



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ALANA MARIA PRADO

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS DE FACHADA

FORTALEZA
2022

ALANA MARIA PRADO

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS DE FACHADA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P915c Prado, Alana Maria.

Comportamento térmico de argamassas de fachada / Alana Maria Prado. – 2022.
60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos.

1. Argamassas de fachadas. 2. Tensão de origem térmica. 3. Fadiga. 4. Cálculo térmico. I. Título.

CDD 620

ALANA MARIA PRADO

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS DE FACHADA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos

Aprovada em: 21/12/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por todas as incontáveis bênçãos que ele me concedeu até aqui, só Ele esteve presente em todos os meus altos e baixos e sabe dos desafios que me fizeram crescer e ser a pessoa que sou hoje.

Aos meus pais, Patrícia e Wagner, por acreditarem em mim e me darem apoio, por serem pacientes e cuidadosos, por me ensinarem a ter senso crítico e ser independente, por serem exemplo de amor e compaixão.

Ao meu irmão Caio, por sempre ter desejado o melhor para mim, e ao meu cachorro Link por ser o ser mais lindo do universo e minha fonte de alegria diária.

Aos meus avôs, avós, tios, tias, primos e primos, que sempre torceram por mim. Passar minhas férias e meus fins de semana com vocês fizeram muitos dos melhores momentos da minha vida. Agradeço em especial ao meu primo Orian, por ter sido meu melhor amigo durante os dois últimos anos, ter escutado minhas reclamações e reflexões, ter me feito rir com as melhores piadas e ter me feito companhia durante muitos dias solitários, mesmo de longe.

Às minhas eternas amigas, Luiza e Lívia, pela parceria em todos os momentos e por serem fonte de conselhos e risadas durante quase 10 anos, crescer ao lado de vocês foi um privilégio.

Ao meu orientador, Prof. Lucas, por ter me aconselhado e acompanhado durante todo esse ano, por me deixar à vontade para errar e aprender, pelo suporte incansável e por ter sido dedicado e entusiasmado, sempre acreditando que eu seria capaz de fazer melhor.

Ao PET, programa que me fez viver o melhor de mim e me deu os melhores amigos que alguém poderia querer, gente criativa e cheia de vontade de fazer acontecer, sou muito grata por ter tido a companhia de vocês nos que foram os melhores momentos da minha graduação.

Aos integrantes do meu quarteto, Bia, Dan e Gás, que se tornaram família e vou levar para sempre comigo, vocês tornaram essa jornada mais leve.

Ao ReoM, grupo de pesquisa que me acolheu tão bem e me rendeu tantos aprendizados, em especial à Karol, à Camila, à Ingrid e ao Abcael, por terem me dado assistência e ajudado a clarear minha mente nos momentos em que me senti perdida. Agradeço também ao Nicolas, aluno da Eng. da Computação, pela parceria em desenvolver e montar um ensaio totalmente novo.

Ao Prof. Héber e ao Prof. Eduardo, por terem contribuído com o desenvolvimento deste trabalho, sem vocês não teria sido possível.

À UFC, minha universidade, que me enche de orgulho, por ter mudado minha vida e por ser um ambiente com infinitas possibilidades, que me fez conhecer o mundo com outros olhos e me deu oportunidades que nunca sonhei.

“Porque o orgulho é uma coisa estranha, e porque a generosidade merece ser retribuída com generosidade. Mas foi sobretudo por me parecer a coisa certa, e essa é uma razão suficiente”

- Patrick Rothfuss, O Nome do Vento

RESUMO

Na construção civil, são muitas as manifestações patológicas possíveis em uma edificação, particularmente em superfícies argamassadas, tais quais trincas, fissuras, rachaduras e infiltrações. As origens desses danos variam muito, seja pelo uso de materiais de baixa qualidade, excesso de carga, falha na execução ou a ação do clima. Ademais, vale ressaltar que esses danos podem fazer com que os elementos da edificação debilizem suas funções, em alguns casos, colocando em risco a vida de seus usuários, como no de deslocamentos de superfícies argamassadas. Para argamassas de fachada, o clima tem o potencial de deteriorar o desempenho de maneira acelerada. Costuma-se creditar aos efeitos de amplitude térmica e consequentes tensões de origem térmica a deterioração acelerada de fachadas ensolaradas, devido ao fenômeno de fadiga. Porém, não há procedimento estabelecido para avaliar esse risco. Visto isso, este trabalho tem o objetivo de investigar de forma mais aprofundada o comportamento térmico de argamassas em fachadas ensolaradas. Enquanto um cálculo simplificado de fadiga é apresentado a título de justificativa do risco de fadiga térmica (considerando amplitudes térmicas, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica e curva de Wöhler provenientes da literatura), o trabalho foca na medição de amplitudes térmicas em fachadas reais e na validação de um modelo em elementos finitos para o cálculo térmico. Obteve-se uma curva experimental de temperatura da argamassa de fachada em função do tempo, com duração de um dia, na intenção de determinar uma amplitude térmica diária. As amplitudes térmicas medidas em um pano de 50cm por 50cm de superfície argamassada de 2,5cm de espessura foram de cerca de 26°C para fachadas com coloração natural e de 40°C em fachadas mais escuras, medidas essas obtidas em dias ensolarados na cidade de Fortaleza-CE, em muro vertical posicionado a 0°N, no lado oeste do muro. Os resultados do modelo de elementos finitos construído para avaliação do comportamento térmico das fachadas com diferentes níveis de insolação foram comparados com os resultados experimentais, ajustando os parâmetros de coeficiente de troca de calor convectiva e absorvância da superfície (valores em torno de 97,80% para colocações escuras e 10,20% para colorações claras), com resultados satisfatórios. Considerou-se como parâmetros de entrada valores de velocidade do vento, temperatura do ar e de insolação da região de estudo, fornecidos pelo INMET. Desta maneira, apresenta-se um caminho para a estimativa da durabilidade com respeito à fadiga térmica, com 3 passos principais: (i) previsão das amplitudes térmicas em função da cor da superfície argamassada; (ii) realização de ensaios de módulo; (iii) realização de ensaios de fadiga. Este trabalho teve foco no item i.

Palavras-chave: Argamassas de fachadas, Tensão de origem térmica, Fadiga, Cálculo térmico.

ABSTRACT

In civil construction, there are many possible pathological manifestations in a building, particularly on mortar surfaces, such as cracks and infiltrations. The origins of these damages vary widely, either by the use of low-quality materials, overloading, failure in construction or the climate action. Furthermore, it is worth mentioning that those damages can make the elements of the building debilitate their functions, in some cases, putting the lives of its users at risk, as in the case of displacement of mortar surfaces. For façade mortars, weather has the potential to deteriorate performance at an accelerated rate. It is usual to relate the effects of thermal amplitude and consequent thermal stresses with the accelerated deterioration of sunny façades, due to the phenomenon of fatigue. However, there is no established procedure to assess such risk. That said, this work aims to investigate the thermal behavior of mortars on sunny façades. While a simplified calculation of fatigue is presented as a justification of the risk of thermal fatigue (considering thermal amplitudes, modulus of elasticity, coefficient of thermal expansion and Wöhler curve from the literature), the work focuses on the measurement of thermal amplitudes in real facades and the validation of a finite element model for thermal calculation. An experimental temperature curve of the mortar façade as a function of time was obtained, for the duration of one day, aiming at the determination of a daily thermal amplitude. The thermal amplitudes measured on a 50-cm by 50-cm mortar surface, 2.5-cm thick, were approximately 26°C for facades with natural colors and 40°C for darker facades, measurements being obtained on sunny days in the city of Fortaleza-CE, on a vertical wall positioned at 0°N, on the west side of the wall. The results of the finite element model built to evaluate the thermal behavior of façades with different levels of insolation were compared with the experimental results, adjusting the parameters of convective heat exchange coefficient and surface absorbance (values approximately 97.80% for dark colorings and 10.20% for light colorings), with satisfactory results. Values of wind speed, air temperature and insolation in the study region, provided by INMET, were considered as input parameters. That said, a path for estimating durability in regard to thermal fatigue is presented, with 3 main steps: (i) prediction of thermal amplitudes as a function of the color of the mortar surface; (ii) carrying out Young's modulus tests; (iii) carrying out fatigue tests. This work focused on item i.

Keywords: Façade mortars, Thermal stress, Fatigue, Thermal calculation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de revestimento em argamassa.....	12
Figura 2: Desplacamento de revestimento cerâmico.....	13
Figura 3: Módulos de elasticidade tangente e secante indicados em gráfico de Tensão x Deformação (para deformações pequenas a inclinação inicial corresponde ao módulo de elasticidade em zona considerada linear)	15
Figura 4: Percentuais de absorvância para diferentes cores de tinta	18
Figura 5: Curva de Temperatura (°C) x Hora das amostras de tinta	18
Figura 6: Exemplo de Curva de Wöhler	19
Figura 7: Curvas S-N de fadiga linearizadas para argamassa de emboço.....	20
Figura 8: Exemplo de modelagem térmica	21
Figura 9: Dimensões da placa de argamassa: vista frontal (a) e vista lateral (b)	23
Figura 10: Pontos notáveis para a análise	24
Figura 11: Esquema da montagem do ensaio de aferição de temperatura	24
Figura 12: Placas de argamassa para o ensaio de aferição térmica: sem cobrimento (a); cobrimento de tinta acrílica fosca preta (b).....	25
Figura 13: Instrumentação: arduíno (a); módulo micro SD (b)	26
Figura 14: Instrumentação: transmissor (a); fontes conectadas à extensão (b)	26
Figura 15: Esquema da montagem do ensaio.....	27
Figura 16: Ilustração do modelo (a) e dimensões do modelo (b).....	28
Figura 17: Malha de elementos finitos.....	29
Figura 18: Elementos da malha nomeados.....	30
Figura 19: Pontos notáveis para a análise computacional.....	30
Figura 20: Superfícies de atuação das trocas de calor convectivas	32
Figura 21: Variação média da temperatura ambiente e do $h_c \times 0,6$ em 24h.....	33
Figura 22: Esquema da composição vetorial da radiação solar	34
Figura 23: Superfícies de atuação da componente horizontal da radiação solar: superfície vertical da argamassa (a); superfície vertical da alvenaria (b).....	35
Figura 24: Superfícies de atuação da componente vertical da radiação solar	35
Figura 25: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da modelagem e do ensaio para SVP	40
Figura 26: Mapa de calor resultante da simulação térmica para SVP.....	41
Figura 27: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da modelagem e do ensaio para SVSC.....	43
Figura 28: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da modelagem para SVB	45

Figura 29: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados centrais para as 3 superfícies.....	46
Figura 30: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da Análise 1 de “Variação dos percentuais de absorvência”.....	48
Figura 31: Temperatura Máx (°C) x Absorvência para Análise 1 de “Variação dos percentuais de absorvência”.....	48
Figura 32: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da Análise 2 de “Variação do <i>hc furo</i> ”	49
Figura 33: Temperatura Máx (°C) x <i>hc furo</i> (W/m².°C) para Análise 2 de “Variação do <i>hc furo</i> ”	49
Figura 34: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da Análise 3 de “Variação de valores de <i>hc</i> e temp. atmosférica”.....	50
Figura 35: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) para a Análise 3 com foco nos resultados das simulações 2, 4 e 9 + simulação de referência.....	51
Figura 36: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) para a Análise 3 com foco nos resultados das simulações 4, 5 e de referência	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades térmicas da argamassa e da alvenaria cerâmica adotadas neste trabalho para a simulação térmica	28
Tabela 2: Dados de temperatura, velocidade do vento, hc e $hc \times 0,6$	32
Tabela 3: Dados de radiação adotados	36
Tabela 4: Radiação atuante na argamassa	36
Tabela 5: Casos de análise e valores de temperatura, velocidade do vento e hc	37
Tabela 6: Valores de incidência de calor atuante para diferentes porcentagens de absorvância	37
Tabela 7: Dados de entrada das simulações para análise de sensibilidade	38
Tabela 8: Resultados de temperatura ao longo do dia de medição da fachada para SVP por meio de simulação computacional e ensaio de aferição térmica	39
Tabela 9: Resultados de amplitude térmica diária da fachada para SVP	41
Tabela 10: Resultados de temperatura ao longo do dia de medição da fachada para SVSC por meio de simulação computacional e ensaio de aferição térmica	42
Tabela 11: Resultados de amplitude térmica diária da fachada para SVSC	44
Tabela 12: Resultados de temperatura ao longo do dia de medição da fachada para SVB por meio de simulação computacional.....	44
Tabela 13: Resultados de amplitude térmica diária da fachada para SVB.....	46
Tabela 14: Resultados de temperatura no centro da superfície argamassada ao longo do tempo das simulações investigadas na análise de sensibilidade.....	47
Tabela 15: Valores de tensão térmica para módulo de elasticidade de 5,49GPa para os resultados de ΔT obtidos de por meio do modelo computacional e do ensaio de aferição térmica.....	52
Tabela 16: Resultados do cálculo de nº de ciclos de resistência à fadiga considerando ciclos de tração em argamassas para módulo de elasticidade de 5,49GPa	53
Tabela 17: Resultados do cálculo de nº de ciclos de resistência à fadiga considerando ciclos de compressão em argamassas para módulo de elasticidade de 5,49GPa.....	54
Tabela 18: Valores de tensão térmica para módulo de elasticidade de 11,17GPa para os resultados de ΔT obtidos de por meio do modelo computacional e do ensaio de aferição térmica.....	55
Tabela 19: Resultados do cálculo de nº de ciclos de resistência à fadiga considerando ciclos de tração em argamassas para módulo de elasticidade de 11,17GPa	55
Tabela 20: Resultados do cálculo de nº de ciclos de resistência à fadiga considerando ciclos de compressão em argamassas para módulo de elasticidade de 11,17GPa.....	55

SUMÁRIO

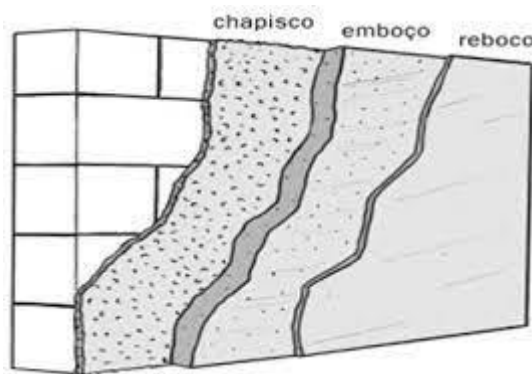
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
2.3 Estrutura da Monografia.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Tensão de origem térmica.....	15
3.1.1 Módulo de elasticidade.....	15
3.1.2 Coeficiente de expansão térmica	17
3.1.3 Variações de temperatura em fachadas	17
3.1.4 Diagrama S-N ou Curva de Wöhler.....	19
3.2 Modelagem do comportamento térmico de materiais.....	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1 Materiais.....	22
4.2 Aferição de temperatura	22
4.3 Simulação de comportamento térmico	27
4.3.1 Criação do modelo geométrico do sistema	28
4.3.2 Dados meteorológicos	30
4.3.2.1 Vento e temperatura → trocas de calor convectivas.....	31
4.3.2.2 Radiação Solar → fluxo de calor	33
4.4 Análise computacional de sensibilidade com variação de diferentes parâmetros	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
5.1 Análise e comparação dos resultados do ensaio de aferição térmica na fachada real com os resultados obtidos por meio da simulação computacional.....	39
5.2 Análise computacional de sensibilidade dos resultados de temperatura com variação de diferentes parâmetros	46
5.3 Cálculo simplificado da tensão de origem térmica e risco de fadiga	52
6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	57
6.1 Conclusões	57
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	58
REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

As fachadas são elementos importantes nos edifícios para a proteção dos sistemas de vedação e estruturais, contribuindo para o conforto térmico e acústico, além do desempenho estético e a proteção do interior da edificação de intempéries do clima (SILVA *et al.*, 2013). As normas nacionais sublinham o cumprimento da função de regulação e ajuste, que abrange requisitos de conforto térmico, iluminação e ventilação (ABNT, 2013). Ao mesmo tempo, é comum o aparecimento de defeitos precoces em argamassas de fachada (BAUER *et al.*, 2020). Diante disso, é essencial que haja uma manutenção frequente desses elementos, visando à conservação da qualidade do seu funcionamento.

Nesse sentido, argamassas de revestimento de fachada são muito comuns, por serem mais baratas e de método construtivo mais popular que outras opções (GASPAR *et al.*, 2005). O revestimento da alvenaria pela argamassa é composto por três camadas, sendo elas o chapisco, o emboço e o reboco (Manual da Argamassa de Revestimento, ABCP, 2002), como esquematizado na Figura 1. As argamassas podem ser definidas como uma mistura à base de aglomerantes, agregados miúdos e água, podendo conter ou não aditivos, e que possui propriedades de aderência e endurecimento (ABNT, 1998).

Figura 1: Esquema de revestimento em argamassa



Fonte: ABCP (2002)

Uma manifestação patológica comum associada a esse tipo de revestimento são as fissuras oriundas de tensões de origem térmica (BALBO, 2000), que podem acarretar inclusive em deslocamentos quando em estágios mais avançados de dano, como os apresentados na Figura 2. Esse problema é associado aos ciclos de aquecimento (que gera tendência de dilatação) e resfriamento (que gera tendência de retração) do material, causados pela exposição das fachadas à radiação solar ou outras fontes de calor. Manifestações patológicas como essa podem significar risco à saúde dos usuários das áreas comuns de edifícios. Assim, faz-se importante não só a frequente inspeção e manutenção de elementos das edificações, como

também o contínuo esforço em entender de forma mais específica as causas dessas manifestações patológicas e desenvolver procedimentos para evitá-las. Porém, não há procedimento estabelecido para avaliar o risco de fadiga térmica.

Figura 2: Deslocamento de revestimento cerâmico



Fonte: AECweb (2019)

1.1 Justificativa

As manifestações patológicas são uma realidade inerente das obras de engenharia. Com o passar do tempo e as ações constantes de elementos da natureza, as edificações passam a apresentar problemas de deterioração (BAUER *et al.*, 2021).

Nesse sentido, em fachadas, o princípio de deterioração é o mesmo, porém, ocorrendo de forma mais acelerada, visto que elas funcionam como um envelope exterior dos edifícios e são submetidas diretamente às ações climáticas de forma intermitente (BAUER *et al.*, 2020). Vale ressaltar que essas ações de degradação potencializam a redução do desempenho ao longo do tempo, reduzindo a vida útil desse elemento (ABNT, 2013) e podendo representar um risco aos usuários.

Na literatura, é comum relacionar os efeitos de amplitude térmica sofrida por fachadas ao longo da sua vida útil, e consequentes tensões de origem térmica, com manifestações patológicas como fissuras e deslocamentos (BAUER *et al.*, 2021). Porém, há pouco estudo sobre as tensões de origem térmica que realmente agem nessas superfícies, não se tendo, inclusive, conhecimento mais aprofundado dos valores das amplitudes térmicas, nem das consequentes tensões, nem dos possíveis efeitos de fadiga (falha por repetição de carregamentos inferiores à resistência estática do material), o que dificulta previsões de desempenho. Sendo assim, este trabalho busca avaliar, por meio de ensaios experimentais e de modelagem, valores realistas de tensão de origem térmica em fachadas sob condições reais de exposição à radiação solar e ao vento, contribuindo assim para a literatura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é investigar o comportamento térmico de argamassas de fachada. Isso envolverá tanto a investigação de propriedades do material (como módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação térmica e resistência mecânica – com revisão de literatura) quanto parâmetros ambientais (temperatura do ar, insolação, e consequentes variações de temperatura nas fachadas de argamassa). No caso do comportamento térmico, o trabalho envolve tanto medições em campo quanto simulações computacionais correspondentes.

2.2 Objetivos específicos

- a) Investigar temperaturas de superfícies argamassadas ensolaradas ao longo do tempo e determinar experimentalmente amplitudes térmicas em argamassas de fachada;
- b) Prever o comportamento térmico de fachadas argamassadas por meio de simulação computacional;

2.3 Estrutura da Monografia

O presente trabalho foi dividido em 6 capítulos, sendo o primeiro de caráter introdutório ao tema e à justificativa do estudo. O 2º capítulo sintetiza os objetivos do projeto, sendo esses os objetivos gerais e específicos, além da estrutura geral da monografia. No 3º capítulo será discutido sobre alguns conceitos importantes para o desenvolvimento do projeto, sendo eles: Tensão de origem térmica, Módulo de elasticidade; Coeficiente de expansão térmica; Diagrama S-N ou Curva de Wöhler; Variações de temperatura em fachadas; Modelagem do comportamento térmico de materiais. Já no capítulo 4, serão apresentados os materiais e métodos que foram utilizados, geometria dos experimentos e simulações, assim como condições de contorno, propriedades térmicas e demais parâmetros de entrada adotados. Por fim, no Capítulo 5, estão descritos os resultados obtidos e, no Capítulo 6, as conclusões do trabalho com algumas sugestões de trabalhos futuros. Ao fim do trabalho é apresentada a relação das referências bibliográficas utilizadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tensão de origem térmica

A tensão de origem térmica ocorre quando um corpo encontra resistência no seu processo de dilatação e retração em situações em que é submetido a mudanças de temperatura (HIBBELER, 2010). Ela pode ser calculada para o caso de impedimento total de deformação por meio da Equação 1.

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

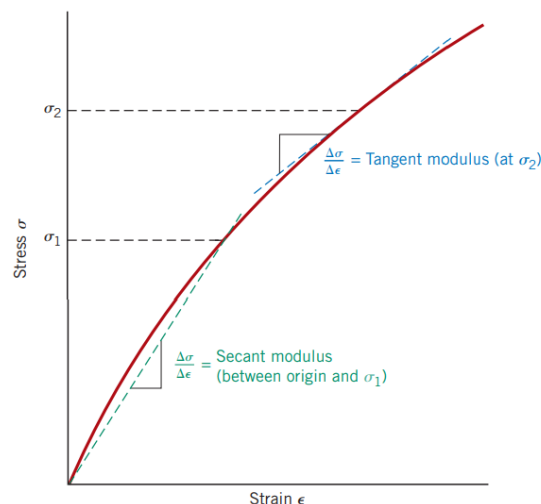
Onde:

- E é o módulo de Young ou módulo de elasticidade do material;
- α é o coeficiente de expansão térmica do material;
- ΔT é a variação da temperatura.

3.1.1 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica dos materiais que possuem comportamento linear elástico, podendo ser entendido como a constante de proporcionalidade entre a tensão aplicada a um corpo e a deformação sofrida por ele (HIBBELER, 2010). Em materiais como concreto e aço, por exemplo, essa proporcionalidade só é constante na porção inicial do gráfico de tensão-deformação, sendo o módulo de elasticidade a inclinação dessa reta (HIBBELER, 2010), como exemplificado na Figura 3.

Figura 3: Módulos de elasticidade tangente e secante indicados em gráfico de Tensão x Deformação (para deformações pequenas a inclinação inicial corresponde ao módulo de elasticidade em zona considerada linear)



Fonte: Callister (2007)

Em 1807 essa constante foi descrita em uma publicação feita por Thomas Young, por isso também é conhecida como *módulo de Young* (HIBBELER, 2010). A magnitude do módulo de elasticidade é intrinsecamente relacionada com a capacidade de um corpo de resistir a deformações, por isso, é um valor essencial para o cálculo de tensões, sejam de origem mecânica ou de origem térmica.

Visto a importância desse dado, são muitas as formas existentes de se obter seu valor. Os ensaios para essa aferição se dividem em dois tipos:

- Ensaios estáticos: são ensaios que medem as deformações para uma dada tensão (ou vice-versa), que podem culminar no rompimento dos corpos de prova. Esses ensaios visam à construção completa da curva tensão-deformação (semelhante à Figura 3), sendo esse gráfico então utilizado para a obtenção do quociente entre a tensão aplicada e a deformação observada para pequenas deformações, ou seja, o módulo de elasticidade (correspondente à inclinação na zona linear). O módulo de elasticidade aparente (correspondente ao módulo secante a uma dada tensão) costuma diminuir com o aumento dos níveis de carregamento, conforme ilustrado na Figura 3.
- Ensaios dinâmicos: são ensaios não destrutivos que envolvem em geral efeitos inerciais (por isso o termo “dinâmico”), normalmente de propagação de ondas, que podem ser feitos mais de uma vez em um mesmo corpo de prova sem danificá-lo, pois os níveis de tensão e de deformação costumam ser muito pequenos. São feitas medidas indiretas, como por exemplo frequências naturais de ressonância ou ainda velocidades de propagação de determinados tipos de onda, que permitem um cálculo do valor do módulo de elasticidade correspondente. Sendo assim, devido à não linearidade do material, os resultados de módulo obtidos pelos ensaios dinâmicos (em pequeníssimas deformações) são costumeiramente maiores que os resultados obtidos pelos métodos estáticos (deformações superiores às dos ensaios dinâmicos).

Em um estudo realizado com diferentes formatos de corpo de prova submetidos a ensaios de módulo de elasticidade estático e dinâmico, foi obtido, para uma amostra cilíndrica de 5cm x 10cm feita com um traço em massa de 1:0,45:7,48 e um fator água/cimento de 1,49, o valor de 8,14GPa para o módulo estático e de 11,17GPa para o módulo dinâmico (NALON *et al.*, 2021). Também nesse estudo, diante da experimentação com diferentes geometrias e diferentes traços, foi possível perceber que os desvios padrão dos resultados obtidos pelo método dinâmico são bem menores que os dos resultados obtidos pelo método estático, ou seja, os ensaios realizados pelo método dinâmico tendem a apresentar resultados mais precisos em

comparação com os resultados de ensaios realizados pelo método estático (NALON *et al.*, 2021). Neste trabalho, para o cálculo de tensões de origem térmica, serão utilizados dois valores de módulo de elasticidade retirado da literatura, um obtido por meio de ensaio dinâmico e igual a 11,17GPa (NALON *et al.*, 2021) e outro obtido por meio de ensaio estático e igual a 5,49GPa (UCHÔA, 2007).

3.1.2 Coeficiente de expansão térmica

O coeficiente de expansão térmica é uma propriedade termofísica dos materiais, e funciona como um parâmetro de proporcionalidade que indica qual será a expansão térmica de um corpo mediante seu comprimento original e a variação de temperatura que ele sofreu (CALLISTER, 2007), conforme Equação 2. Neste trabalho, sempre que necessário para fins de ilustração de cálculos de tensões de origem térmica, será utilizado um valor de coeficiente de expansão térmica de argamassa extraído da literatura e equivalente a $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (UCHÔA, 2007).

$$\Delta L = \alpha \cdot L_i \cdot \Delta T \quad (2)$$

Onde:

- ΔL é a variação do comprimento;
- α é coeficiente de expansão térmica em $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ou $^{\circ}\text{K}^{-1}$;
- L_i é o comprimento inicial do corpo;
- ΔT é a variação da temperatura em $^{\circ}\text{C}$ ou $^{\circ}\text{K}$.
















3.1.3 Variações de temperatura em fachadas

Na construção civil, muitos são os casos em que as mudanças de temperatura geram tensões capazes de causar danos nas estruturas, especialmente trincas. Uma situação comum é, por exemplo, o surgimento de trincas nas ligações entre elementos estruturais e alvenarias. Isso acontece porque as propriedades desses dois materiais são diferentes, fazendo com que o concreto dilate bem mais que a alvenaria.

A temperatura superficial de fachadas pode atingir valores ainda mais altos quando recebem pinturas ou revestimentos cerâmicos de cores escuras. Em um experimento feito com diferentes cores de tinta expostas à radiação solar na cidade de São Carlos-SP (Figura 4), a cor preta apresentou uma absorvância de 97,8%, chegando à temperatura superficial de 90,49°C entre 12h30 e 15h (DORNELLES *et al.*, 2014). Nesse experimento foi possível obter uma nítida curva de temperatura das superfícies ao longo do tempo por meio da aferição com o uso de sensores de alta precisão e medições feitas a intervalos de 1 minuto (Figura 5).

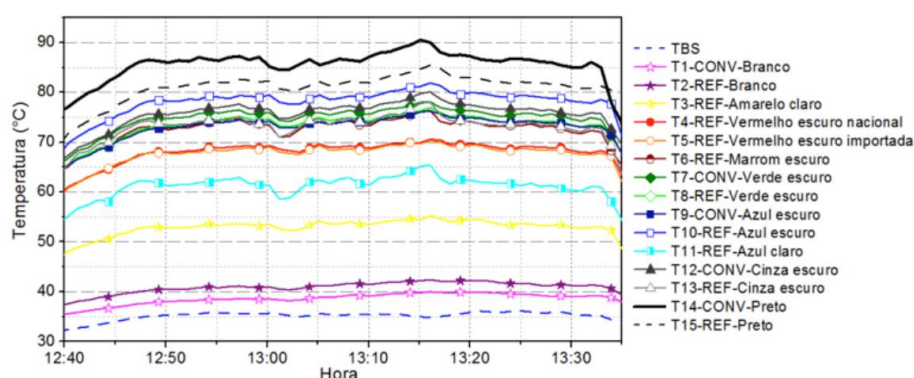
Os valores de absorptância são expressos em porcentagem e representam o quociente entre a taxa de radiação absorvida e a taxa de radiação incidente sobre uma determinada superfície. A Tabela 4 apresenta valores de absorptância de cada tipo de tinta discretizados entre as três principais faixas de frequência da radiação solar (radiação ultravioleta, faixa de luz visível e radiação infravermelho), assim como para a radiação solar total, apresentada na última coluna da tabela, sendo estes os valores a serem utilizados neste trabalho, mais especificamente o valor de 10,20% para o Branco e 97,8% para o Preto.

Figura 4: Percentuais de absorptância para diferentes cores de tinta

Sigla	Tonalidade Aproximada	Cor	Absorptância (%)							
			UV		VIS		IV		TOTAL	
			Espect	Ajust	Espect	Ajust	Espect	Ajust	Espect	Ajust
T1-CONV	Branco		92,2	91,7	10,0	7,6	18,2	9,0	19,4	10,2
T2-REF	Branco		93,2	92,8	11,8	9,4	33,8	20,3	32,0	16,2
T3-REF	Amarelo claro		94,3	94,3	39,3	36,5	38,8	34,2	40,9	36,7
T4-REF	Vermelho escuro		96,8	97,0	85,9	86,0	68,0	68,9	72,3	78,5
T5-REF	Vermelho escuro		98,6	98,8	87,2	87,2	52,0	56,2	60,1	73,4
T6-REF	Marrom escuro		96,7	97,0	93,6	93,7	52,6	64,0	61,6	80,3
T7-CONV	Verde escuro		96,3	96,2	91,2	90,9	79,8	81,6	82,4	86,8
T8-REF	Verde escuro		96,8	97,0	88,7	89,5	74,3	67,5	77,7	79,7
T9-CONV	Azul escuro		95,8	95,7	90,0	90,0	53,9	52,6	61,9	73,2
T10-REF	Azul escuro		96,1	95,8	86,9	87,9	85,9	80,3	86,5	84,7
T11-REF	Azul claro		92,0	91,9	56,3	57,3	68,8	55,5	67,4	57,3
T12-CONV	Cinza escuro		94,0	94,0	71,9	71,2	76,4	71,8	76,2	72,0
T13-REF	Cinza escuro		95,3	95,7	90,6	90,6	43,5	59,9	54,0	76,8
T14-CONV	Preto		97,1	97,2	97,5	97,5	98,7	98,2	98,4	97,8
T15-REF	Preto		98,1	98,4	98,2	98,3	53,7	68,8	63,4	84,9

Fonte: Dornelles (2014)

Figura 5: Curva de Temperatura (°C) x Hora das amostras de tinta



Fonte: Dornelles (2014)

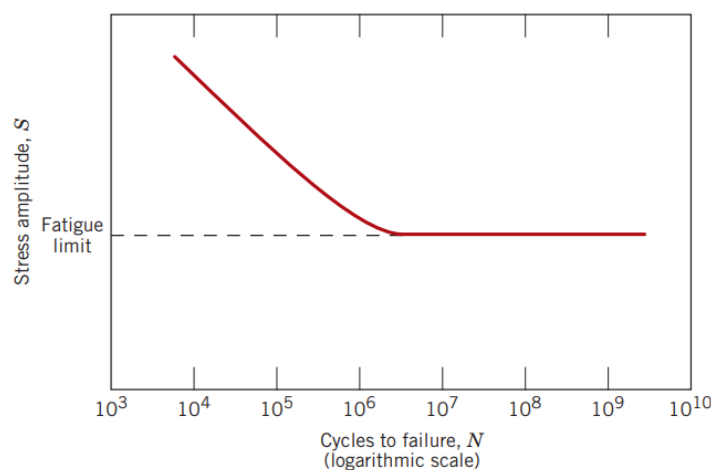
Nesse sentido, tomando como base dados como os expostos no gráfico anterior, é possível notar que a temperatura de superfícies expostas à radiação solar, como é caso das fachadas, pode variar muito ao longo do dia. A amplitude térmica (a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo de temperatura) pode ser consideravelmente alta, especialmente em se tratando de superfícies mais escuras.

3.1.4 Diagrama S-N ou Curva de Wöhler

Muitas vezes, alguns materiais vêm a romper após serem submetidos a carregamentos cíclicos de tensão inferior à sua tensão última. Isso ocorre devido a um acúmulo de dano (microtrincas) que coalescem eventualmente provocando defeitos macroscópicos como trincas. Esse fenômeno recebeu o nome de fadiga e foi investigado por August Wöhler por um período de 12 anos para aço. Suas descobertas foram publicadas em 1870 e, além de identificar a quantidade de ciclos de tensão ao longo do tempo como causadores do colapso, sugeriam a existência de uma tensão limite de resistência à fadiga, limite esse em que o material suportaria milhões de ciclos de uma tensão alternada sem sofrer ruptura (NORTON, 2004). Atualmente, existem pesquisas de fadiga para praticamente todos os tipos de material potencialmente envolvidos em carregamentos cíclicos, incluindo concretos (KACHKOUCH *et al.*, 2022) e argamassas (TOYAMA *et al.*, 2017).

Nesse sentido, o limite de resistência à fadiga é representado em um gráfico de tensão (S) por número de repetição de ciclos até a falha (N), pela tensão tal em que a curva se torna horizontal, que é conhecida como limite de fadiga (Figura 6). Esse diagrama S-N ou Curva de Wöhler, como também é conhecido, possui o eixo das abscissas representado em escala logarítmica para facilitar a visualização, já que a quantidade de ciclos é frequentemente muito grande (HIBBELER, 2010).

Figura 6: Exemplo de Curva de Wöhler

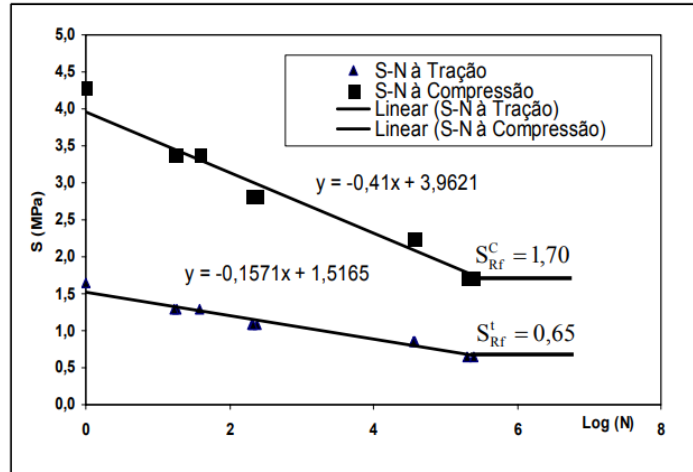


Fonte: Callister (2007)

Assim, para tensões inferiores ao limite de fadiga, adota-se que não há ocorrência de dano relativo à fadiga no material, podendo, nesse sentido, a vida útil do material ser considerada infinita e os danos por fadiga desconsiderados (HIBBELER, 2010). Nos outros casos, é necessário simular a vida de fadiga dos materiais para permitir o dimensionamento das estruturas de maneira que estejam adequadas ao risco de fadiga.

Um estudo de fadiga de argamassa realizado por Uchôa (2007), com amostras de módulo de elasticidade igual a 5,49 GPa, demonstrou que o limite de fadiga para esse material é igual a 0,65 MPa para esforços de tração e 1,70 MPa para esforços de compressão, como ilustrado na figura abaixo (Figura 7).

Figura 7: Curvas S-N de fadiga linearizadas para argamassa de emboço



Fonte: Uchôa (2007)

As curvas no gráfico acima seguem as seguintes regras:

1. Para argamassa sob ciclos de tração:

- Para $N < 2 \times 10^5 \rightarrow S = 1,5163 - 0,157\log(N)$ (3)
- Para $N < 2 \times 10^5 \rightarrow S = 0,65\text{MPa}$

2. Para argamassa sob ciclos de compressão:

- Para $N < 2 \times 10^5 \rightarrow S = 3,9621 - 0,41\log(N)$ (4)
- Para $N < 2 \times 10^5 \rightarrow S = 1,70\text{MPa}$

As equações e o gráfico acima serão utilizados posteriormente neste trabalho para a previsão do risco de fadiga térmica em fachadas ensolaradas de argamassa.

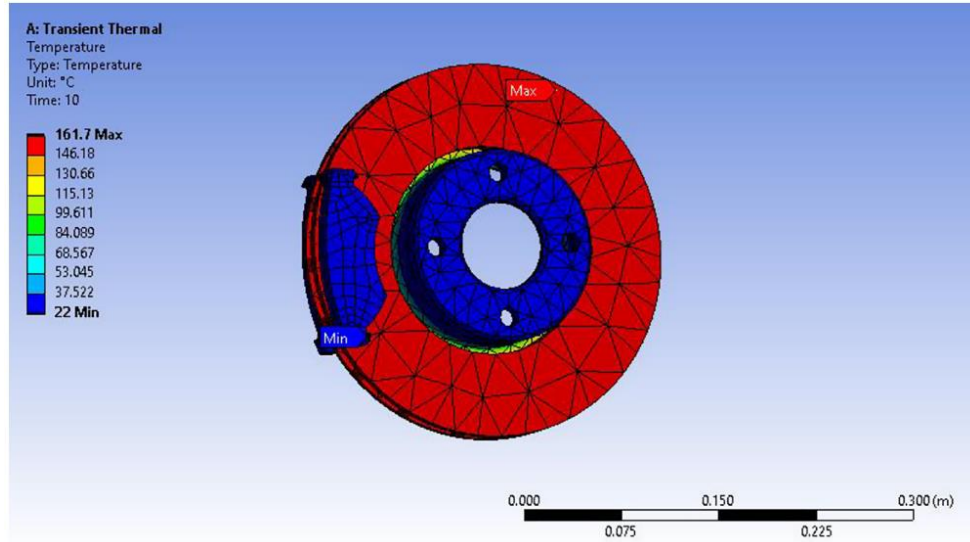
3.2 Modelagem do comportamento térmico de materiais

Para a modelagem de comportamentos de materiais, é muito comum a utilização do método dos elementos finitos (LIU, 2008). Esse método consiste em dividir o objeto em estudo, que em geral possui uma geometria complexa, em pequenas partes de geometria mais simples, de forma que essas partes apresentem um comportamento individual e simplificado (MIRLISENNA, 2016). O conjunto dessas regiões menores é chamado malha.

Atualmente, é grande a disponibilidade de *softwares* de modelagem em elementos finitos. Eles permitem, entre outras coisas, desenvolver análises térmicas para prever evoluções

de temperatura. Neles, é possível fazer modelagens mais detalhadas da geometria dos elementos, assim como alterações de condições de contorno e de propriedades físicas e térmicas do material. A imagem a seguir (Figura 8) é um exemplo de modelagem térmica feita no *software* Ansys.

Figura 8: Exemplo de modelagem térmica



Fonte: Pinca-Bretotean (2021)

Vista a grande disponibilidade de utilizações do método dos elementos finitos atualmente, tem sido cada vez mais recorrente a tentativa de prever o comportamento de elementos quando submetidos a variação de temperatura, seja por meio de condução, convecção, irradiação ou geração de calor (VIEIRA et al., 2020). Em se tratando da modelagem do comportamento térmico de materiais, a distribuição de temperaturas é regida, no interior do sistema, pela equação diferencial de condução de calor (Equação 3) e nas superfícies do sistema pela Lei de Newton de transferência de calor (Equação 4) (HUANG et al., 2018).

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_h = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Onde:

- k é a condutividade térmica do material (W/m.°C);
- Q_h é a geração de calor interna (J/m³.h);
- ρ é a massa específica do material (kg/m³);
- C_p é o calor específico do material (J/kg.°C);
- $\partial T / \partial t$ é a variação da temperatura (°C) com o tempo (s).

$$q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_a) \quad (6)$$

Onde:

- q é o fluxo de calor por área (kJ/m²);
- h_c é o coeficiente de troca de calor convectiva (W/m.°C);
- A é a área de contato (m²);
- T_s é a temperatura na superfície da estrutura (°C);
- T_a é a temperatura ambiente (°C).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessária a utilização de diversos materiais para a execução dos ensaios de aferição de temperatura e obtenção do módulo de elasticidade. Assim, esse capítulo foi estruturado de forma a descrever os materiais escolhidos, bem como a geometria e a instrumentação de cada ensaio. O experimento em campo, particularmente, demandou uma montagem inédita na Universidade Federal do Ceará (UFC) e ainda incomum na literatura.

4.1 Materiais

Neste trabalho, será investigada uma argamassa industrializada da fabricante Votorantim em um ensaio de aferição de temperatura. Além disso, será investigada a capacidade de previsão de uma simulação computacional quanto à previsão de temperatura de argamassas expostas a situações reais de insolação e vento.

4.2 Aferição de temperatura

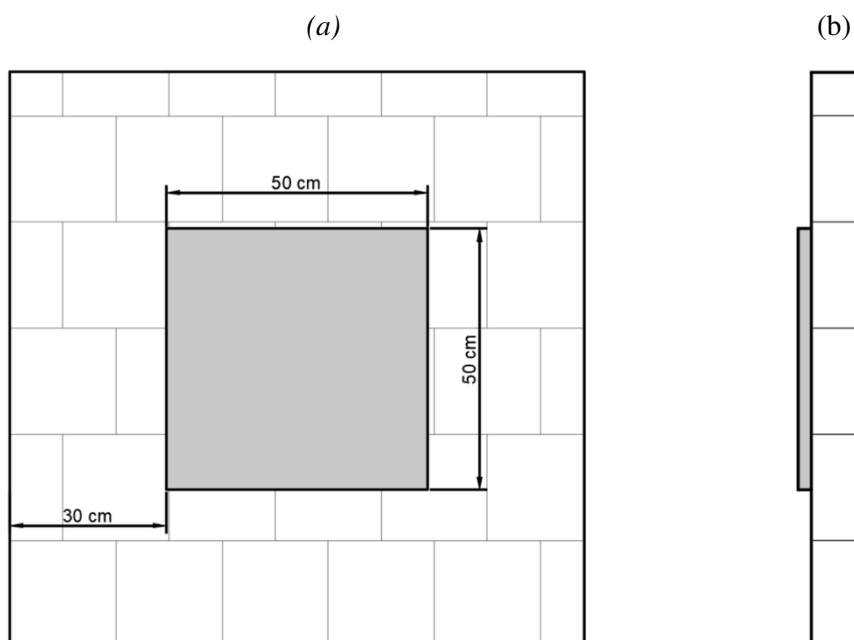
Este ensaio objetiva a obtenção de curvas diárias de temperatura de fachadas de argamassa, estas tendo tamanho reduzido para fins experimentais. Assim, cada etapa do ensaio foi definida como um ciclo de 24h e, para a realização do experimento, foram necessários:

- *Placas de argamassa de revestimento*: foram feitas duas placas quadradas, de 50cm x 50cm, possuindo 2,5cm de espessura, funcionando como revestimento de um muro de tijolos cerâmicos e expostas à radiação solar natural do poente, sendo uma sem cobertura (cor natural) e outra com cobertura de tinta acrílica preta;
- *Termopares*: foram utilizados termopares do tipo T, feitos de fios de (+) Cobre e (-) Constantan, que foram embutidos na camada de argamassa em posições pré-definidas;
- *Transmissores*: foram utilizados para captar e agrupar os valores de temperatura obtidos pelos termopares;

- *Arduíno*: foi programado para obter os dados de temperatura a cada 30 min, e enviá-los para serem armazenados em um cartão micro SD;
- *Módulo leitor de cartão micro SD*: dispositivo que foi acoplado ao Arduíno e tem uma porta adaptada para a inserção de um cartão micro SD, tendo o módulo a função de gravar no cartão os dados recolhidos, para posterior análise e avaliação;
- *Fontes para alimentação dos equipamentos*: tanto o Arduíno quanto os transmissores deverão ser alimentados para o funcionamento, assim, foi necessária a utilização de fontes para cada equipamento, sendo elas ligadas a uma extensão, que, por sua vez, foi ligada a uma tomada próxima ao local do ensaio.

Para o preparo da argamassa, foi utilizada água potável obtida pela Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (Cagece). A água utilizada foi a suficiente para permitir a trabalhabilidade necessária para a construção. Vale ressaltar que, apesar de ser definida na literatura como contendo 3 camadas (Figura 1), neste trabalho a espessura completa da placa de argamassa vai ser definida como uma única camada, sem variação das propriedades térmicas e mecânicas na sua profundidade. Além disso, as placas foram feitas de forma a terem um espaçamento de 30cm ao seu redor, a fim de evitar interferências de outras superfícies no resultado de cada superfície argamassada. A geometria das placas está ilustrada na Figura 9.

Figura 9: Dimensões da placa de argamassa: vista frontal (a) e vista lateral (b)

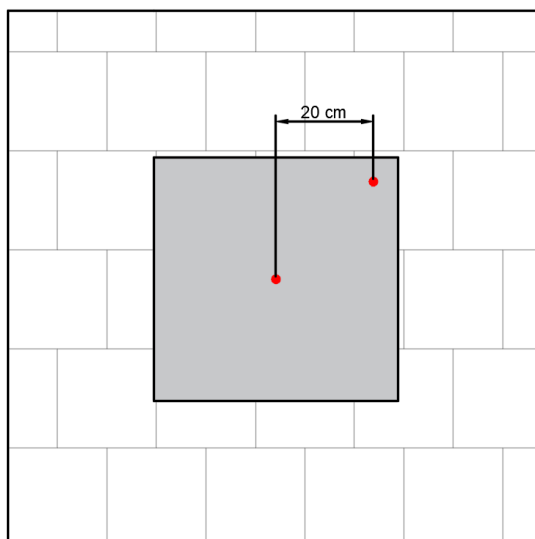


Fonte: a Autora

A fim de obter resultados que permitam um estudo de caso mais esclarecedor, foram colocados termopares em dois pontos das placas de argamassa considerados notáveis para a pesquisa. Esses pontos são o ponto central e um ponto próximo (medido a 5 cm de cada borda)

ao canto superior direito (Figura 10). A profundidade dentro da camada buscada no momento da montagem do experimento foi o centro. Posteriormente neste trabalho, será especificada a metodologia da criação de um modelo computacional em que esses mesmos pontos notáveis serão analisados.

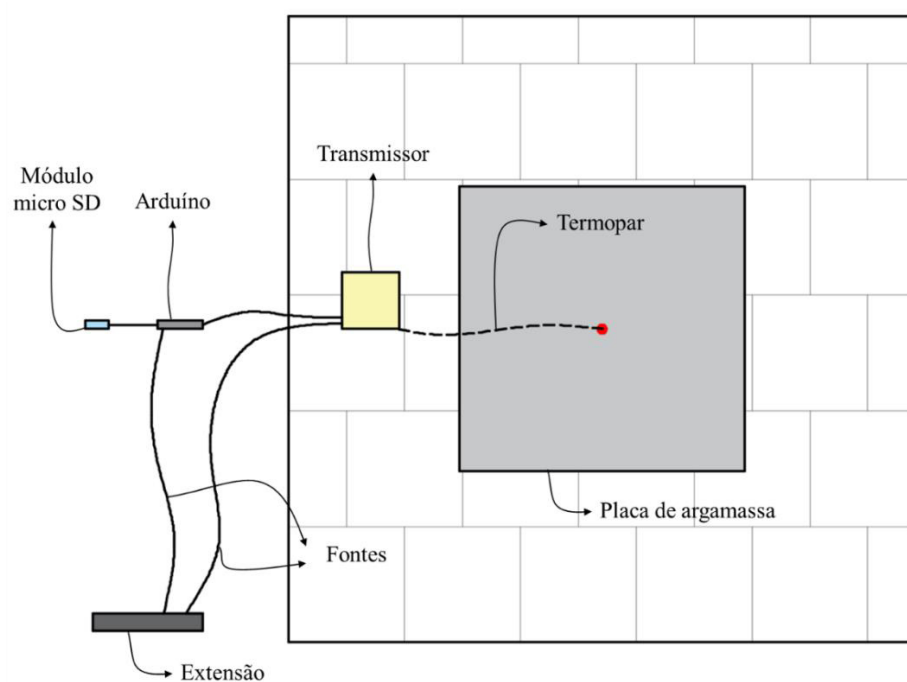
Figura 10: Pontos notáveis para a análise



Fonte: a Autora

Na Figura 11, é possível observar um esquema da montagem do ensaio utilizando o aparato descrito anteriormente. Vale ressaltar que, apesar de no desenho somente estar exemplificada a montagem do ponto central, esta mesma preparação foi feita para o ponto do canto superior direito da placa.

Figura 11: Esquema da montagem do ensaio de aferição de temperatura



Fonte: a Autora

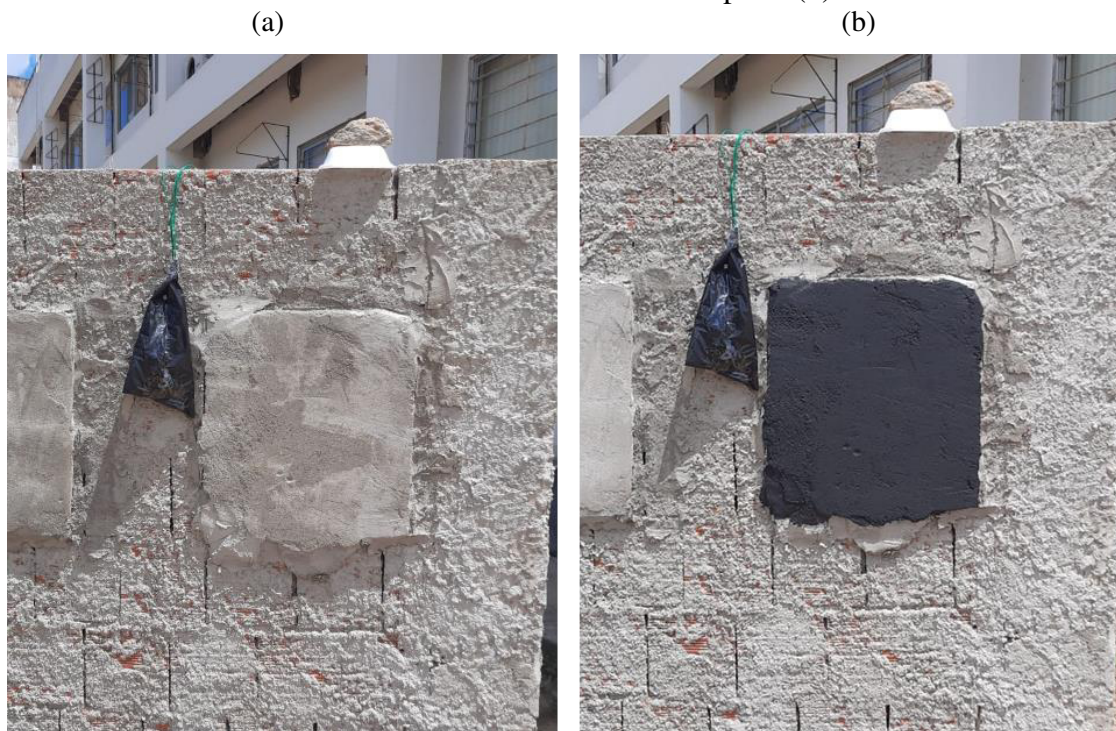
É importante destacar que, para a execução deste ensaio, só haviam disponíveis dois transmissores, cada um podendo recolher dados de apenas um termopar. Dessa forma, o ensaio completo precisou ser realizado em dois dias diferentes (consecutivos e com temperaturas do ar e cobrimentos de nuvens semelhantes), sendo organizado da seguinte forma:

- 1º dia/etapa: aquisição de dados de temperatura dos dois pontos notáveis da placa de argamassa sem cobrimento (cor natural);
- 2º dia/etapa: aquisição de dados de temperatura dos dois pontos notáveis da placa de argamassa pintada com tinta acrílica fosca preta.

Com os dados de temperatura ao longo do tempo em mãos, será possível a criação da curva de *Temperatura (C°) x Tempo (h)*, onde serão identificados os valores mais altos e mais baixos de temperatura, podendo-se então calcular a maior variação térmica sofrida pela argamassa, relevante para as tensões de origem térmica. Igualmente, os dados servirão como base para identificar parâmetros de entrada adequados em um modelo de elementos finitos utilizado para resolver a equação do calor associada ao experimento realizado.

As imagens da realização desse ensaio foram organizadas a seguir. O experimento foi executado nas datas de 09/Dez/2022 e 10/Dez/2022.

Figura 12: Placas de argamassa para o ensaio de aferição térmica: sem cobrimento (a);
cobrimento de tinta acrílica fosca preta (b)



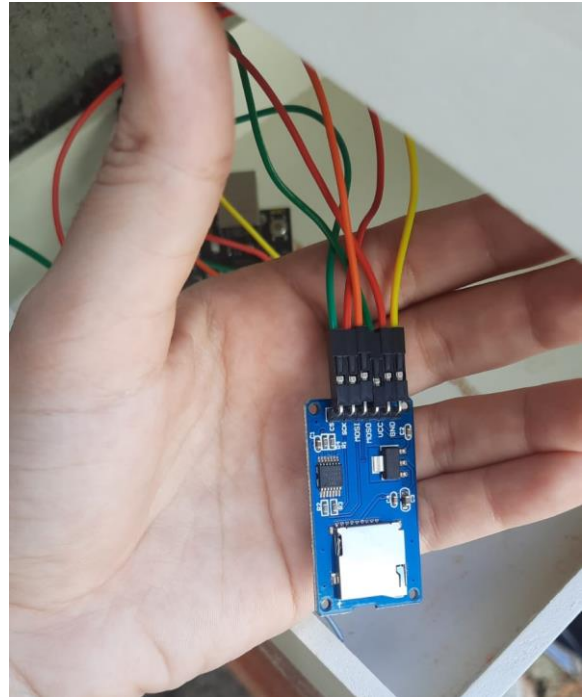
Fonte: a Autora

Figura 13: Instrumentação: arduino (a); módulo micro SD (b)

(a)



(b)



Fonte: a Autora

Figura 14: Instrumentação: transmissor (a); fontes conectadas à extensão (b)

(a)



(b)



Fonte: a Autora

Figura 15: Esquema da montagem do ensaio



Fonte: a Autora

Grande parte da instrumentação do ensaio foi montada do lado não ensolarado do muro para evitar a forte exposição dos equipamentos ao sol. Além disso, todos os equipamentos utilizados no ensaio foram cobertos com caixas ou sacos a fim de protegê-los da chuva e da poeira e evitar danos. Também foi necessário elevar o conjunto arduino + módulo micro SD, visto a limitação da quantidade de cabo disponível para o ensaio.

4.3 Simulação de comportamento térmico

No presente trabalho, além de obter valores experimentais de tensão de origem térmica em argamassas de fachada por meio de ensaios práticos, pretende-se também simular computacionalmente o comportamento térmico de uma placa de argamassa com as mesmas dimensões das utilizadas no ensaio de aferição de temperatura. A ideia é talhar uma ferramenta capaz de futuramente prever o comportamento térmico de outras fachadas.

A simulação térmica do modelo de pano de argamassa foi feita no *software* de elementos finitos Ansys 2022 R2, versão estudantil. A simulação a ser executada é do tipo

“*Transient Thermal*”, que resolve, ao longo do tempo, para o interior do sistema, a equação diferencial da condução de calor e, para as superfícies do sistema, a Lei de Newton de transferência de calor, como explicitado na Seção 3.2 deste trabalho. Para esse tipo de análise, o *software* solicita três propriedades dos materiais envolvidos, sendo elas: massa específica, condutividade térmica e calor específico. Os valores em questão para a argamassa e para a alvenaria de tijolo cerâmico foram escolhidos dentro de faixas plausíveis observadas na literatura e estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades térmicas da argamassa e da alvenaria cerâmica adotadas neste trabalho para a simulação térmica

Propriedades	Argamassa	Alvenaria Cerâmica
Massa específica (kg/m ³)	2100	1400
Condutividade térmica (W/m.°C)	1,15	0,6
Calor específico (J/kg.°C)	1000	835

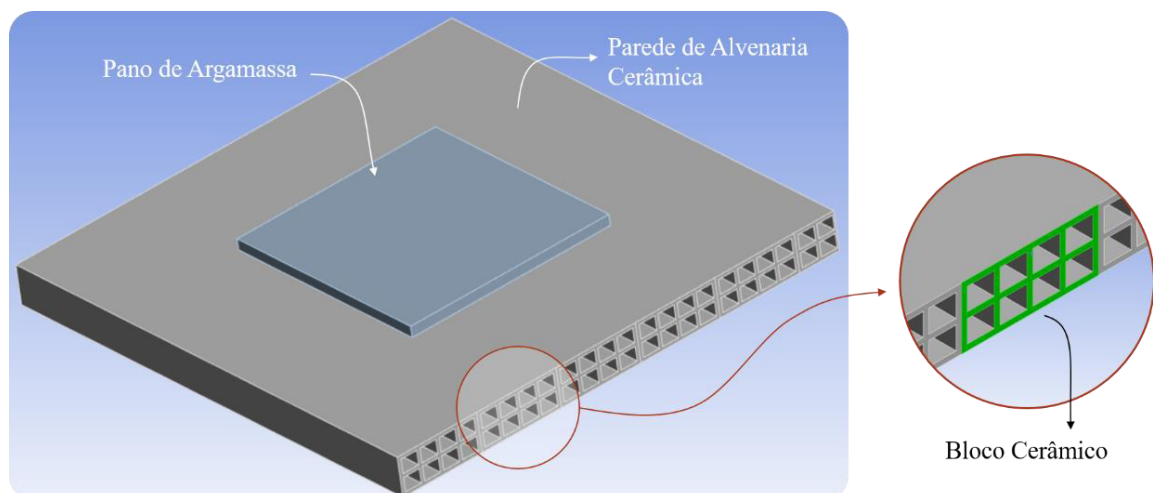
Fonte: a Autora

4.3.1 Criação do modelo geométrico do sistema

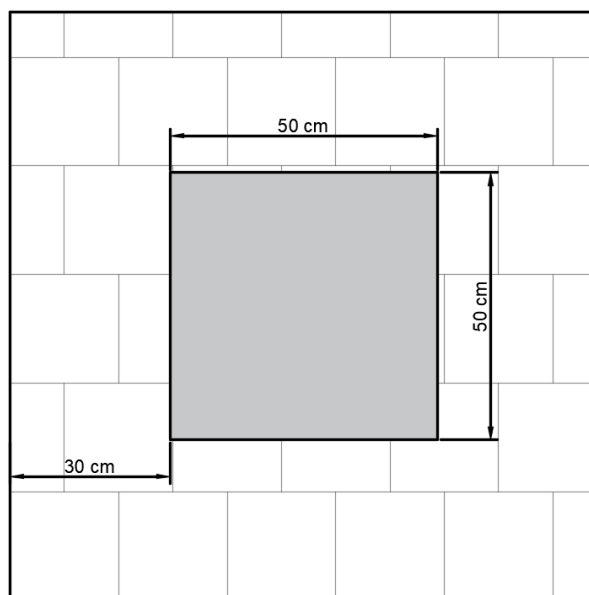
O modelo geométrico do sistema pano de argamassa + parede de alvenaria cerâmica (Figura 16) foi feito no SpaceClaim 2022 R2, programa acessório do Ansys específico para a modelagem de geometrias. O modelo tem a geometria aproximada do objeto de estudo real, tendo o pano de argamassa dimensões de 50cm×50cm×2,5cm e a parede de blocos cerâmicos excedendo em 30cm os limites da argamassa, sendo essa formada por blocos de 19cm×19cm×9cm com 8 furos cada.

Figura 16: Ilustração do modelo (a) e dimensões do modelo (b)

(a)



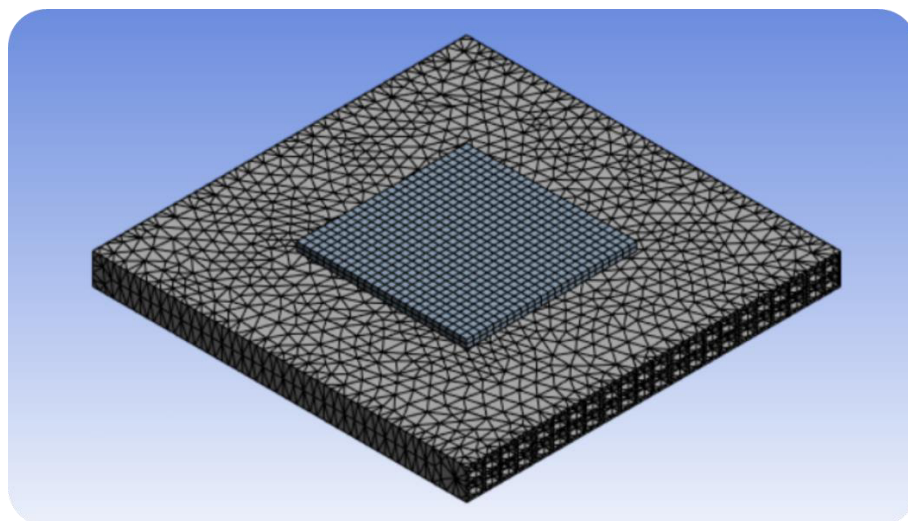
(b)



Fonte: a Autora

A distância entre os nós definida para a criação da malha das simulações deste trabalho foi de 2cm, sendo esta a menor dimensão possível para a análise da geometria em estudo utilizando a versão estudantil do *software* Ansys. Na Figura 17 é possível observar o resultado da geração da malha utilizada.

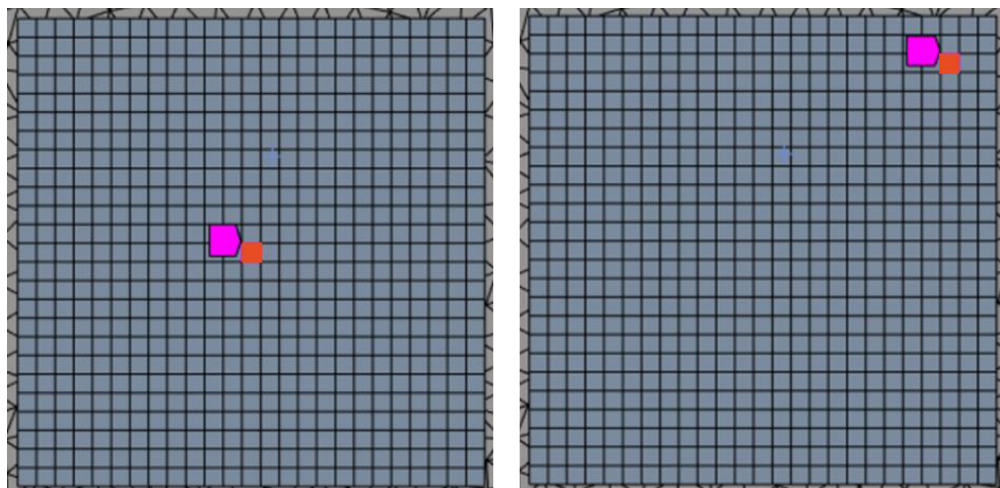
Figura 17: Malha de elementos finitos



Fonte: a Autora

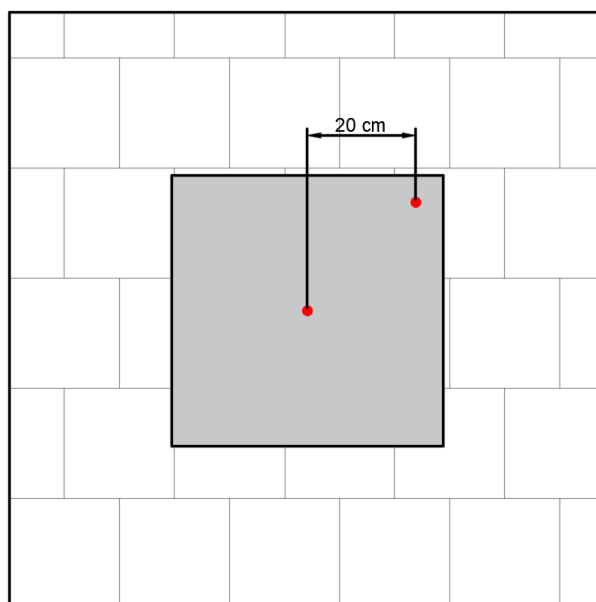
Os pontos mais importantes para o estudo foram identificados na malha e nomeados no *software* para que pudessem ser analisados como elementos únicos separadamente ao sistema (Figura 18). Esses pontos, assim como no ensaio feito com a parede real, são o ponto central e um ponto da extremidade superior direita da placa de argamassa, como indicado na Figura 19.

Figura 18: Elementos da malha nomeados



Fonte: a Autora

Figura 19: Pontos notáveis para a análise computacional



Fonte: a Autora

4.3.2 Dados meteorológicos

Para a análise térmica, foram utilizados alguns dados meteorológicos relevantes à variação térmica das superfícies de fachadas, obtidos pelo portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo eles: temperatura atmosférica, intensidade da radiação solar e velocidade do vento. Os dados utilizados foram os resultados da média dos 10 primeiros dias do mês de novembro de 2022 na cidade de Fortaleza-CE. O experimento foi realizado nas datas de 09/Dez/2022 e 10/Dez/2022.

Esses dados foram aplicados no cálculo de variáveis importantes (coeficiente de troca de calor convectiva e fluxo de calor em superfície vertical) para a construção da simulação computacional, na tentativa de desenvolver um modelo fiel à realidade. Ou seja, cada tipo de

dado meteorológico passou por um diferente tratamento a fim de serem obtidos valores de coeficientes de trocas de calor convectivas e radiação incidente em uma superfície vertical. Esses tratamentos são detalhados nas Seções 4.3.2.1 (trocas convectivas com o ar que retiram calor da superfície argamassada) e 4.3.2.2 (fluxo de calor entrando na argamassa por radiação solar).

4.3.2.1 Vento e temperatura → trocas de calor convectivas

As médias de velocidade do vento a cada hora do dia foram utilizadas para o cálculo dos coeficientes de trocas de calor convectivas, h_c , como descrito na seguinte fórmula (DEFRAEYE *et al.*, 2011), apresentada na Equação 7.

$$h_c = 5,01 \times V^{0,85} \quad (7)$$

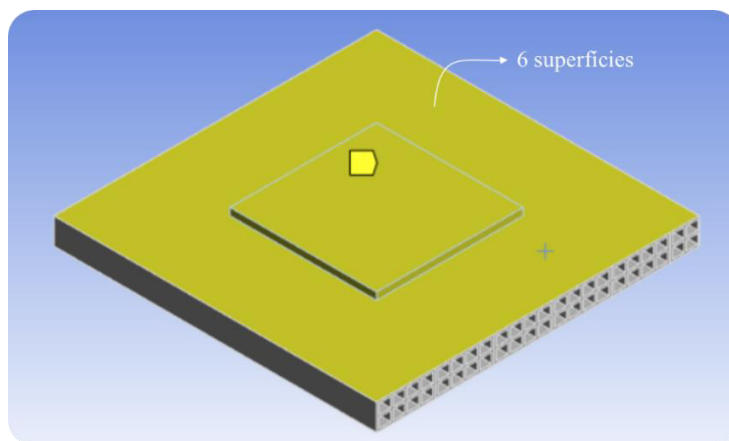
Onde:

- h_c é o coeficiente de trocas de calor convectivas ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);
- V é a velocidade do vento (m/s).

Esses valores, juntamente com os valores de temperatura atmosférica, que também variam no decorrer do dia, foram inseridos no modelo nas superfícies que sofrem atuação da convecção gerada pelo vento, sendo elas: as superfícies principais da argamassa e da alvenaria, e as superfícies laterais da argamassa (Figura 20). Para uma melhor comparação com a fachada real, que não recebe tanta ação do vento durante o dia devido à proximidade com uma edificação de dois pavimentos, o valor de h_c foi multiplicado por 0,6, na intenção de reduzir a ação desse parâmetro no modelo. Na Tabela 2 é possível observar as médias de temperatura atmosférica, velocidade do vento, h_c e $h_c \times 0,6$. Além disso, para uma melhor compreensão, foi plotado um gráfico da variação dessas variáveis ao longo de 24h (Figura 21).

Vale ressaltar que esse fator redutor de 0,6 utilizado para diminuir os efeitos da ação do vento na fachada é apenas um valor estimado diante de análises de sensibilidade realizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 20: Superfícies de atuação das trocas de calor convectivas

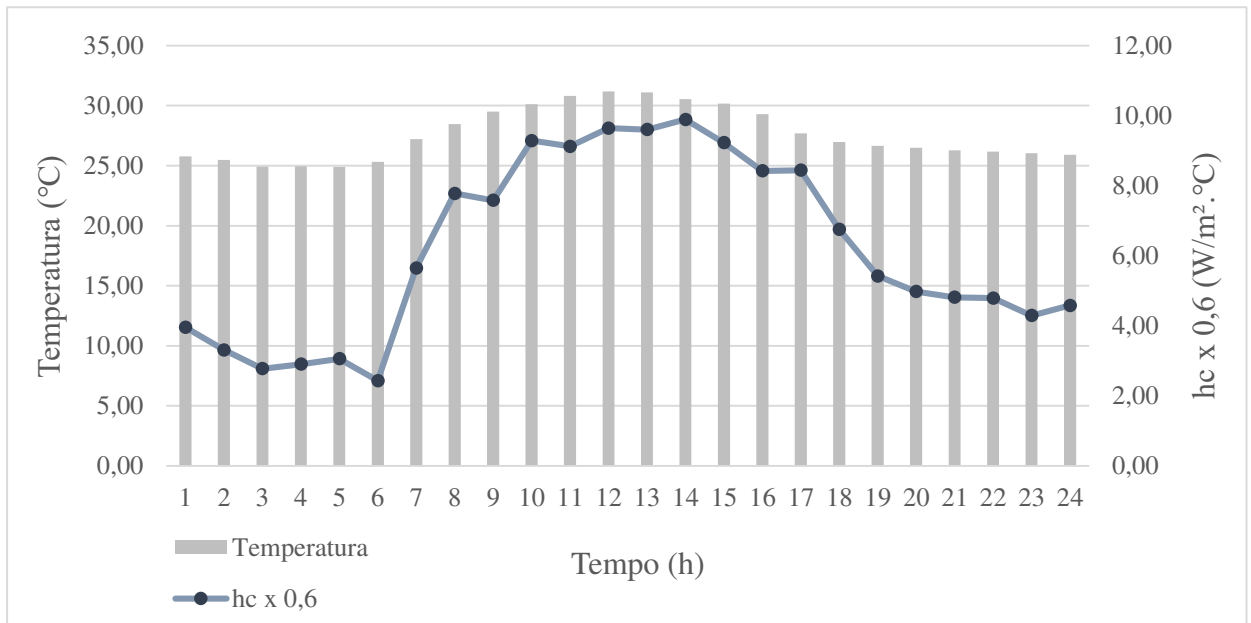


Fonte: a Autora

Tabela 2: Dados de temperatura, velocidade do vento, h_c e $h_c \times 0,6$

Horário local	Temperatura atmosférica média (°C)	Velocidade média do vento (m/s)	h_c (W/m ² .°C)	$h_c \times 0,6$ (W/m ² .°C)
00:00	25,78	1,38	6,59	3,95
01:00	25,49	1,12	5,52	3,31
02:00	24,93	0,91	4,62	2,77
03:00	24,95	0,96	4,84	2,90
04:00	24,88	1,02	5,10	3,06
05:00	25,32	0,78	4,06	2,43
06:00	27,22	2,10	9,41	5,65
07:00	28,46	3,06	12,96	7,78
08:00	29,50	2,97	12,64	7,58
09:00	30,12	3,77	15,48	9,29
10:00	30,80	3,69	15,20	9,12
11:00	31,18	3,94	16,07	9,64
12:00	31,10	3,92	16,00	9,60
13:00	30,53	4,06	16,48	9,89
14:00	30,16	3,74	15,37	9,22
15:00	29,30	3,36	14,04	8,42
16:00	27,69	3,37	14,07	8,44
17:00	26,97	2,59	11,25	6,75
18:00	26,66	2,00	9,03	5,42
19:00	26,49	1,81	8,30	4,98
20:00	26,28	1,74	8,02	4,81
21:00	26,18	1,73	7,98	4,79
22:00	26,03	1,52	7,15	4,29
23:00	25,91	1,64	7,63	4,58

Fonte: a Autora

Figura 21: Variação média da temperatura ambiente e do $h_c \times 0,6$ em 24h

Fonte: a Autora

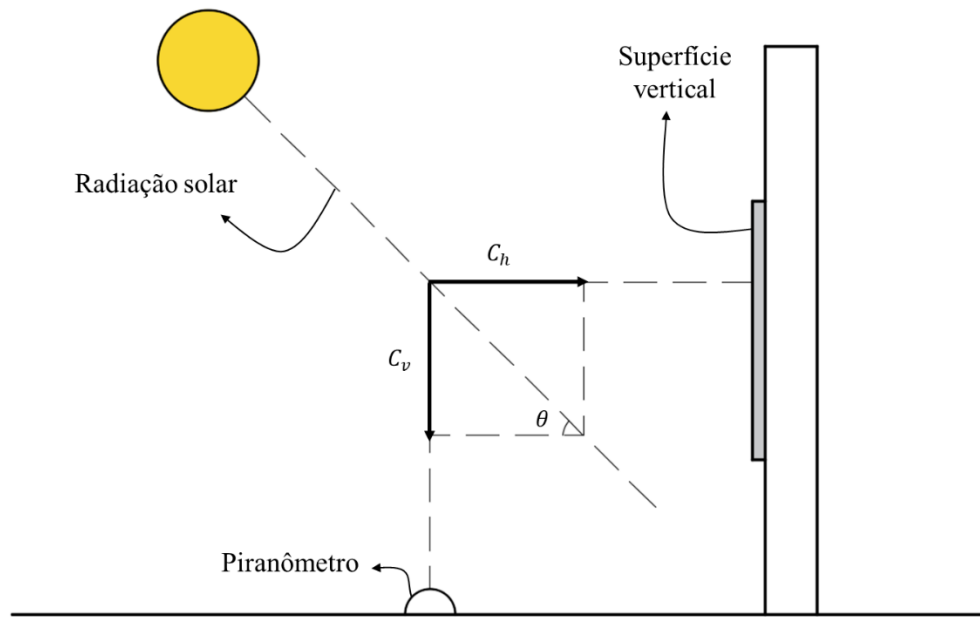
Ademais, foi inserida também uma situação de convecção nos furos dos blocos de alvenaria cerâmica, sendo o valor do coeficiente de trocas de calor convectivas ($h_{c\ furo}$) igual a $2,0\text{ W/m}^2.\text{°C}$ (INCROPERA *et al.*, 2014), valor mínimo de referência para gases em ambientes fechados sem a interferência de ventilação forçada.

Outro dado importante para o modelo é o dado de temperatura inicial do sistema, para essa lacuna foi utilizado o valor da média de temperatura inicial do dia, ou seja, o valor de referência para 00h, que, nesse caso, como pode ser observado na Tabela 2, é igual a $25,78\text{°C}$.

4.3.2.2 Radiação Solar → fluxo de calor

Os valores de radiação solar disponíveis no site do INMET, são obtidos por meio de piranômetros, equipamentos capazes de medir a potência da radiação solar em uma superfície horizontal. Assim, os dados de radiação foram tratados a fim de se obter a componente perpendicular à superfície da parede de fato estudada neste trabalho, conforme conceitos ilustrados na Figura 22. Para isso, foi utilizada a equação trigonométrica abaixo em cada horário do dia, onde os valores de elevação solar em Fortaleza-CE foram obtidos pelo site SunEarthTools.

Figura 22: Esquema da composição vetorial da radiação solar



Fonte: a Autora

$$C_h = C_v \cdot \cotg \theta \quad (8)$$

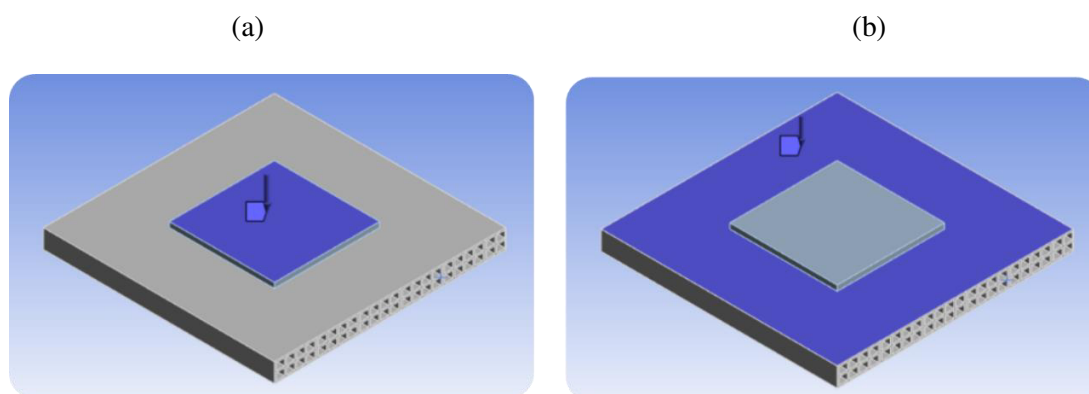
Onde:

- C_h é a componente horizontal;
- C_v é a componente vertical;
- θ é o ângulo de elevação solar.

Além disso, os produtos da equação acima foram multiplicados pelo percentual de absorvância correspondente a duas diferentes colorações, sendo uma branca, com absorvância de 10,20% para a luz solar, e uma preta, com absorvância de 97,80% para a luz solar (DORNELLES *et al.*, 2014), a fim de obter resultados que permitam a comparação entre tintas mais escuras e tintas mais claras. Esses resultados foram inseridos no modelo na superfície principal da argamassa. Para a superfície vertical da alvenaria em torno do pano de argamassa, foi inserido um resultado referente a uma absorvância de 50,00%, a fim de simular a absorvância da cor natural da argamassa, visto que essa superfície foi chapiscada durante a construção do muro. As duas superfícies estão ilustradas na Figura 23.

Vale ressaltar que esse valor de 50% para a absorvância da cor natural do pano de argamassa é apenas um valor estimado diante de análises de sensibilidade realizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

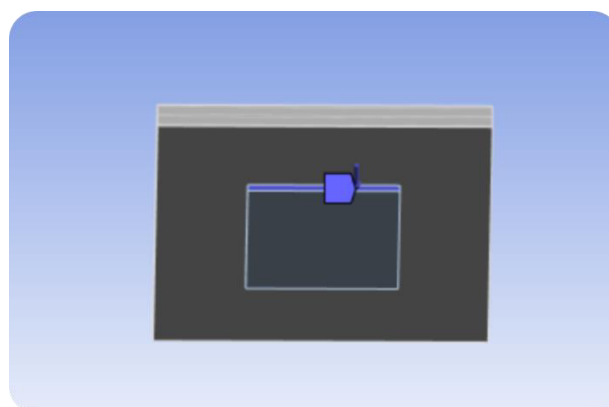
Figura 23: Superfícies de atuação da componente horizontal da radiação solar: superfície vertical da argamassa (a); superfície vertical da alvenaria (b)



Fonte: a Autora

Ainda, para uma posterior comparação com os resultados obtidos pelo ensaio de aferição de temperatura no muro real, foi feita uma simulação considerando uma absorptância de 50,00% nas duas superfícies verticais, admitindo uma situação sem cobertura da parede. Com o objetivo de deixar o modelo ainda mais próximo da realidade, também foi adicionada uma situação de radiação na superfície superior do pano de argamassa (Figura 24), sendo os dados inseridos equivalentes à componente vertical da radiação solar (C_v) multiplicada por 50,00%, também a fim de simular a absorptância da cor natural da argamassa, visto que as laterais da argamassa não receberam pintura.

Figura 24: Superfícies de atuação da componente vertical da radiação solar



Fonte: a Autora

Na Tabela 3, é possível visualizar os dados brutos de radiação e elevação solar retirados dos sites do INMET e SunEarthTools, respectivamente, e os dados de fluxo de calor atuante em cada tipo de superfície vertical a cada hora após o tratamento, sendo a quinta coluna referente à superfície vertical branca (SVB), a sexta coluna referente à superfície vertical preta (SVP), a penúltima coluna referente à superfície vertical sem cobrimento (SVSC) e a última coluna referente à superfície superior (SS).

Tabela 3: Dados de radiação adotados

Horário local	Radiação média (W/m²)	Elevação do Sol (°)	Elevação do Sol (rad)	Fluxo de calor atuante em SVB (W/m²)	Fluxo de calor atuante em SVP (W/m²)	Fluxo de calor atuante em SVSC (W/m²)	Fluxo de calor atuante em SS (W/m²)
				Abs. = 10,20%	Abs. = 97,80%	Abs. = 50,00%	Abs. = 50,00%
00:00	-	-	-	-	-	-	-
01:00	-	-	-	-	-	-	-
02:00	-	-	-	-	-	-	-
03:00	-	-	-	-	-	-	-
04:00	-	-	-	-	-	-	-
05:00	25,02	1,00	0,02	146,19	1401,67	716,60	12,51
06:00	165,53	10,45	0,18	91,55	877,76	448,75	82,77
07:00	322,50	25,28	0,44	69,65	667,85	341,44	161,25
08:00	431,33	40,11	0,70	52,23	500,78	256,02	215,67
09:00	563,66	54,91	0,96	40,39	387,28	198,00	281,83
10:00	653,63	69,56	1,21	24,85	238,24	121,80	326,82
11:00	681,58	83,03	1,45	8,50	81,49	41,66	340,79
12:00	696,82	78,88	1,38	13,97	133,95	68,48	348,41
13:00	642,17	64,63	1,13	31,06	297,81	152,26	321,09
14:00	533,28	49,91	0,87	45,79	439,03	224,45	266,64
15:00	365,17	35,10	0,61	53,00	508,15	259,79	182,58
16:00	127,87	20,27	0,35	35,32	338,62	173,12	63,93
17:00	5,09	5,45	0,10	5,44	52,16	26,67	2,54
18:00	-	-	-	-	-	-	-
19:00	-	-	-	-	-	-	-
20:00	-	-	-	-	-	-	-
21:00	-	-	-	-	-	-	-
22:00	-	-	-	-	-	-	-
23:00	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: a Autora

Vale ressaltar que, apesar de existir radiação significativa a partir de 5h da manhã, só foram utilizados os dados a partir de 11h da manhã, visto que a fachada real em questão está voltada para o poente e não recebe radiação solar direta durante as primeiras horas do dia, até cerca de 11h. Os dados de radiação atuante na argamassa estão organizados na tabela abaixo.

Tabela 4: Radiação atuante na argamassa

Horário local	Fluxo de calor atuante em SVB (W/m²)	Fluxo de calor atuante em SVP (W/m²)	Fluxo de calor atuante em SVSC (W/m²)	Fluxo de calor atuante em SS (W/m²)
11:00	8,50	81,49	41,66	340,79
12:00	13,97	133,95	68,48	348,41
13:00	31,06	297,81	152,26	321,09
14:00	45,79	439,03	224,45	266,64
15:00	53,00	508,15	259,79	182,58
16:00	35,32	338,62	173,12	63,93
17:00	5,44	52,16	26,67	2,54

Fonte: a Autora

4.4 Análise computacional de sensibilidade com variação de diferentes parâmetros

Visando a uma melhor compreensão de como as diferentes variáveis relativas às condições climáticas influenciam individualmente na temperatura da superfície do pano de argamassa, foram feitas simulações computacionais simplificadas utilizando valores constantes de velocidade do vento e temperatura atmosférica, além de valores intermediários de absorvância da superfície, fazendo com que a radiação incidente varie gradativamente. Foram utilizados nestas análises valores de temperatura atmosférica e velocidade do vento médias em relação aos valores diários apresentados anteriormente, como indicado na Tabela 5.

Tabela 5: Casos de análise e valores de temperatura, velocidade do vento e h_c

	Temperatura atmosférica (°C)	Velocidade do vento (m/s)	h_c (W/m ² .°C)
Média	27,58	2,38	10,33
Desv. Padrão	2,19	1,14	4,28
Média + D.P.	29,77	3,52	14,60
Média - D.P.	25,39	1,24	6,05

D.P. = desvio-padrão.

Fonte: a Autora

Além disso, foram utilizados valores de radiação incidente equivalentes a absorvâncias iguais a 55%, 65% e 75%, com a atuação nas superfícies verticais iniciando às 11h (Tabela 6). Vale ressaltar que nessas simulações não serão inseridos valores de radiação na superfície superior do pano de argamassa e que os resultados plotados serão referentes apenas ao ponto central.

Tabela 6: Valores de incidência de calor atuante para diferentes porcentagens de absorvância

Horário local	Fluxo de calor atuante (W/m ²): Absorb. 55%	Fluxo de calor atuante (W/m ²): Absorb. 65%	Fluxo de calor atuante (W/m ²): Absorb. 75%
11:00	45,83	54,16	62,49
12:00	75,33	89,03	102,72
13:00	167,48	197,93	228,39
14:00	246,90	291,79	336,68
15:00	285,77	337,73	389,69
16:00	190,43	225,05	259,67
17:00	29,34	34,67	40,00

Fonte: a Autora

Para a primeira análise, foram fixados os valores de temperatura atmosférica e velocidade do vento em 27,58°C e 2,38 m/s, respectivamente, obtendo-se um h_c constante e igual a 10,33 W/m².°C, como indicado na Tabela 5. Também foi mantido um $h_{c\ furo}$ igual a

2,00 W/m².°C nas superfícies interiores dos furos dos blocos cerâmicos. Foram feitas então 3 simulações, variando entre elas apenas o fluxo de calor inserido na superfície de acordo com a tabela anterior (Tabela 6).

Para a segunda análise, foram mantidos os valores fixos e constantes de 27,58°C para a temperatura atmosférica e 10,33 W/m².°C para h_c . Também foi fixado um fluxo de calor equivalente a uma absorptância superficial igual a 55%. Em seguida, foram feitas 3 simulações, variando apenas o coeficiente de trocas de calor convectivas no interior dos furos dos blocos cerâmicos, num primeiro momento foi utilizado $h_{c\ furo} = 2$ W/m².°C, depois $h_{c\ furo} = 0$ e por último $h_{c\ furo} = 4$ W/m².°C.

Para a terceira análise, foram feitas 9 simulações, todas com valores fixos de $h_{c\ furo}$ e percentual de absorptância da superfície iguais a 2,00 W/m².°C e 55%, respectivamente. Foi feita então uma combinação entre os valores de temperatura atmosférica e h_c apresentados na Tabela 5. Ou seja, foram feitas simulações combinando os valores de média, média + DP e média – DP das duas variáveis.

Na Tabela 7 é possível observar um resumo dos valores utilizados nas simulações feitas em cada análise, sendo a primeira simulação das três primeiras análises equivalente à referência. Dessa forma, em todos os casos haverá um resultado a ser usado como base para comparação entre análises.

Tabela 7: Dados de entrada das simulações para análise de sensibilidade

	Simulação	Temperatura atmosférica (°C)	hc (W/m ² .°C)	Absortância	hc furo (W/m ² .°C)
	Referência	27,58	10,33	55%	2
Análise 1	2 ^a	27,58	10,33	65%	2
	3 ^a	27,58	10,33	75%	2
Análise 2	2 ^a	27,58	10,33	55%	0
	3 ^a	27,58	10,33	55%	4
Análise 3	2 ^a	25,39	6,05	55%	2
	3 ^a	29,77	14,60	55%	2
	4 ^a	27,58	6,05	55%	2
	5 ^a	27,58	14,60	55%	2
	6 ^a	25,39	10,33	55%	2
	7 ^a	29,77	10,33	55%	2
	8 ^a	25,39	14,60	55%	2
	9 ^a	29,77	6,05	55%	2

Fonte: a Autora

No capítulo seguinte, foram plotados os resultados para cada análise em gráficos de Temperatura (°C) x Tempo (h), com as curvas dos dados obtidos por meio das simulações, de forma a facilitar a visualização e a interpretação dos resultados. Eles foram comparados com os resultados experimentais em gráficos semelhantes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise e comparação dos resultados do ensaio de aferição térmica na fachada real com os resultados obtidos por meio da simulação computacional

Os resultados do ensaio de aferição da temperatura da fachada real e da simulação computacional (utilizando o caso de referência apresentado nas Tabelas 2 e 4) para uma superfície preta foram organizados na Tabela 8 e plotados no gráfico da Figura 25. A tabela foi colorida para facilitar o entendimento dos dados, sendo os resultados em verde aqueles em temperaturas mais baixas e os resultados em vermelho aqueles em temperaturas mais altas, com o branco representando temperaturas intermediárias.

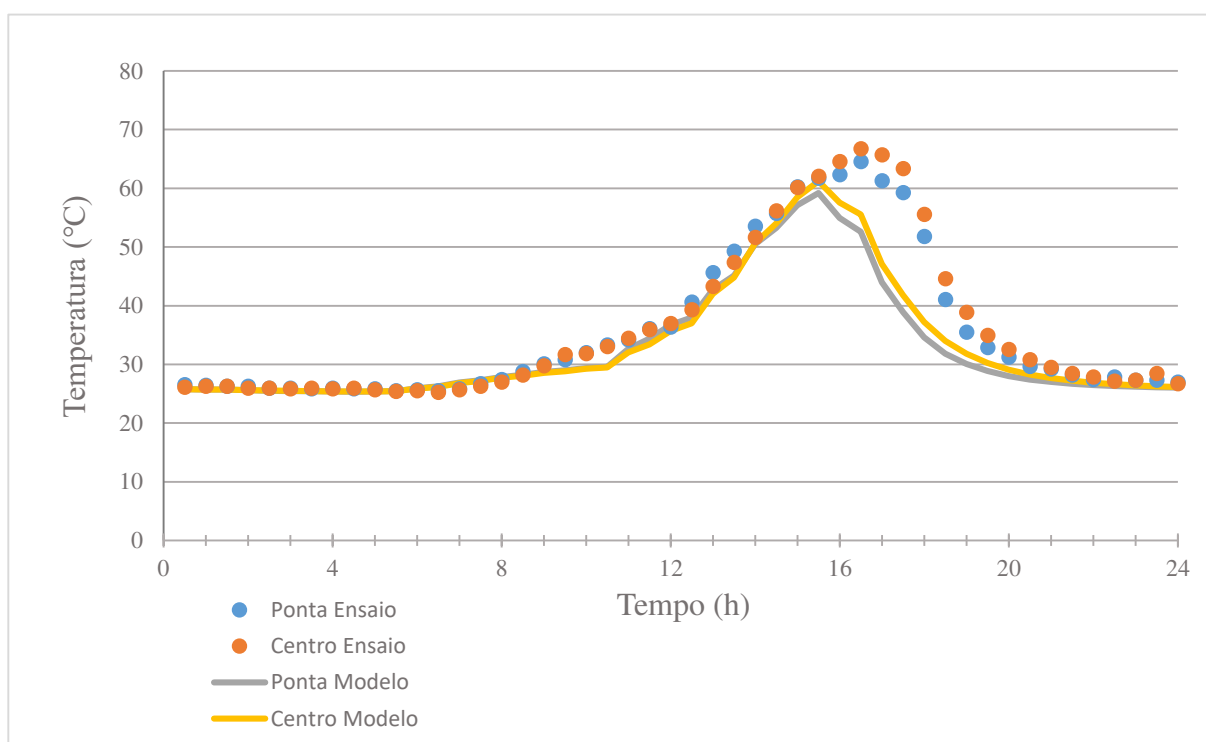
Tabela 8: Resultados de temperatura ao longo do dia de medição da fachada para SVP por meio de simulação computacional e ensaio de aferição térmica

Hora	Temperatura média SVP - Modelo (°C)		Temperatura média SVP - Ensaio (°C)	
	Centro	Ponta	Centro	Ponta
00:30	25,78	25,78	26,13	26,57
01:00	25,74	25,73	26,28	26,42
01:30	25,71	25,70	26,28	26,28
02:00	25,62	25,60	25,98	26,28
02:30	25,55	25,52	25,98	25,98
03:00	25,49	25,46	25,84	25,98
03:30	25,45	25,42	25,98	25,84
04:00	25,41	25,38	25,84	25,98
04:30	25,37	25,34	25,98	25,84
05:00	25,41	25,39	25,69	25,84
05:30	25,43	25,43	25,40	25,54
06:00	25,87	25,91	25,54	25,69
06:30	26,16	26,23	25,25	25,54
07:00	26,78	26,90	25,69	25,84
07:30	27,17	27,30	26,28	26,72
08:00	27,71	27,85	27,01	27,45
08:30	28,05	28,19	28,18	28,77
09:00	28,55	28,69	29,79	30,09
09:30	28,85	28,97	31,70	30,82
10:00	29,24	29,36	31,85	31,99
10:30	29,48	29,59	33,02	33,31
11:00	32,01	32,63	34,49	34,19
11:30	33,43	34,37	35,95	36,10
12:00	35,70	36,74	36,98	36,39
12:30	37,00	38,01	39,33	40,65
13:00	42,00	42,72	43,28	45,63
13:30	44,78	45,13	47,39	49,30
14:00	50,63	50,45	51,64	53,55
14:30	54,00	53,28	56,19	55,75
15:00	58,51	57,11	60,15	60,29
15:30	61,24	59,23	62,05	61,76
16:00	57,58	54,96	64,55	62,35
16:30	55,56	52,62	66,74	64,55
17:00	47,07	43,96	65,72	61,32
17:30	41,82	38,93	63,37	59,27
18:00	37,19	34,60	55,60	51,79
18:30	34,01	31,83	44,60	41,09
19:00	31,83	30,05	38,89	35,51

19:30	30,26	28,85	34,93	32,87
20:00	29,11	28,00	32,58	31,26
20:30	28,28	27,42	30,82	29,65
21:00	27,66	27,01	29,50	29,21
21:30	27,21	26,72	28,48	28,18
22:00	26,88	26,49	27,89	27,45
22:30	26,63	26,34	27,16	27,89
23:00	26,42	26,20	27,30	27,30
23:30	26,27	26,10	28,48	27,30
00:00	26,16	26,03	26,72	27,01

Fonte: a Autora

Figura 25: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da modelagem e do ensaio para SVP



Fonte: a Autora

É possível perceber, por meio da análise da Tabela 8 e da Figura 25, que os resultados da simulação diferem muito pouco dos valores reais aferidos por meio do ensaio desenvolvido, sendo a diferença de horário entre os picos equivalente a 1h, enquanto o pico dos resultados do modelo ocorre às 15h30min, o pico dos valores reais obtidos pelo ensaio ocorre às 16h30min. Quanto aos valores de pico, o ponto central apresentou números mais altos que a ponta, sendo o valor máximo obtido pelo modelo igual a 61,24°C e o valor máximo obtido pelo ensaio igual a 66,74°C, o que representa uma diferença de 5,5°C. Já os valores de pico para o ponto referente à extremidade da argamassa foram 59,23°C para o modelo e 64,55°C para o ensaio, sendo essa diferença equivalente a 5,32°C.

Além disso, as diferenças entre a aferição máxima e a aferição mínima em cada caso foram organizadas na Tabela 9 para melhor visualização. Observa-se que a diferença entre

as amplitudes registradas pelo ensaio e as registradas por meio do modelo computacional representam 13,23% para os valores do centro e 13,15% para os valores da ponta. Ademais, nota-se que as amplitudes térmicas diárias resultantes em cada ponto, tanto para o modelo quanto para o ensaio, são bastante significativas e podem sugerir a ocorrência de desgaste por fadiga térmica do material, a depender das propriedades de módulo de elasticidade e de resistência à fadiga. Mais à frente neste capítulo veremos que essa sugestão se confirma, sendo os altos valores de amplitude térmica um fator de grande relevância para a ocorrência de fadiga térmica.

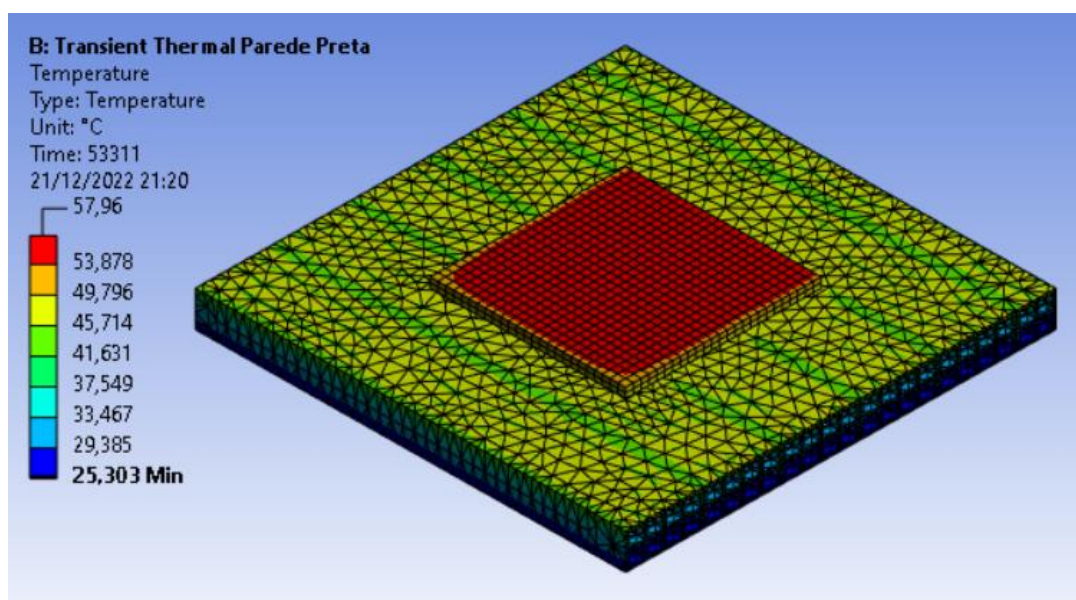
Tabela 9: Resultados de amplitude térmica diária da fachada para SVP

Amplitude Térmica SVP - Modelo (°C)		Amplitude Térmica SVP - Ensaio (°C)	
Centro	Ponta	Centro	Ponta
35,87	33,88	41,34	39,01

Fonte: a Autora

Para fins ilustrativos, foi plotada a figura a seguir, que representa o mapa de calor do sistema para uma placa de argamassa com superfície preta. O comportamento térmico representado na imagem ocorre aproximadamente às 14h48min.

Figura 26: Mapa de calor resultante da simulação térmica para SVP



Fonte: a Autora

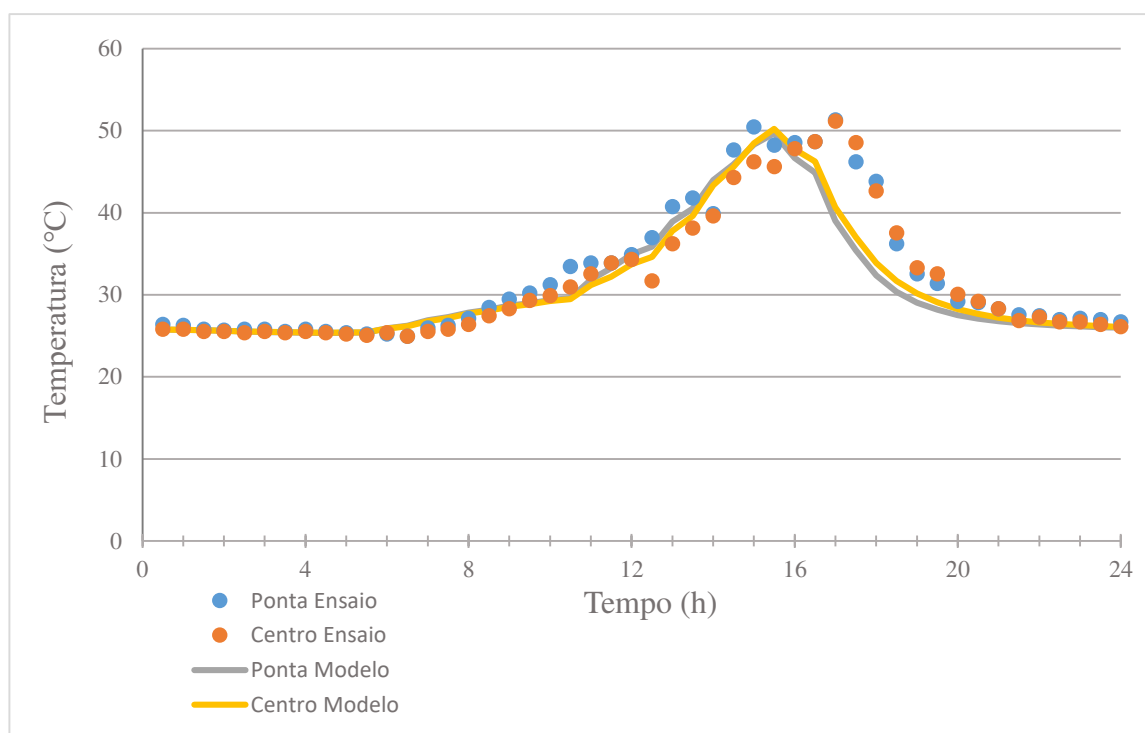
Enquanto isso, os resultados para a situação da fachada sem cobertura (utilizando o caso de referência apresentado nas Tabelas 2 e 4) estão expostos na Tabela 10 e foram plotados no gráfico da Figura 27. Novamente, a tabela foi colorida com os resultados em verde sendo aqueles com temperaturas mais baixas e os resultados em vermelho sendo aqueles com temperaturas mais altas, com o branco representando temperaturas intermediárias.

Tabela 10: Resultados de temperatura ao longo do dia de medição da fachada para SVSC por meio de simulação computacional e ensaio de aferição térmica

Hora	Temperatura média SVSC - Modelo (°C)		Temperatura média SVSC - Ensaio (°C)	
	Centro	Ponta	Centro	Ponta
00:30	25,78	25,78	25,84	26,42
01:00	25,74	25,73	25,84	26,28
01:30	25,71	25,70	25,54	25,84
02:00	25,62	25,60	25,54	25,69
02:30	25,55	25,52	25,40	25,84
03:00	25,49	25,46	25,54	25,84
03:30	25,45	25,42	25,40	25,54
04:00	25,41	25,38	25,54	25,84
04:30	25,37	25,34	25,40	25,54
05:00	25,41	25,39	25,25	25,40
05:30	25,43	25,43	25,10	25,25
06:00	25,87	25,91	25,40	25,25
06:30	26,16	26,23	24,96	24,96
07:00	26,78	26,90	25,54	25,98
07:30	27,17	27,30	25,84	26,28
08:00	27,71	27,85	26,42	27,16
08:30	28,05	28,19	27,45	28,48
09:00	28,55	28,69	28,33	29,50
09:30	28,85	28,97	29,35	30,23
10:00	29,24	29,36	29,94	31,26
10:30	29,48	29,59	30,97	33,46
11:00	31,21	31,87	32,58	33,90
11:30	32,21	33,26	33,90	33,90
12:00	33,72	34,95	34,34	34,93
12:30	34,62	35,88	31,70	36,98
13:00	37,79	38,90	36,25	40,79
13:30	39,62	40,54	38,15	41,82
14:00	43,37	43,98	39,62	39,91
14:30	45,60	45,90	44,31	47,68
15:00	48,46	48,32	46,22	50,47
15:30	50,23	49,70	45,63	48,27
16:00	47,73	46,67	47,83	48,56
16:30	46,25	44,88	48,71	48,71
17:00	40,66	39,04	51,20	51,35
17:30	37,05	35,43	48,56	46,22
18:00	33,90	32,37	42,70	43,87
18:30	31,70	30,36	37,57	36,25
19:00	30,18	29,05	33,31	32,58
19:30	29,08	28,17	32,58	31,41
20:00	28,26	27,53	30,09	29,21
20:30	27,67	27,10	29,21	29,06
21:00	27,22	26,78	28,33	28,33
21:30	26,90	26,56	26,86	27,60
22:00	26,64	26,38	27,30	27,45
22:30	26,46	26,25	26,72	27,01
23:00	26,30	26,14	26,72	27,16
23:30	26,18	26,06	26,42	27,01
00:00	26,09	26,00	26,13	26,72

Fonte: a Autora

Figura 27: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da modelagem e do ensaio para SVSC



Fonte: a Autora

Neste caso, a diferença de entre os horários de pico foi de 1h30min, enquanto o ponto máximo de temperatura do modelo permaneceu ocorrendo às 15h30min, o ponto máximo medido por meio do ensaio ocorreu às 17h. O ponto central do pano de argamassa apresentou valores de temperatura iguais a 50,23°C e 51,20°C para o modelo e para o ensaio, respectivamente, o que equivale a uma diferença de 0,97°C. Já o ponto da extremidade do pano apresentou valores de pico iguais a 49,70°C e 51,35°C, o que equivale a 1,65°C de diferença.

Além disso, é possível perceber que, neste caso, há uma divergência entre os pontos que atingem a temperatura mais alta. Para o modelo computacional o ponto central atinge uma temperatura mais alta que a extremidade, enquanto para o ensaio a temperatura da ponta acabou sendo ligeiramente mais alta que a do centro.

Na Tabela 11, observam-se os resultados de amplitude térmica para a superfície de fachada sem cobertura. A diferença entre os resultados da modelagem e do ensaio para o centro e para a ponta foi de 5,26% e 7,69%, respectivamente, considerando-se uma boa primeira aproximação para previsão das amplitudes térmicas usando o modelo adotado para a superfície sem coloração. A mudança entre os modelos foi somente na absorvância, que adotou valores plausíveis para as colorações investigadas, o que reforça a boa qualidade das simulações. Esses valores de amplitude térmica obtidos são também relevantes e, assim como na superfície preta, podem representar um risco de desgaste por fadiga térmica do material, a depender das propriedades de módulo de elasticidade e de fadiga da argamassa.

Tabela 11: Resultados de amplitude térmica diária da fachada para SVSC

Amplitude Térmica SVSC - Modelo (°C)		Amplitude Térmica SVSC - Ensaio (°C)	
Centro	Ponta	Centro	Ponta
24,86	24,36	26,24	26,39

Fonte: a Autora

A fim de obter uma melhor comparação entre o desempenho térmico de fachadas de argamassa com diferentes cores de cobertura, também foi feita uma simulação computacional para uma superfície branca. Os resultados estão expostos na Tabela 12 e no gráfico da Figura 28. A tabela também foi colorida com os resultados em verde sendo aqueles com temperaturas mais baixas e os resultados em vermelho sendo aqueles com temperaturas mais altas, com o branco representando temperaturas intermediárias

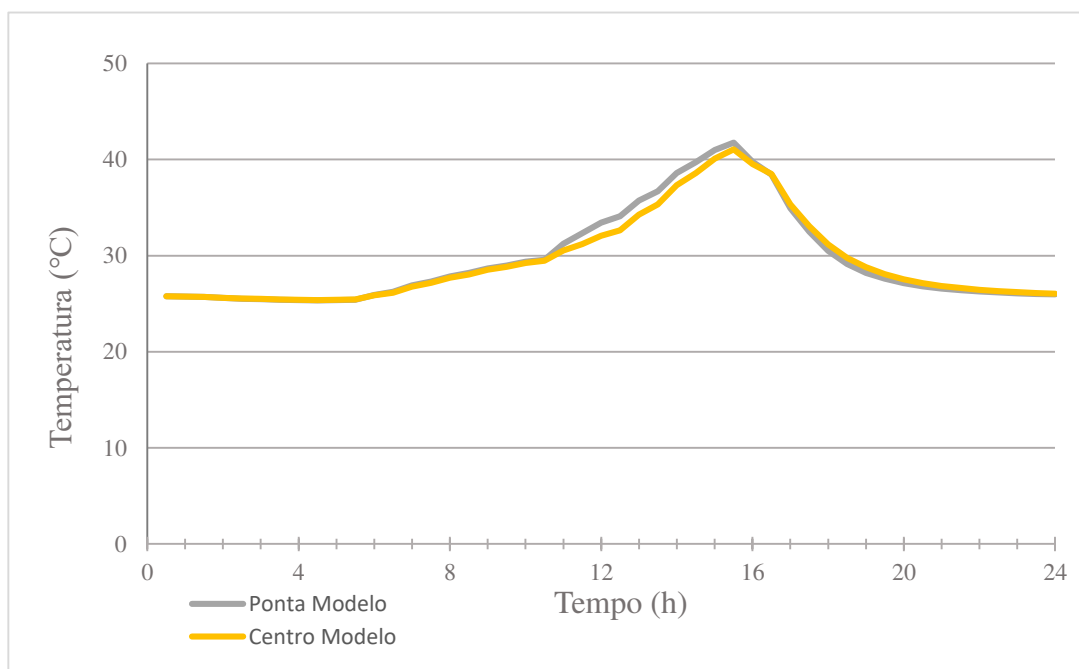
Tabela 12: Resultados de temperatura ao longo do dia de medição da fachada para SVB por meio de simulação computacional

Hora	Temperatura média SVP - Modelo (°C)	
	Centro	Ponta
00:30	25,78	25,78
01:00	25,74	25,73
01:30	25,71	25,70
02:00	25,62	25,60
02:30	25,55	25,52
03:00	25,49	25,46
03:30	25,45	25,42
04:00	25,41	25,38
04:30	25,37	25,34
05:00	25,41	25,39
05:30	25,43	25,43
06:00	25,87	25,91
06:30	26,16	26,23
07:00	26,78	26,90
07:30	27,17	27,30
08:00	27,71	27,85
08:30	28,05	28,19
09:00	28,55	28,69
09:30	28,85	28,97
10:00	29,24	29,36
10:30	29,48	29,59
11:00	30,53	31,23
11:30	31,20	32,33
12:00	32,08	33,45
12:30	32,63	34,11
13:00	34,27	35,73
13:30	35,33	36,71
14:00	37,33	38,60
14:30	38,61	39,75
15:00	40,09	41,01
15:30	41,06	41,77
16:00	39,52	39,77
16:30	38,50	38,44
17:00	35,33	34,93

17:30	33,08	32,51
18:00	31,16	30,51
18:30	29,78	29,14
19:00	28,80	28,22
19:30	28,09	27,60
20:00	27,55	27,14
20:30	27,16	26,83
21:00	26,85	26,59
21:30	26,63	26,42
22:00	26,45	26,28
22:30	26,32	26,19
23:00	26,19	26,09
23:30	26,11	26,02
00:00	26,04	25,98

Fonte: a Autora

Figura 28: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da modelagem para SVB



Fonte: a Autora

Por meio dos dados acima, é possível perceber que, quando há a redução do percentual de absorvência da superfície, o ponto situado na extremidade da placa de argamassa pode passar a exibir resultados de pico mais altos que o ponto central, devido às superfícies vizinhas que absorvem mais radiação. Além disso, os resultados de amplitude térmica também se apresentaram bastante inferiores (Tabela 13), podendo-se inferir que há menores chances de ocorrer desgaste por fadiga térmica nesse material, o que dependerá das propriedades de módulo de elasticidade e de fadiga da argamassa. Ainda assim, pode-se observar que haverá menor risco de fadiga térmica em fachadas de coloração mais próximo ao branco. Comparando os valores de amplitude térmica para o centro da placa de argamassa obtidos por meio do modelo na superfície preta e na superfície branca se tem uma diferença de 56,26%.

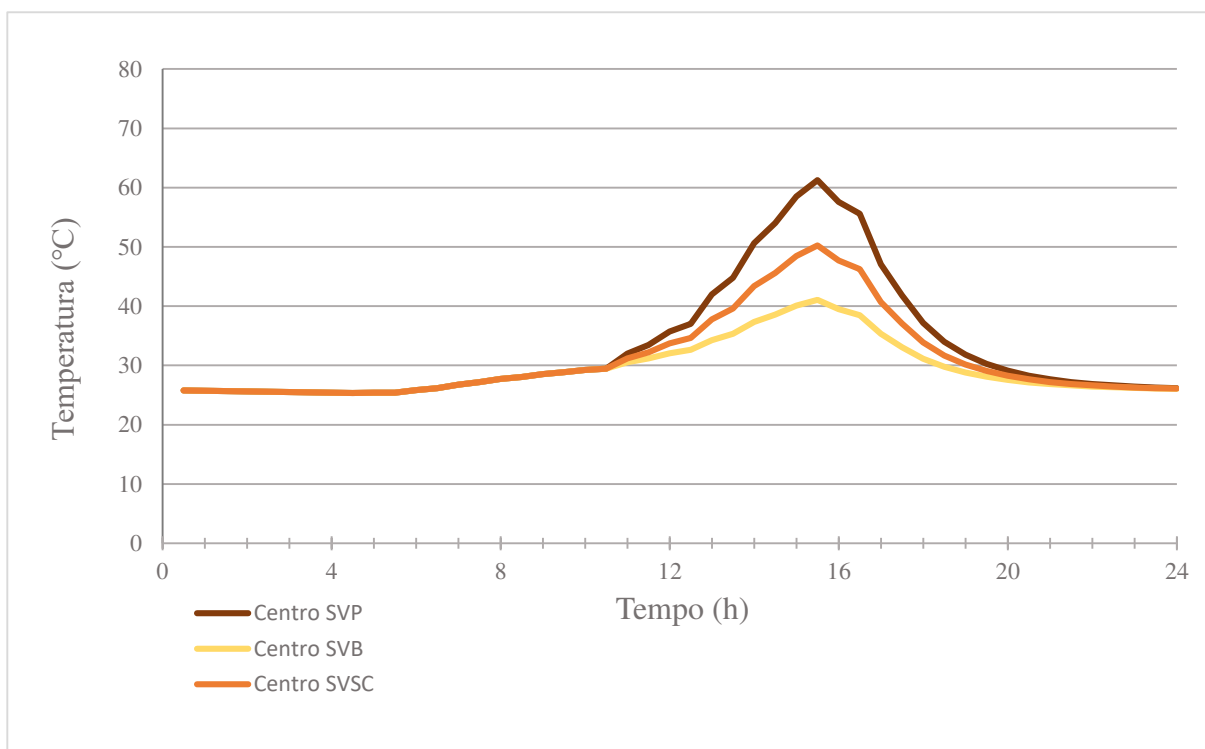
Tabela 13: Resultados de amplitude térmica diária da fachada para SVB

Amplitude Térmica SVP - Modelo (°C)	
Centro	Ponta
15,69	16,43

Fonte: a Autora

Por fim, para uma melhor comparação entre os resultados, foi plotado o gráfico a seguir (Figura 29) onde é possível visualizar os resultados da modelagem relativos do ponto central para os três tipos de superfície estudados neste trabalho.

Figura 29: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados centrais para as 3 superfícies



Diante disso, é viável concluir que a simulação computacional para a previsão do comportamento térmico de fachadas é uma alternativa válida para auxiliar a tomada de decisão na engenharia. Como exemplos de tomadas de decisão possivelmente impactadas sublinham-se a dosagem da argamassa (em função de propriedades de módulo de elasticidade e resistência à fadiga) e a coloração das superfícies a serem adotadas.

5.2 Análise computacional de sensibilidade dos resultados de temperatura com variação de diferentes parâmetros

Os resultados das simulações para a análise de sensibilidade estão expostos na Tabela 14 a seguir. Os cenários adotados foram detalhados na Tabela 7. Mais uma vez, a tabela foi colorida com os resultados em verde sendo aqueles com temperaturas mais baixas e os

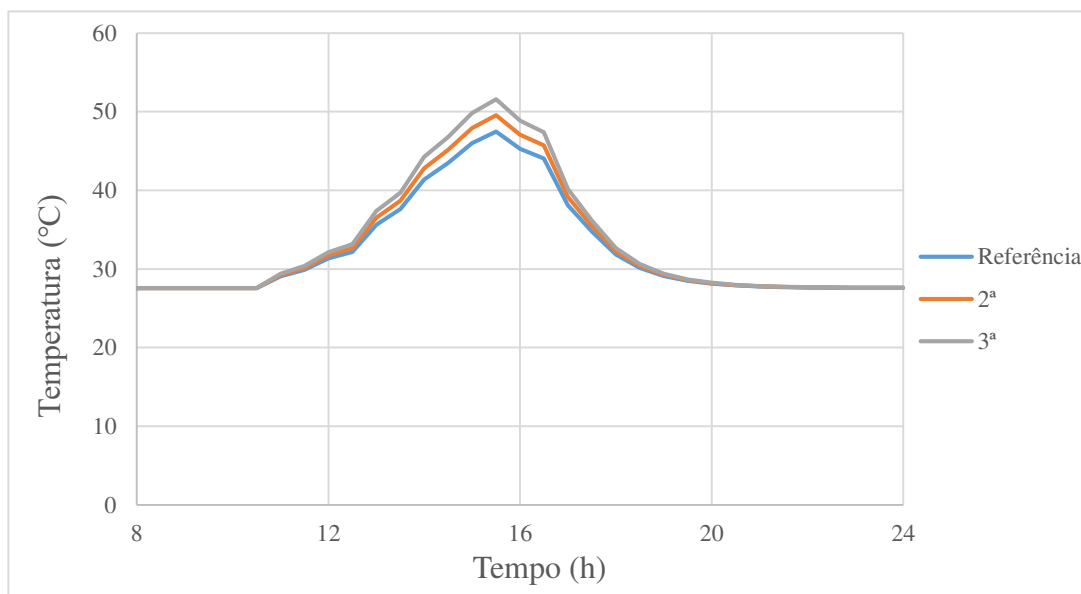
resultados em vermelho sendo aqueles com temperaturas mais altas, com o branco representando temperaturas intermediárias.

Tabela 14: Resultados de temperatura no centro da superfície argamassada ao longo do tempo das simulações investigadas na análise de sensibilidade

Hora	Referência	Resultado Centro (°C)											
		Análise 1		Análise 2		Análise 3							
		2ª	3ª	2ª	3ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª
00:30	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
01:00	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
01:30	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
02:00	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
02:30	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
03:00	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
03:30	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
04:00	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
04:30	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
05:00	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
05:30	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
06:00	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
06:30	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
07:00	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
07:30	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
08:00	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
08:30	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
09:00	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
09:30	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
10:00	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
10:30	27,58	27,58	27,58	27,58	27,58	25,39	29,77	27,58	27,58	25,39	29,77	25,39	29,77
11:00	29,06	29,23	29,39	29,11	29,03	27,13	31,06	29,32	28,87	26,87	31,25	26,68	31,51
11:30	29,90	30,14	30,39	30,00	29,81	28,27	31,70	30,46	29,51	27,71	32,09	27,32	32,65
12:00	31,34	31,74	32,14	31,55	31,19	30,16	32,87	32,35	30,68	29,15	33,53	28,49	34,54
12:30	32,17	32,65	33,13	32,48	31,95	31,43	33,46	33,62	31,27	29,98	34,36	29,08	35,81
13:00	35,65	36,51	37,36	36,14	35,30	35,79	36,36	37,98	34,17	33,46	37,84	31,98	40,17
13:30	37,62	38,67	39,72	38,33	37,12	38,67	37,81	40,86	35,62	35,43	39,81	33,43	43,05
14:00	41,35	42,80	44,25	42,36	40,67	43,66	40,81	45,85	38,62	39,16	43,54	36,43	48,04
14:30	43,49	45,14	46,80	44,81	42,62	46,98	42,31	49,17	40,12	41,30	45,68	37,93	51,36
15:00	46,01	47,93	49,84	47,66	44,96	50,73	44,20	52,92	42,01	43,82	48,20	39,82	55,11
15:30	47,47	49,53	51,59	49,45	46,26	53,26	45,16	55,45	42,97	45,28	49,66	40,78	57,64
16:00	45,26	47,06	48,85	47,43	43,99	51,38	42,98	53,57	40,79	43,07	47,45	38,60	55,76
16:30	44,05	45,72	47,40	46,35	42,77	50,21	41,91	52,40	39,72	41,86	46,24	37,53	54,59
17:00	38,12	39,15	40,18	40,36	37,00	43,32	36,82	45,51	34,63	35,93	40,31	32,44	47,70
17:30	34,77	35,48	36,18	36,84	33,85	38,78	34,29	40,97	32,10	32,58	36,96	29,91	43,16
18:00	31,85	32,25	32,66	33,70	31,13	34,58	32,13	36,77	29,94	29,66	34,04	27,75	38,96
18:30	30,14	30,38	30,62	31,76	29,61	31,72	31,03	33,91	28,84	27,95	32,33	26,65	36,10
19:00	29,12	29,26	29,41	30,53	28,74	29,76	30,44	31,95	28,25	26,93	31,31	26,06	34,14
19:30	28,51	28,59	28,68	29,73	28,24	28,41	30,13	30,60	27,94	26,32	30,70	25,75	32,79
20:00	28,14	28,19	28,25	29,20	27,96	27,47	29,97	29,66	27,78	25,95	30,33	25,59	31,85
20:30	27,92	27,95	27,98	28,84	27,80	26,83	29,88	29,02	27,69	25,73	30,11	25,50	31,21
21:00	27,79	27,81	27,82	28,59	27,70	26,38	29,83	28,57	27,64	25,60	29,98	25,45	30,76
21:30	27,71	27,72	27,73	28,41	27,65	26,08	29,80	28,27	27,61	25,52	29,90	25,42	30,46
22:00	27,66	27,66	27,67	28,27	27,62	25,86	29,79	28,05	27,60	25,47	29,85	25,41	30,24
22:30	27,63	27,63	27,64	28,17	27,60	25,72	29,78	27,91	27,59	25,44	29,82	25,40	30,10
23:00	27,61	27,61	27,61	28,09	27,59	25,61	29,78	27,80	27,59	25,42	29,80	25,40	29,99
23:30	27,60	27,60	27,60	28,02	27,59	25,54	29,77	27,73	27,58	25,41	29,79	25,39	29,92
00:00	27,59	27,59	27,59	27,96	27,58	25,50	29,77	27,69	27,58	25,40	29,78	25,39	29,88

Os gráficos de cada uma das análises foram plotados abaixo apresentando os resultados a partir de 8h da manhã. Isso foi feito para garantir uma melhor visualização das curvas, visto que os valores de temperatura são constantes durante a manhã até 10h30min, e só a partir deste horário é possível observar alguma variação nos resultados.

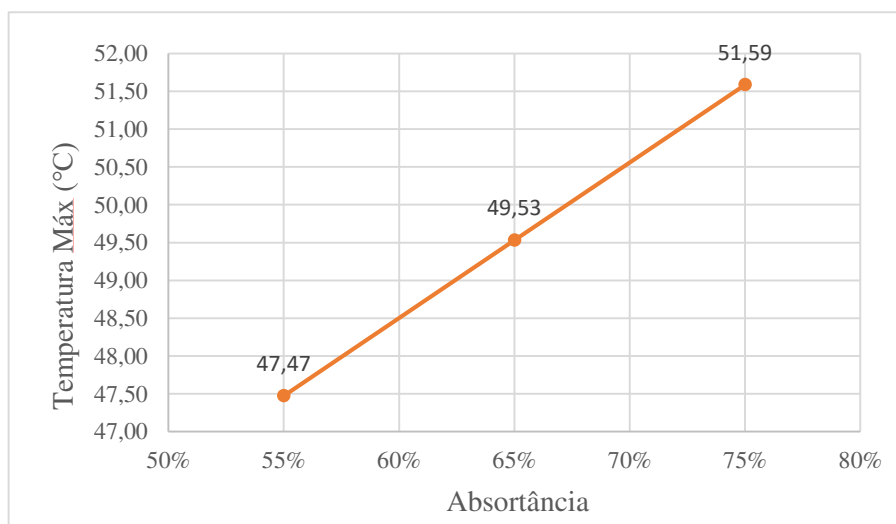
Figura 30: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da Análise 1 de “Variação dos percentuais de absorvância”



Fonte: a Autora

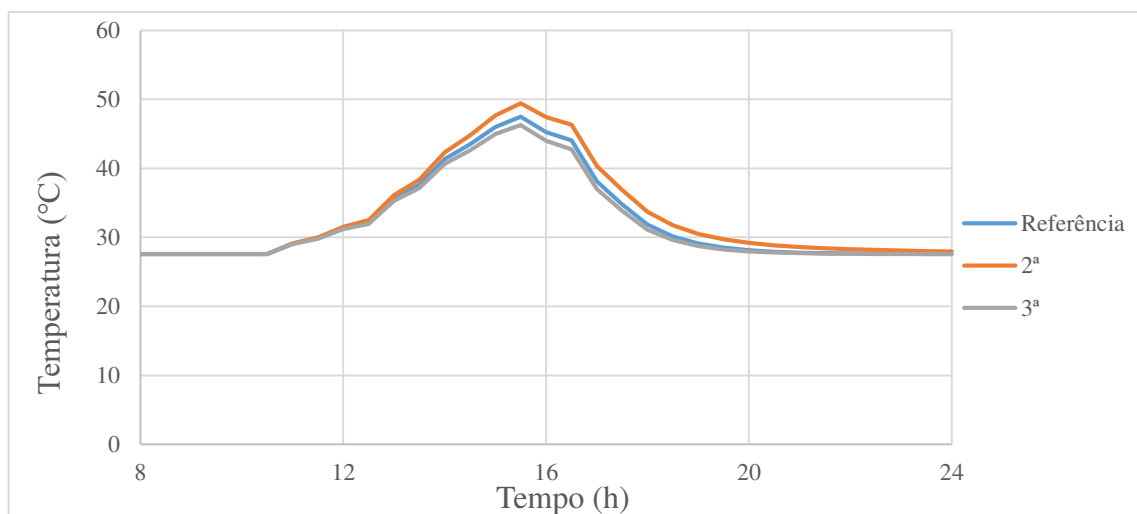
Para a primeira análise, observando os dados da Tabela 14 e o gráfico acima (Figura 30), é possível concluir que a variação da amplitude térmica foi de um incremento de 2,06°C para cada aumento de 10% no percentual de absorvância da superfície de argamassa, sugerindo uma correlação linear entre a amplitude térmica e a absorvância da superfície (Figura 31).

Figura 31: Temperatura Máx (°C) x Absorvância para Análise 1 de “Variação dos percentuais de absorvância”



Fonte: a Autora

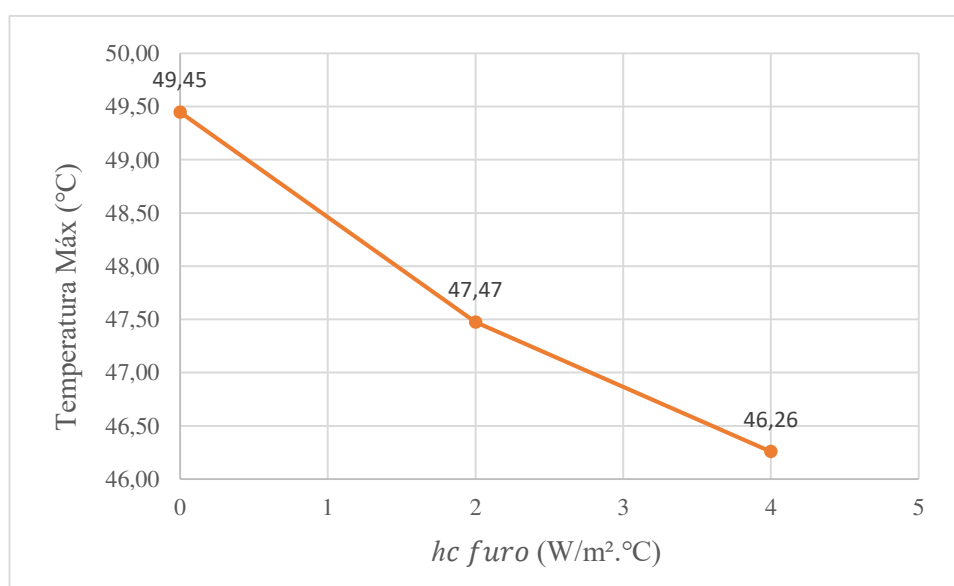
Figura 32: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da Análise 2 de “Variação do $h_{c\ furo}$ ”



Fonte: a Autora

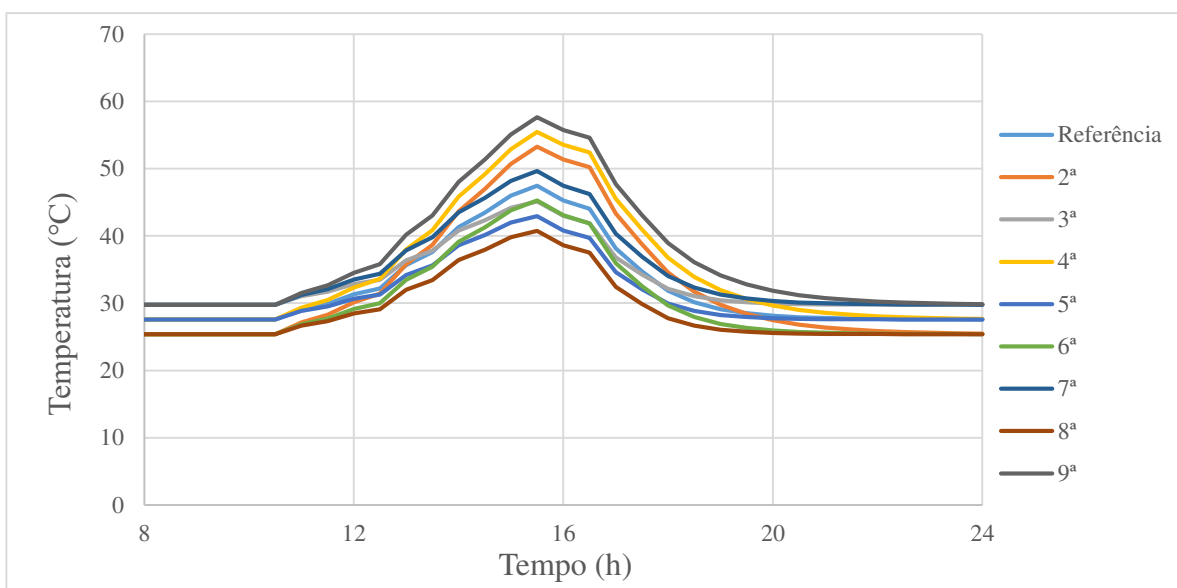
Na segunda análise, com a variação apenas do coeficiente de troca de calor convectiva nos furos da alvenaria, foi possível observar, por meio do gráfico da Figura 32, não só uma variação no pico, como também um pequeno deslocamento vertical da curva na sua descida, de forma a reduzir a variação do coeficiente angular nessa região. A diferença entre os picos da simulação de referência e da segunda simulação, em que o $h_{c\ furo}$ foi igual a 0, foi de +1,97°C, enquanto a diferença entre os picos da referência e da terceira simulação, $h_{c\ furo} = 4$ W/m².°C, foi de -1,22°C, sugerindo uma correlação não linear entre o $h_{c\ furo}$ e a amplitude térmica da fachada de argamassa (Figura 33).

Figura 33: Temperatura Máx (°C) x $h_{c\ furo}$ (W/m².°C) para Análise 2 de “Variação do $h_{c\ furo}$ ”



Fonte: a Autora

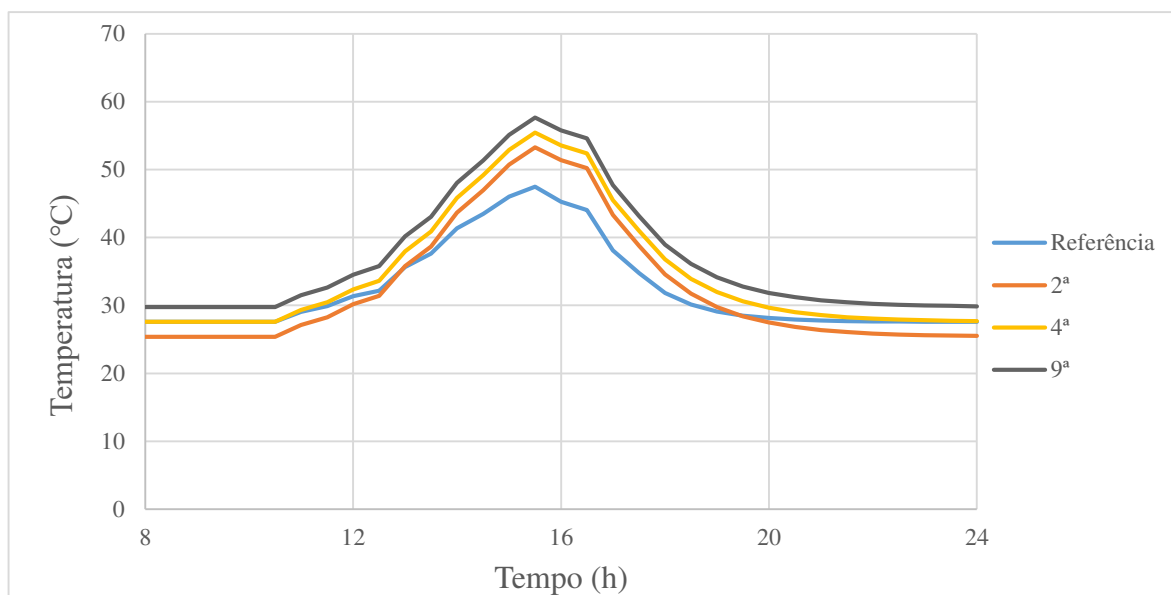
Figura 34: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) dos resultados da Análise 3 de “Variação de valores de h_c e temp. atmosférica”



Fonte: a Autora

Já na terceira análise, com resultados ilustrados na Figura 34, foi possível observar a forte interferência do vento e da temperatura atmosférica nos resultados de amplitude térmica da fachada modelada. Para as três simulações que apresentaram maior amplitude térmica, a 2ª, a 4ª e a 9ª, os valores de h_c foram iguais a $6,05 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e os valores de temperatura atmosférica foram $25,39^\circ\text{C}$, $27,58^\circ\text{C}$ e $29,77^\circ\text{C}$, respectivamente. Nesse caso as diferenças entre os valores de pico foram iguais a $2,19^\circ\text{C}$. Esse valor é igual à diferença entre os valores de temperatura atmosférica utilizados (o que é esperado no caso em que as trocas convectivas dependem pouco da temperatura ambiente), que foi adotada a partir do desvio padrão da temperatura diária. Essa mesma diferença é observada para os outros dois conjuntos de simulações com o mesmo h_c , o conjunto formado pela 3ª, 5ª e 8ª simulação, a um h_c de $14,60 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, e o conjunto formado pela simulação de referência e a 6ª e a 7ª simulação, a um h_c de $10,33 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Dessa forma, pode-se admitir que, a um mesmo valor de h_c , não há variação relevante entre as amplitudes térmicas da superfície, apenas um deslocamento vertical da curva de valor igual à diferença da temperatura atmosférica. Essa situação pode ser visualizada de maneira mais nítida no gráfico a seguir (Figura 35).

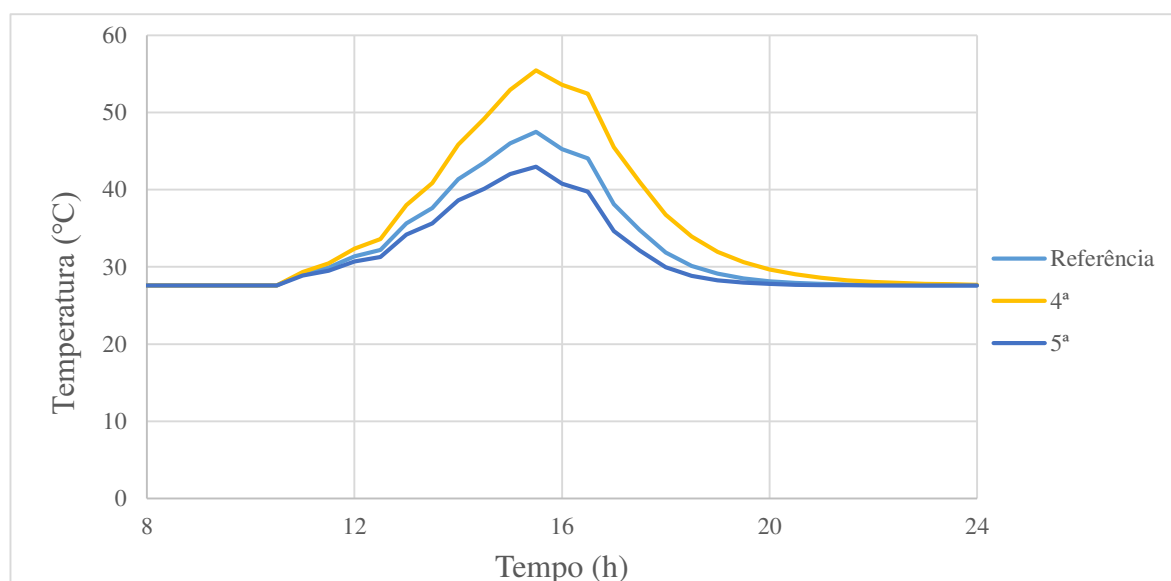
Figura 35: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) para a Análise 3 com foco nos resultados das simulações 2, 4 e 9 + simulação de referência



Fonte: a Autora

Outra situação observada nesta terceira análise foi o de casos em que houve a fixação dos valores de temperatura atmosférica e a variação do h_c . No caso das simulações 4, 5 e de referência que foram submetidas a valores de h_c iguais a $6,05 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, $14,60 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $10,33 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, respectivamente, houve uma variação dos resultados de pico de $4,51^\circ\text{C}$ da 5ª simulação para a referência e uma variação de $7,98^\circ\text{C}$ da referência para a 4ª simulação. Ou seja, não há correlação linear entre o aumento do valor de h_c e o aumento da amplitude térmica, porém, sabe-se que, quanto menor o h_c mais elevado será o pico da temperatura (Figura 36).

Figura 36: Gráfico de Temperatura (°C) x Tempo (h) para a Análise 3 com foco nos resultados das simulações 4, 5 e de referência



Fonte: a Autora

Por meio das análises foi possível perceber a alta sensibilidade do modelo às variações de vento e insolação ao longo do dia, contribuindo para o entendimento de quão relevante para a elevação da temperatura da superfície é cada uma dessas variáveis. Fica claro que essas são as principais variáveis a considerar quando se for prever amplitudes térmicas em fachadas.

5.3 Cálculo simplificado da tensão de origem térmica e risco de fadiga

Para o cálculo simplificado da tensão de origem térmica, foi montada a seguinte planilha (Tabela 15) com os resultados da Equação 1, apresentada no capítulo de revisão bibliográfica, para cada valor de amplitude térmica encontrado, sendo o coeficiente de expansão térmica e o módulo de elasticidade iguais a $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e 5,49GPa, respectivamente. Esse cálculo é feito de maneira a ilustrar a importância das amplitudes térmicas investigadas neste trabalho. É evidente que o cálculo considera impedimento total de deformações, o que na prática pode ser evitado com juntas, além de haver deformações de outros materiais em contato com a argamassa que podem aliviar parte das tensões calculadas. Além disso, o estado de tensões real é bastante mais complexo que o considerado. Ainda assim, há utilidade em ilustrar a importância do estudo quanto ao impacto de diferentes valores das amplitudes térmicas investigadas.

Tabela 15: Valores de tensão térmica para módulo de elasticidade de 5,49GPa para os resultados de ΔT obtidos de por meio do modelo computacional e do ensaio de aferição térmica

		Modelo		Ensaio	
		Centro	Ponta	Centro	Ponta
SVP	$\Delta T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	35,87	33,88	41,34	39,01
	$\sigma \text{ (MPa)}$	2,26	2,14	2,61	2,46
SVSC	$\Delta T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	24,86	24,36	26,24	26,39
	$\sigma \text{ (MPa)}$	1,57	1,54	1,66	1,67
SVB	$\Delta T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	15,69	16,43		
	$\sigma \text{ (MPa)}$	0,99	1,04		

Fonte: a Autora

Finalmente, na intenção de calcular a quantidade de ciclos que uma argamassa de fachada em condições reais de vento e insolação pode aguentar sem que ocorra prejuízo ao material, os valores de tensão obtidos anteriormente foram aplicados na Equação 3 e na Equação 4, descritas no tópico 3.1.4 deste trabalho, referentes à resistência à fadiga.

Os resultados para a verificação da resistência à fadiga por tração foram organizados na planilha abaixo (Tabela 16), onde as tensões são os resultados de tensões de origem térmica do cálculo anterior, $\log N$ é a variável “X” da Equação 3, N representa o nº de ciclos para a falha por fadiga para carregamento de tração, que neste trabalho é interpretado em

dias (visto que diariamente a superfície da argamassa atinge um valor máximo e um valor mínimo com ciclos diários) e “anos” representa o tempo de vida do material em anos (esse valor é o resultado da divisão de N por 365).

Tabela 16: Resultados do cálculo de nº de ciclos de resistência à fadiga considerando ciclos de tração em argamassas para módulo de elasticidade de 5,49GPa

		Modelo		Ensaio	
		Centro	Ponta	Centro	Ponta
SVP	σ (MPa)	2,26	2,14	2,61	2,46
	logN	-	-	-	-
	N	1,00	1,00	1,00	1,00
	Anos	0,00	0,00	0,00	0,00
SVSC	σ (MPa)	1,57	1,54	1,66	1,67
	logN	-	-	-	-
	N	1,00	1,00	1,00	1,00
	Anos	0,00	0,00	0,00	0,00
SVB	σ (MPa)	0,99	1,04		
	logN	3,35	3,05		
	N	2235,05	1126,44		
	Anos	6,12	3,09		

Fonte: a Autora

Considerando uma curva de Wöhler como a apresentada na Figura 7, observa-se que, para um módulo de elasticidade igual a 5,49GPa, o limite de fadiga é 0,65MPa para esforços de tração, esse valor é muito inferior a todos os valores de tensão de origem térmica obtidos experimentalmente neste trabalho, levando a concluir que, no que diz respeito a esse tipo esforços, não só todas as amostras de fachada de argamassa romperiam, como a maioria (todos os resultados de SVP e SVSC) nem sofreria propriamente fadiga, pois romperiam logo no primeiro ciclo, visto que não existem valores de referência na curva S-N de tração de nº de ciclos para valores de tensão superiores a 1,5165MPa.

Já os valores de tensão obtidos para a superfície branca foram os únicos que se apresentaram entre 0,65MPa e 1,5165MPa, ou seja, passariam por um processo de fadiga, de forma que pôde ser calculado o tempo de vida desse material. Os resultados foram de 6,12 anos para o ponto central e 3,09 anos para a ponta da placa de argamassa, valores da ordem de grandeza dos períodos de garantia empregados em edificações. Considerando que os ciclos térmicos provoquem ciclos de tração no material, mesmo em uma fachada ensolarada com cobertura branca, após pouco mais de 3 anos já seria possível observar manifestações patológicas relacionadas à fadiga térmica.

Em seguida, o mesmo raciocínio foi aplicado para o cálculo do número de ciclos de resistência à fadiga para esforços de compressão. Nesse caso, foi utilizada a Equação 4, referente à curva S-N de compressão no gráfico da Figura 7. Da mesma forma do caso anterior,

os resultados para a verificação da resistência à fadiga por compressão foram organizados em uma planilha (Tabela 17), onde as tensões apresentadas são as mesmas tensões de origem térmica calculadas inicialmente neste tópico, $\log N$ é a variável “X” da Equação 4, N representa o nº de ciclos suportado por esse material em ciclos de compressão e “anos” representa o tempo de vida em anos do material.

Tabela 17: Resultados do cálculo de nº de ciclos de resistência à fadiga considerando ciclos de compressão em argamassas para módulo de elasticidade de 5,49GPa

		Modelo		Ensaio	
		Centro	Ponta	Centro	Ponta
SVP	σ (MPa)	2,26	2,14	2,61	2,46
	$\log N$	4,14	4,45	3,30	3,66
	N	13802,63	27921,31	1985,19	4535,18
	Anos	37,82	76,50	5,44	12,43
SVSC	σ (MPa)	1,57	1,54	1,66	1,67
	$\log N$	-	-	-	-
	N	-	-	-	-
	Anos	-	-	-	-
SVB	σ (MPa)	0,99	1,04		
	$\log N$	-	-		
	N	-	-		
	Anos	-	-		

Fonte: a Autora

Novamente foi considerada a curva de Wöhler do material como a apresentada na Figura 7, a um módulo de elasticidade igual a 5,49GPa o limite de fadiga é igual a 1,70MPa. Nesse caso, a maioria dos valores de tensão encontrados estão abaixo do limite de fadiga, ou seja, os materiais não sofreriam danos por fadiga mesmo submetidos a uma quantidade muito grande de ciclos. É o caso dos resultados de SVSC e SVB. Já com os resultados de tensão obtidos para a SVP, foi possível calcular o número de ciclos até a falha, visto que, diferente do que ocorreu no caso de esforços à tração, os valores de tensão para essa superfície estão abaixo do coeficiente linear da curva de compressão, sendo este igual 3,96MPa.

É possível perceber que o cálculo do número de ciclos é muito sensível à variação da tensão, de forma que, a exemplo dos valores de tensão obtidos por meio do modelo computacional, uma diferença de 0,12MPa entre o resultado do centro (2,26MPa) e o resultado da ponta (2,14MPa), foi suficiente para mais que dobrar a vida útil do material.

Sublinha-se que os esforços que devem existir na argamassa não são nem somente de compressão nem somente de tração e que o exercício é ilustrativo. Como uma última ilustração de fatores importantes no comportamento de fadiga em consequência do comportamento térmico das argamassas, as Tabelas 18, 19 e 20 representadas abaixo mostram os resultados que teriam sido obtidos para tensão de origem térmica, nº de ciclos de resistência

à fadiga por tração e nº de ciclos de resistência à fadiga por compressão, respectivamente, considerando um módulo de elasticidade da argamassa de 11,17GPa.

Tabela 18: Valores de tensão térmica para módulo de elasticidade de 11,17GPa para os resultados de ΔT obtidos de por meio do modelo computacional e do ensaio de aferição térmica

		Modelo		Ensaio	
		Centro	Ponta	Centro	Ponta
SVP	ΔT (°C)	35,87	33,88	41,34	39,01
	σ (MPa)	4,61	4,35	5,31	5,01
SVSC	ΔT (°C)	24,86	24,36	26,24	26,39
	σ (MPa)	3,19	3,13	3,37	3,39
SVB	ΔT (°C)	15,69	16,43		
	σ (MPa)	2,02	2,11		

Fonte: a Autora

Tabela 19: Resultados do cálculo de nº de ciclos de resistência à fadiga considerando ciclos de tração em argamassas para módulo de elasticidade de 11,17GPa

		Modelo		Ensaio	
		Centro	Ponta	Centro	Ponta
SVP	σ (MPa)	4,61	4,35	5,31	5,01
	logN	-	-	-	-
	N	1,00	1,00	1,00	1,00
	Anos	0,00	0,00	0,00	0,00
SVSC	σ (MPa)	3,19	3,13	3,37	3,39
	logN	-	-	-	-
	N	1,00	1,00	1,00	1,00
	Anos	0,00	0,00	0,00	0,00
SVB	σ (MPa)	2,02	2,11		
	logN	-	-		
	N	1,00	1,00		
	Anos	0,00	0,00		

Fonte: a Autora

Tabela 20: Resultados do cálculo de nº de ciclos de resistência à fadiga considerando ciclos de compressão em argamassas para módulo de elasticidade de 11,17GPa

		Modelo		Ensaio	
		Centro	Ponta	Centro	Ponta
SVP	σ (MPa)	4,61	4,35	5,31	5,01
	logN	-	-	-	-
	N	1,00	1,00	1,00	1,00
	Anos	0,00	0,00	0,00	0,00
SVSC	σ (MPa)	3,19	3,13	3,37	3,39
	logN	1,88	2,03	1,44	1,40
	N	75,08	107,61	27,70	24,86
	Anos	0,21	0,29	0,08	0,07
SVB	σ (MPa)	2,02	2,11		
	logN	4,75	4,52		
	N	56044,32	32861,40		
	Anos	153,55	90,03		

Fonte: a Autora

Analisando as tabelas acima, percebe-se que os valores de tensão obtidos para um módulo de elasticidade de 11,17GPa são aproximadamente o dobro dos valores obtidos para um módulo igual a 5,49GPa, situação prevista já que um valor de módulo é quase a metade do outro e na Equação 1 E é um fator multiplicador. Além disso, diante dos elevados valores de tensão calculados, nenhuma das amostras resistiria a mais de um ciclo se submetidas a esforços de tração dessa magnitude. Por fim, se submetidas a compressão, apenas as amostras sem cobertura e as amostras pintadas de branco resistiriam a mais de um ciclo de carga, porém, em algum momento, todas romperiam por fadiga a ciclos de compressão.

Diante disso, ilustra-se que, nas condições climáticas a que uma fachada ensolarada localizada na cidade de Fortaleza é exposta, e considerando valores de coeficiente de expansão térmica e o módulo de elasticidade iguais a $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e 5,49GPa, respectivamente, há risco de ocorrência de fadiga térmica em argamassas de fachada. Módulos e coeficientes de expansão maiores levariam a risco de fadiga em idades mais precoces, assim como materiais com menor resistência à fadiga.

Ademais, acredita-se que a situação de ciclos de compressão se relaciona melhor com a realidade, pois, admitindo-se que a posição de equilíbrio seja quando a argamassa está na sua temperatura mais baixa (em torno de 25°C), no momento em que ela sofre variação de temperatura ela tende a dilatar, o que gera um impedimento contrário, sendo esse um esforço de compressão.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Por meio deste trabalho, foi possível investigar o comportamento térmico de argamassas de fachada e os fatores ambientais que estão envolvidos nas trocas de calor presentes nessas superfícies, facilitando o entendimento de como cada parâmetro interfere na variação da temperatura e como escolhas de projeto, como a cor e a posição da fachada, são relevantes para o aumento ou não da tensão de origem térmica. Isso foi realizado tanto com utilização de um experimento inédito na UFC quanto por meio de simulações computacionais correspondentes. O ensaio de aferição de temperatura desenvolvido possibilitou demonstrar de forma prática o quanto a variação da amplitude térmica em argamassas de fachada pode resultar em elevados valores de tensão de origem térmica e consequente aumento do risco de dano por fadiga térmica em tais elementos. O desenvolvimento do modelo computacional para a previsão do comportamento térmico em fachadas ensolaradas surge como uma solução viável para auxiliar na tomada de decisão em projetos de engenharia, particularmente quanto à estratégias necessárias a fim de mitigar os efeitos da fadiga térmica em argamassas. Também foi possível calcular de maneira simplificada o valor da tensão de origem térmica para fachadas ensolaradas submetidas a diferentes absorptâncias, de maneira a ilustrar a importância da investigação das amplitudes térmicas.

Com os resultados obtidos neste trabalho, foi possível concluir que:

- os percentuais de diferença entre as amplitudes térmicas registradas pelo ensaio e pelo modelo computacional para cada tipo de amostra permitem concluir uma boa exatidão do resultado das simulações com relação aos valores aferidos em campo;
- superfícies com cores mais claras podem apresentar uma redução da amplitude térmica diária em comparação a superfícies mais escuras de até 56,26%, sugerindo uma vida útil mais prolongada do material;
- existe correlação linear entre a amplitude térmica de argamassas de fachada e a absorptância de suas superfícies e que não há correlação linear entre o aumento do valor de h_c e o aumento da amplitude térmica, porém, sabe-se que, quanto menor o h_c , mais elevado será o pico da temperatura;
- a um mesmo valor de h_c , não há variação relevante entre as amplitudes térmicas de uma superfície, apenas um deslocamento vertical da curva do gráfico, sendo esse deslocamento de valor igual à diferença da temperatura atmosférica entre as simulações e que a existência ou não de trocas de calor convectivas dentro dos furos da alvenaria é bastante relevante para a regulação da temperatura da argamassa de fachada;

- o modelo possui alta sensibilidade às variações de vento e insolação ao longo do dia, contribuindo para o entendimento de quão relevante para a elevação da temperatura da superfície é cada uma dessas variáveis, sendo essas as principais variáveis a considerar quando se for prever amplitudes térmicas em fachadas, visto que estão intrinsecamente relacionadas com os valores de coeficiente de trocas de calor convectivas e fluxo de calor incidente na superfície, respectivamente.
- a simulação computacional é apresentada como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão na engenharia, em especial com relação à prevenção de fadiga em argamassas de fachada, sendo a dosagem da argamassa (em função de propriedades de módulo de elasticidade e resistência à fadiga) e a coloração das superfícies a serem adotadas exemplos de tomada de decisão possivelmente impactadas;

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se um estudo mais aprofundado das características meteorológicas e suas variações de acordo com a locação das edificações e as mudanças de posição do sol e das estações climáticas no decorrer do ano, a fim de trazer melhorias para o modelo de previsão do comportamento térmico do material. Isso se faz interessante visto que, apesar de neste trabalho ter sido obtida uma boa proximidade entre os resultados da modelagem e da aferição real da temperatura para a superfície de fachada sem cobertura, os resultados obtidos por meio da modelagem para a superfície preta poderiam ser ainda mais próximos dos valores reais.

Também nesse sentido, faz-se importante a obtenção do valor real de absorvância da cor natural da argamassa, para uma comparação mais assertiva entre os resultados de temperatura da superfície com diferentes cobrimentos, e um estudo mais específico voltado para a interferência real do ar contido nos furos de uma parede de alvenaria cerâmica na regulação de temperatura da parede. São parâmetros importantes na previsão das amplitudes térmicas, portanto terão impacto nos riscos de fadiga de superfícies argamassadas.

A influência do tamanho da placa de argamassa tanto nas simulações como em fachadas reais também é um fator que poderia ser estudado com mais profundidade. Este trabalho tinha inicialmente a proposta de estudar também modelos computacionais de placas de argamassa de maiores dimensões, sendo essas quadradas, tanto de 100cm como de 150cm de lado, porém, visto a limitação da versão estudantil do *software* Ansys na criação de malhas com muitos elementos, esse estudo não pôde ser realizado, devendo ser retomado no futuro.

Ainda, a fim de avaliar com maiores detalhes o comportamento mecânico das argamassas de fachada, sugere-se a criação de um modelo computacional para a análise

mecânica do sistema, de forma a comparar os resultados de tensão obtidos pelo cálculo ilustrativo deste trabalho.

Outra proposta de estudo seria a de realizar uma comparação entre as amplitudes térmicas de fachadas ensolaradas e não ensolaradas a um mesmo percentual de absorvência da superfície, a fim de contribuir para a literatura com valores de amplitude térmica de fachadas para esses dois tipos de insolação.

Por fim, pode-se avaliar como o revestimento cerâmico, utilizado com grande frequência em edifícios em cidades do nordeste brasileiro, interfere na variação de temperatura das argamassas colantes e se essa variação é ou não relevante na geração de danos por fadiga nesse material.

REFERÊNCIAS

- AECWEB. **Como escolher revestimentos cerâmicos e evitar patologias**. 2019. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/como-escolher-revestimentos-ceramicos-e-evitar-patologias/6088>. Acesso em: 01/07/2022, às 10h.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Manual de revestimentos de argamassa**. 1. ed. São Paulo, SP, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-1: edificações habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- BALBO, J. T. **Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga**. In: Anais da 32ª Reunião Anual de Pavimentação. Brasília: ABPv, 2000, v. 1, pp. 391-404.
- BAUER, E; PIAZZAROLLO, C. B.; SOUZA, J. S. DE; SANTOS, D. G. **Relative importance of pathologies in the severity of facade degradation**. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, v. 5, n. 1, p. 1-10, 2020.
- BAUER, E.; SOUZA, J. S.; MOTA, L. M. G. **Degradação de fachadas revestidas em argamassas nos edifícios de Brasília, Brasil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 23-43, out./dez. 2021.
- CALLISTER, W. D. Jr. **Materials Science and Engineering: an introduction**. 7ª edição, 2007.
- DEFRAEYE, T.; BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. **Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling**. Energy Conversion and Management, v. 52, n. 1, p. 512-522, 2011.
- DORNELLES, K. A.; CARAM, R. M.; SICHIERI, E. P. **Absortância solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo**. Paranoá, Brasília, no 12, p. 55-64, 2014.
- GASPAR, P.; BRITO, J. DE. **Mapping defect sensitivity in external mortar renders**. Construction and Building Materials, 2005.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7ª edição, 2010.
- HUANG, Y.; LIU, G.; HUANG, S.; RAO, R.; HU, C. **Experimental and finite element investigations on the temperature field of a massive bridge pier caused by the hydration heat of concrete**. Construction and Building Materials, v. 192, p. 240–252, 2018.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Transferência de Calor e de Massa**. 7ª edição, 2014.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Tabelas de dados das estações**. Disponível em: www.inmet.gov.br. Acesso em: 15/11/2022, às 18h.

KACHKOUCH, F. Z.; NOBERTO, C. C.; BABADOPULOS, L. F. *et al.*, **Fatigue behavior of concrete: A literature review on the main relevant parameters**. Construction and Building Materials, 2022.

LIU, G. R. **A generalized gradient smoothing technique and the smoothed bilinear form for galerkin formulation of a wide class of computational methods**. International Journal of Computational Methods. 2008.

MIRLISENNA, Giuseppe. **Método dos elementos finitos: o que é?** Blog ESSS, 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 10/07/2022, às 13h20

NALON, G. H.; ALVES, M. A.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L.; FERNANDES, W. E. H.; OLIVEIRA, D. S. **Compressive strength, dynamic, and static modulus of cement - lime laying mortars obtained from samples of various geometries**. Em: Journal of Building Engineering, 2021.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 2ª Ed. Porto Alegre, Bookman, 2004.

PINCA-BRETOTEAN, C.; BHANDARI, R.; SHARMA, C. *et al.*, **An investigation of thermal behaviour of brake disk pad assembly with Ansys**. Materials Today: Proceedings, 2021.

SILVA, A.; DIAS, J. L.; GASPAR, P. L.; BRITO, J. DE. **Statistical models applied to service life prediction of rendered façades**. Automation in Construction, 2013.

SUNEARTHTOOLS. **Sun Position**. Disponível em: <https://www.sunearthtools.com>. Acesso em: 15/11/2022, à 18h

TOYAMA, H.; KISHIDA H.; YONEZU A. **Characterization of fatigue crack growth of concrete mortar under cyclic indentation loading**. Engineering Failure Analysis, 2017.

UCHÔA, J. C. B. **Procedimento numérico e experimental para a avaliação da resistência à fadiga em sistema de revestimento**. Dissertação de mestrado da Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, Distrito Federal, 2007. 159 p

VIEIRA, D. DA S.; COELHO, N. DE A. **Utilização do método dos elementos finitos no estudo térmico de elementos simples de concreto**. RCT – Revista de Ciência e Tecnologia, 2020.