUL. Corpo de Bombeiros Militar. Resolução Técnica CBMRS nº 05, Parte 7-2: **Processo de Segurança Contra Incêndio: Edificações e Áreas de Risco de Incêndio Existentes e Edificações e Áreas de Risco de Incêndio Licenciadas pela Lei Complementar nº 14.376/2013**. Versão corrigida. Porto Alegre, 2021, 58 p.

RIO GRANDE DO SUL. Corpo de Bombeiros Militar. Resolução Técnica CBMRS nº 02: **Terminologia Aplicada à Segurança Contra Incêndio**. Porto Alegre, 2014, 25 p.

RODOVALHO, F. S.; CORRÊA, M. R. S. **Thermal simulation of prisms with concrete blocks in a fire situation. Simulação térmica de prismas com blocos de concreto em situação de incêndio**. Revista Brasileira de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 12, 2019, p. 638-657.

SANTOS, Joaquim César Pizzutti dos; KOTHE, Kamila Kappaun; MOHAMAD, Gihad; VAGHETTI, Marcos Alberto Oss; RIZZATTI, Eduardo. **Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para a Zona Bioclimática 2 brasileira**. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM – Departamento de Estruturas e Construção Civil – DECC, Centro de Tecnologia, Santa Maria, RS, 2015, 15 p.

SORIANO, H. L. **Método de elementos finitos em análise de estruturas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 608 p. Colaboração de Silvio de Souza Lima.

SÃO PAULO. Corpo de Bombeiros Militar. Instrução Técnica CBPMESP nº 08: **Segurança Estrutural Contra Incêndio**. São Paulo, 2019, 11 p.