



INSTITUTO FEDERAL

Sertão Pernambucano

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO
PERNAMBUCANO
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS SERRA TALHADA**

ALEXANDRE BARBOSA DA ROCHA

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE TELHADOS CERÂMICOS:
UMA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE TELHAS PINTADAS EM CORES
CLARAS**

SERRA TALHADA

2023

ALEXANDRE BARBOSA DA ROCHA

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE TELHADOS CERÂMICOS: UMA AVALIAÇÃO
DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE TELHAS PINTADAS EM CORES CLARAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, campus Serra Talhada, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Me. Vitor Hugo de Oliveira Barros.

Coorientador(a): Me. Álvaro Barbosa da Rocha.

SERRA TALHADA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R672 Rocha, Alexandre Barbosa da.

Comportamento térmico de telhados cerâmicos : uma avaliação da eficiência térmica de telhas pintadas em cores claras / Alexandre Barbosa da Rocha. - Serra Talhada, 2023.
67 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) -Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Serra Talhada, 2023.

Orientação: Prof. Msc. Vitor Hugo de Oliveira Barros.
Coorientação: Msc. Álvaro Barbosa da Rocha.

1. Engenharia civil. 2. Transferência de calor. 3. Telhas cerâmicas. 4. Telhas pintadas. I. Título.

CDD 624

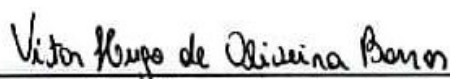
ALEXANDRE BARBOSA DA ROCHA

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE TELHADOS CERÂMICOS: UMA AVALIAÇÃO
DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE TELHAS PINTADAS EM CORES CLARAS

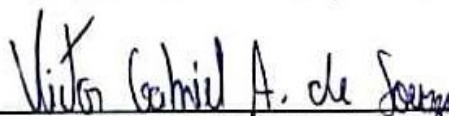
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação do curso de
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão
Pernambucano, campus Serra Talhada,
como requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 19/12/23.

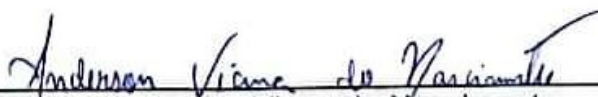
BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Vitor Hugo de Oliveira Barros
Orientador
IFSertãoPE – Campus Serra Talhada



Prof. Me. Victor Gabriel Alves de Souza
Examinador Interno
IFSertãoPE – Campus Serra Talhada



Me. Anderson Viana do Nascimento
Examinador Externo

SERRA TALHADA

2023

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a influência da pintura em cores claras na redução da transferência de calor em telhados, na cidade de Serra Talhada, onde as temperaturas frequentemente ultrapassam os 38°C nos meses mais quentes. Com isso, essa pesquisa torna-se relevante para identificar estratégias que contribuam para um ambiente interno mais confortável. A metodologia adotada envolveu testes experimentais na Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), onde foram feitas medições da temperatura na superfície superior e inferior de telhas cerâmicas em seu estado natural e após serem pintadas com diferentes demãos de tinta branca. Além disso, foi desenvolvido um script em Python para simular o comportamento térmico das telhas cerâmicas através das equações de transferência de calor. Os resultados experimentais mostram uma redução de até 14,21°C (25,60%) na superfície superior das telhas cerâmicas quando pintadas com diferentes demãos de tinta branca. De forma semelhante, os resultados obtidos pelas simulações numéricas revelaram uma redução de 15,61°C (28,01%). A semelhança entre os dados experimentais e numéricos indica que a metodologia utilizada se adequa bem aos resultados obtidos em campo, e dá uma segurança nos resultados para as condições definidas, isso permite considerar sobre como soluções simples podem melhorar as condições habitacionais, em especial em áreas com clima tão intenso quanto a cidade de Serra Talhada.

Palavras-chave: transferência de calor; telhas cerâmicas; telhas pintadas.

ABSTRACT

This work aims to analyze the influence of painting in light colors on the reduction heat transfer in roofs, in the city of Serra Talhada, where temperatures frequently exceed 38°C in the hottest months. Thus, this research becomes relevant to identify strategies that contribute to a more comfortable indoor environment. The adopted methodology involved experimental tests at the Academic Unit of Serra Talhada (UAST), where temperature measurements were taken on the upper and lower surfaces of ceramic tiles in their natural state and after being painted with different coats of white paint. In addition, a Python script was developed to simulate the thermal behavior of ceramic tiles based on heat transfer equations. The experimental results show a reduction of up to 14.21°C (25.60%) on the upper surface of ceramic tiles when painted with different coats of white paint. Similarly, the results obtained from numerical simulations revealed a reduction of 15.61°C (28.01%). The similarity between experimental and numerical data indicates that the methodology used fits well with the results obtained in the field, providing confidence in the results for the defined conditions, this allows consideration of how simple solutions can improve housing conditions, especially in areas with as intense a climate as Serra Talhada.

Keywords: heat transfer; ceramic tiles; painted tiles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Balanço de energia para qualquer sistema sofrendo qualquer processo..	20
Figura 2 - Balanço de energia para transferência de calor para telhado.	21
Figura 3 - Ganho de calor do telhado por convecção e radiação.	21
Figura 4 - Análise termográfica das variações de temperatura em superfícies.	23
Figura 5 - Temperatura e absorvância solar de diferentes tipos de cores.	24
Figura 6 - Localização da área de coleta de dados.	28
Figura 7 - Disposição de telhas cerâmicas com diferentes níveis de pintura.	29
Figura 8 - Pontos de controle térmico da superfície superior e inferior.	30
Figura 9 - Termômetro Infravermelho Dugold - DG380.	31
Figura 10 - Representação dos mecanismos de transferência de calor que incidem nas telhas cerâmicas.	34
Figura 11 - Representação do volume de controle para o problema de transferência de calor em telhas cerâmicas.	35
Figura 12 - Fluxograma da execução do código desenvolvido para análise de transferência de calor.	39
Figura 13 - Comparativo entre os valores de temperatura superior para cada grupo de telhas cerâmicas.	44
Figura 14 - Comparativo entre os valores de temperatura inferior para cada grupo de telhas cerâmicas.	45
Figura 15 - Dados experimentais e numéricos da superfície superior da amostra TO ajustados pela regressão linear.	46
Figura 16 - Dados experimentais e numéricos da superfície inferior da amostra TO ajustados pela regressão linear.	46
Figura 17 - Comportamento dos resultados numéricos da temperatura superior das telhas cerâmicas.	49
Figura 18 - Comportamento dos resultados numéricos da temperatura inferior das telhas cerâmicas.	50
Figura 19 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 10:00.	64
Figura 20 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 11:00.	64
Figura 21 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 12:00.	64
Figura 22 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 13:00.	64
Figura 23 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 14:00.	64

Figura 24 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 15:00.....	64
Figura 25 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 10:00.	65
Figura 26 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 11:00.....	65
Figura 27 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 12:00.	65
Figura 28 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 13:00.	65
Figura 29 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 14:00.	65
Figura 30 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 15:00.	65
Figura 31 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 10:00.....	66
Figura 32 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 11:00.....	66
Figura 33 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 12:00.....	66
Figura 34 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 13:00.....	66
Figura 35 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 14:00.....	66
Figura 36 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 15:00.....	66
Figura 37 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 10:00.	67
Figura 38 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 11:00.	67
Figura 39 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 12:00.	67
Figura 40 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 13:00.	67
Figura 41 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 14:00.	

.....	67
Figura 42 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 15:00.	
.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades térmicas de materiais e componentes construtivos.	26
Tabela 2 - Absortância (a) para radiação solar e emissividade (e).	27
Tabela 3 - Propriedades térmicas empregadas na análise numérica.	37
Tabela 4 - Parâmetros empregados na análise numérica.	37
Tabela 5 - Classificação da correlação linear.	40
Tabela 6 - Comportamento médio da temperatura ambiente (°C) para os dias de experimentação.	41
Tabela 7 - Comportamento médio da radiação solar (W/m ²) para os dias de experimentação.	41
Tabela 8 - Temperatura aferida para o grupo (TO) em °C para os dias de medição.	42
Tabela 9 - Temperatura aferida para o grupo (T1) em °C para os dias de medição.	42
Tabela 10 - Temperatura aferida para o grupo (T2) em °C para os dias de medição.	43
Tabela 11 - Temperatura aferida para o grupo (TB) em °C para os dias de medição.	43
Tabela 12 - Coeficientes de regressão linear para ajuste dos dados.	47
Tabela 13 - Comparação entre os dados experimentais e numéricos para a Telha original (TO).	47
Tabela 14 - Comparação entre os dados experimentais e numéricos para a Telha com uma demão de tinta branca (T1).	47
Tabela 15 - Comparação entre os dados experimentais e numéricos para a Telha com duas demãos de tinta branca (T2).	48
Tabela 16 - Comparação entre os dados experimentais e numéricos para a Telha completamente branca (TB).	48
Tabela 17 - Classificação dos coeficientes de Pearson para a superfície superior dos casos analisados.	50
Tabela 18 - Classificação dos coeficientes de Pearson para a superfície inferior dos casos analisados.	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12-15
1.1	Objetivo geral	14-15
1.2	Objetivos específicos.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16-27
2.1	Transferência de calor	16
2.2	Mecanismos de transferência de calor.....	16-19
2.2.1	Condução	17-18
2.2.2	Convecção	18
2.2.3	Radiação	19
2.3	Processos quase-estáticos	20
2.4	Balanco de energia.....	20-21
2.5	Ilhas de calor urbano e suas implicações no conforto térmico	21-22
2.6	Uso de tintas na construção civil	22-23
2.7	Telhados frios como estratégia de mitigação das ilhas de calor urbano.....	23-25
2.8	Propriedades térmicas dos materiais e componentes construtivos	26-27
3	METODOLOGIA	28-40
3.1	Área experimental	28
3.2	Procedimento experimental	29-30
3.3	Coleta de dados.....	30-32
3.4	Modelagem matemática do problema com Python	32-33
3.5	Hipóteses simplificadoras adotadas	33-34
3.6	Modelagem matemática	34-36
3.7	Análise térmica com Python.....	36-39
3.8	Análise de dados	39-40
4	RESULTADOS	41-52
4.1	Apresentação dos dados experimentais	41-45
4.2	Resultados numéricos	45-52
5	CONCLUSÃO	53-54
	REFERÊNCIAS	55-60
	APÊNDICE A – SCRIPT DA SIMULAÇÃO EM PYTHON	61-63
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DO GRADIENTE TÉRMICO DA TELHA	64-67

1 INTRODUÇÃO

A cidade de Serra Talhada, localizada no sertão pernambucano, apresenta um clima semiárido com características que incluem, principalmente: baixa precipitação pluviométrica, com longos períodos de seca e chuvas concentradas em poucos meses do ano; temperaturas elevadas; baixa umidade relativa do ar e irradiação solar intensa (Nimer, 1989).

De acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (2023) e com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2023), a temperatura média anual em Serra Talhada é de cerca de 26,2°C, com média diária anual de irradiação solar de aproximadamente 5,8 kWh/m². Durante os meses mais quentes, a média atinge valores próximos a 6,8 kWh/m²/dia, elevando a temperatura média em até 2,6°C.

As construções civis da cidade de Serra Talhada utilizam, principalmente, telhas cerâmicas do tipo colonial como padrão de cobertura. Essas telhas apresentam algumas propriedades térmicas que podem afetar o conforto térmico no interior do ambiente, a exemplo: condutividade térmica, densidade de massa aparente e calor específico (Bauer, 2019).

Os telhados são estruturas expostas ao ambiente externo, estando sujeitos à radiação solar direta, conseqüentemente, influenciando diretamente o conforto térmico em seu interior. Callister Jr. (2020) destaca que materiais cerâmicos, como as telhas, apresentam uma baixa condutividade térmica devido à presença significativa de poros preenchidos com ar, limitando a transferência de calor, tornando-a ineficiente.

Por outro lado, apesar de serem reconhecidas como péssimos condutores de calor, as telhas apresentam capacidade de absorver e armazenar calor. Essa habilidade, chamada de inércia térmica, é determinada pelo produto entre a densidade, o volume e o calor específico, e representa a capacidade de um material de armazenar calor (Buxton, 2017). Ou seja, as telhas possuem a capacidade de absorver calor de forma gradual e armazenar em sua estrutura, liberando-o lentamente ao longo do tempo.

Nesse sentido, de maneira experimental, Levison, Berdahl e Akbari (2005) demonstraram que as cores têm uma influência significativa na quantidade de calor absorvido e transmitido para dentro da edificação. Através de suas análises, observou-se que os pigmentos classificados como “frios” demonstraram alta capacidade de

refletir a maior parte da radiação solar responsável pelo aquecimento dos telhados. O aumento da refletância solar dos telhados contribui para a redução da sua temperatura superficial, afetando a temperatura interna e, por consequência, o consumo de energia para refrigeração desses ambientes.

De acordo com a NBR 15220-3, 99,2% do território nacional apresenta orientações para o conforto térmico durante o verão, e para essas regiões ter um ambiente térmico mais quente significaria uma redução no conforto térmico, então quanto mais escura for a cor da telha, maior será a absorção e retenção de calor, implicando em um ambiente com menor conforto térmico.

A telha cerâmica pode ser encontrada em diversas cores, dependendo do fabricante e das preferências do cliente, sendo as cores mais comuns o vermelho e o marrom. As cores mais escuras, como o vermelho ou marrom, absorvem mais calor do sol do que cores claras, como branco ou cinza claro. No entanto, Dornelles (2008) destaca a necessidade de entender que as cores são percepções visuais, e que podem ser interpretadas de maneira diferentes entre indivíduos. Geralmente, as cores mais claras apresentam a tendência a refletir mais radiação nos espectros visível e infravermelho, em oposição as cores mais escuras que absorvem mais dessa radiação. Além da influência da cor, destaca-se os efeitos da rugosidade, onde a presença de micro irregularidades e imperfeições torna a superfície propensa a captar parte da radiação que deveria ser refletida após o contato com a superfície.

Estudos realizados por Akbari e Levinson (2008) e Akbari, Menon e Rosenfeld (2008), apontam que os telhados frios, também conhecidos “cool roofs”, apresentam diversas vantagens como: redução da temperatura interna das edificações, promovendo um aumento no conforto térmico, devido à menor transferência de calor para o interior da estrutura; redução da necessidade de ar-condicionado ou ventiladores, pois as temperaturas mais baixas do telhado reduzem o fluxo de calor para o interior do edifício; diminuição significativa do consumo de energia elétrica; redução das emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa e redução dos efeitos das ilhas de calor urbano; e, aumento da durabilidade da cobertura, uma vez que a reflexão da luz solar reduz a exposição às altas temperaturas, reduzindo a degradação do telhado e necessidade de manutenção.

Diante da necessidade de buscar soluções para minimizar a transferência de calor pelas telhas, vários autores buscaram alternativas para satisfazer essas investigações, através da adoção de materiais isolantes reflexivos, ou isolantes

térmicos. Michels (2007) estudou a transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes na cidade de Florianópolis-SC, com o estudo, o autor fez uso de materiais altamente reflexivos, como o alumínio, almejando que grande parte da radiação solar fosse refletida e assim impedida a sua transferência para o interior da edificação. Sena (2022) analisou a viabilidade do uso de telhados verdes na cidade de Crateús-CE, os telhados verdes funcionam como uma camada de vegetação instalada sobre a cobertura de um edifício, composto por várias camadas que ajudam a diminuir a temperatura do telhado, reduzindo a absorção de radiação solar com auxílio das sombras da vegetação, proporcionando um maior isolamento térmico.

Uma outra solução mais prática e econômica é o uso de tinta em tons claros para minimizar a absorção de calor. A técnica de pintura do telhado de cores claras em ambientes tropicais semelhantes ao nordeste pode trazer várias vantagens.

A análise da transferência de calor em telhados e o estudo da influência da pintura em cores claras nesse processo são de grande relevância para a compreensão do comportamento térmico das edificações e para a identificação de estratégias que contribuam para o conforto térmico. Considerando os aspectos climáticos da cidade de Serra Talhada, onde a temperatura do ar nos meses mais quentes pode ultrapassar 38°C e a intensa radiação solar contribuem para o desconforto térmico, a realização deste trabalho se justifica diante da importância de se buscar soluções sustentáveis e eficientes para a redução da transferência de calor, e aumento do conforto térmico em edificações.

Por isto, a ideia dessa pesquisa é adotar uma abordagem de ensaios experimentais envolvendo medições de temperaturas em telhas com diferentes demãos de tinta branca e cores originais. Ao mesmo tempo, combinar com uma análise numérica usando linguagem de programação em Python, utilizando equações de transferência de calor, para avaliar o impacto da pintura de telhas em cores claras na transferência de calor, e fornecer um complemento de situações reais para o ambiente virtual.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise da utilização de cores claras para a redução da transferência de calor em telhas cerâmicas para a cidade de Serra Talhada, utilizando resultados experimentais obtidos por meio de

ensaios em campo, em comparação com resultados numéricos obtidos por um modelo simplificado da transferência de calor em telhas.

1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um script em Python para a simulação numérica da transferência de calor em telhados, considerando diferentes cenários de cor das telhas (cores claras e cores originais).

- Comparar os resultados da simulação para telhas pintadas em cores claras com os resultados para as telhas em suas cores originais, a fim de analisar a diferença na transferência de calor entre os dois casos.

- Avaliar os efeitos da pintura em cores claras nas telhas cerâmicas investigando como esses materiais respondem às mudanças de cor em relação à transferência de calor.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Transferência de calor

A transferência de calor é, segundo Çengel e Ghajar (2012), o processo de transporte de energia térmica entre objetos ou sistemas por efeito de uma diferença de temperatura.

A transferência de calor, apesar de ser um fenômeno complexo, está envolvida em muitos processos essenciais à vida humana, entre eles: O equilíbrio térmico do corpo humano, que depende da taxa de rejeição de calor para o ambiente; utensílios domésticos que usamos no dia a dia, como fogões, geladeiras, aquecedores e ar-condicionados; e também influencia o projeto de casas e edifícios, relacionados as perdas ou ganhos de calor pelo isolamento térmico, que são fundamentais para economizar energia (Çengel e Ghajar, 2012).

Para compreender a transferência de calor é necessário, segundo Kreith, Manglik e Bohn (2016), estabelecer os princípios termodinâmicos que regem esse fenômeno. Para analisar sistemas térmicos é fundamental a compreensão da Primeira Lei da Termodinâmica.

A Primeira Lei da Termodinâmica afirma que, a energia não pode ser criada ou destruída, apenas transformada ou transferida. Uma forma de energia que pode ser transferida entre sistemas é o calor, ou seja, a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Essa lei é equivalente ao Princípio da Conservação da Energia, sendo ela um dos princípios fundamentais da física (Kreith, Manglik e Bohn, 2016).

2.2 Mecanismos de transferência de calor

O estudo a respeito da transferência de calor tem aplicações principalmente no entendimento de como o transporte de calor pode afetar a nossa vida e principalmente a forma como este pode favorecer o conforto térmico e eficiência energética das construções. Essa energia pode ser transferida por três mecanismos básicos, sendo eles:

2.2.1 Condução

Para Çengel e Ghajar (2012), a condução é um mecanismo de transferência de calor que ocorre quando há diferença de temperatura entre as partículas em contato, este processo pode ocorrer em qualquer estado da matéria, e possui maior eficiência nos sólidos, pois as partículas estão mais próximas e interagem mais fortemente.

De acordo com Welty, Rorrer e Foster (2017), a transferência de calor por condução em diferentes materiais apresenta dois processos principais: a interação molecular e a condução por elétrons livres. O primeiro modo está relacionado com o movimento de interação entre as moléculas que compõe os materiais, neste processo as partículas com maior energia transferem temperatura para as partículas com menor energia. Por outro lado, o segundo mecanismo é mais relevante em sólidos metálicos, nestes materiais, os elétrons podem se movimentar livremente, transferindo calor quando há uma diferença de temperatura.

A capacidade de condução térmica de um material é medida pela condutividade térmica (k), quanto maior for a condutividade térmica de um material, mais rápido ele irá conduzir o calor de uma região de maior temperatura para uma região de menor temperatura (Çengel e Ghajar 2012).

Segundo Bergman e Lavine (2019), a condução de calor pode ser definida através da equação da taxa de condução ou Lei de Fourier, descrita na equação 1. Esta equação corresponde a descrição da taxa de transferência de calor por condução através de uma camada de material.

Equação 1: Lei de Fourier

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde:

- q_x'' é o fluxo de calor (em watts por metro quadrado).
- k é a condutividade térmica do material (em watts por metro por kelvin).

- $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura no material, que é a razão entre a diferença de temperatura dT e a espessura dx do material (em kelvin por metro).

2.2.2 Convecção

De acordo com Çengel e Ghajar (2012), a convecção é um processo de transferência de calor que envolve a movimentação de um fluido (líquido ou gás) em contato com uma superfície sólida.

Bergman e Lavine (2019) complementam que o processo de transferência de calor por convecção pode ser dividido em dois tipos, dependendo da origem desse movimento: forçada ou natural. A convecção forçada ocorre quando o fluido é impulsionado por algum fator externo, como um ventilador. A convecção natural ocorre quando o fluido se move por conta própria, a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido gera uma variação na densidade, que faz com que o fluido se mova. Esse deslocamento aumenta a troca de calor entre a superfície e o fluido, pois renova as camadas de fluido próximas à superfície. Quando não há movimentação do fluido, a transferência de calor se dá apenas por condução.

Segundo Bergman e Lavine (2019), a taxa de transferência de calor por convecção, também conhecida como Lei do Resfriamento de Newton, pode ser obtida a partir do uso da seguinte equação:

Representada da seguinte forma:

Equação 2: Lei do Resfriamento de Newton

$$q''_{conv} = h(T_s - T_{amb}) \quad (2)$$

Onde:

- q''_{conv} é o fluxo de calor por convecção (em watts por metro quadrado).
- h é o coeficiente de transferência de calor por convecção (em watts por metro quadrado por kelvin).
- T_s é a temperatura da superfície (em Kelvin).
- T_{amb} é a temperatura ambiente (em Kelvin).

2.2.3 Radiação

Conforme Çengel e Ghajar (2012), a radiação é um mecanismo de transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas emitidas por objetos que estão a uma temperatura superior a zero absoluto (0K). A radiação térmica é a forma de radiação emitida pelo sol, que é a principal fonte de energia para o planeta Terra. As ondas eletromagnéticas podem viajar pelo vácuo, o que significa que elas podem transferir calor entre objetos que não estão em contato direto.

Stine e Geyer (2001), descrevem que a energia solar que atinge a Terra pode ser chamada de “irradiação solar”, sendo ela uma medida que indica a taxa instantânea com que a energia solar é recebida por uma área, expressa em watts por metro quadrado (W/m²). Esta irradiância pode apresentar variações ao longo do tempo devido a diversos fatores como posição do sol, obstruções e condições atmosféricas.

Bergman e Lavine (2019) explicam que a taxa líquida de transferência de calor por radiação saindo de uma superfície é determinada pela equação de Stefan-Boltzmann (Equação 3), permitindo calcular a transferência de calor por radiação entre duas superfícies.

Sendo expressa da seguinte forma:

Equação 3: Equação de Stefan-Boltzmann

$$q_{rad}'' = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (3)$$

Onde:

- q_{rad}'' é o fluxo de calor por radiação (em watts por metro quadrado).
- ε é a emissividade da superfície.
- σ é a constante de Stefan-Boltzmann (watts por metro quadrado por kelvin à quarta potência).
- T_s^4 é a temperatura da superfície (em Kelvin).
- T_{amb}^4 é a temperatura ambiente (em Kelvin).

2.3 Processos quase-estáticos

Çengel e Boles (2013), descrevem que os processos quase-estáticos, também conhecidos como processos quase-equilibrados, são aqueles onde um sistema passa por mudanças muito lentas e de forma gradual, de modo que ele se mantenha sempre muito próximo de um estado de equilíbrio.

Os autores complementam que o processo quase-estático é uma idealização que facilita a análise de processos reais, não apenas simplificando a análise da transferência de calor e a aplicação das leis da termodinâmica, mas também permitindo resultados muito próximos.

2.4 Balanço de energia

Çengel e Ghajar (2009) afirmam que o balanço de energia é uma aplicação direta do Princípio da Conservação de Energia. A equação do balanço de energia (Figura 1) é uma ferramenta essencial que descreve matematicamente como a energia é transferida e distribuída em um sistema.

Figura 1 - Balanço de energia para qualquer sistema sofrendo qualquer processo.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energia total} \\ \text{na entrada} \\ \text{do sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energia total} \\ \text{na saída do} \\ \text{sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Mudança de} \\ \text{energia total} \\ \text{no sistema} \end{array} \right)$$

Fonte: Çengel e Ghajar (2012).

Em problemas de transferência de calor, como a análise das telhas cerâmicas, esse princípio assume grande importância, uma vez que fornece uma estrutura para avaliar as entradas e saídas de energia em um sistema.

Kreith, Manglik e Bohn (2016), mostram que essa equação pode ser usada para calcular a temperatura do telhado em diferentes condições, como durante o dia ou a noite, permitindo avaliar como a energia térmica é transferida da superfície externa para as telhas e como ela é dissipada para o ambiente.

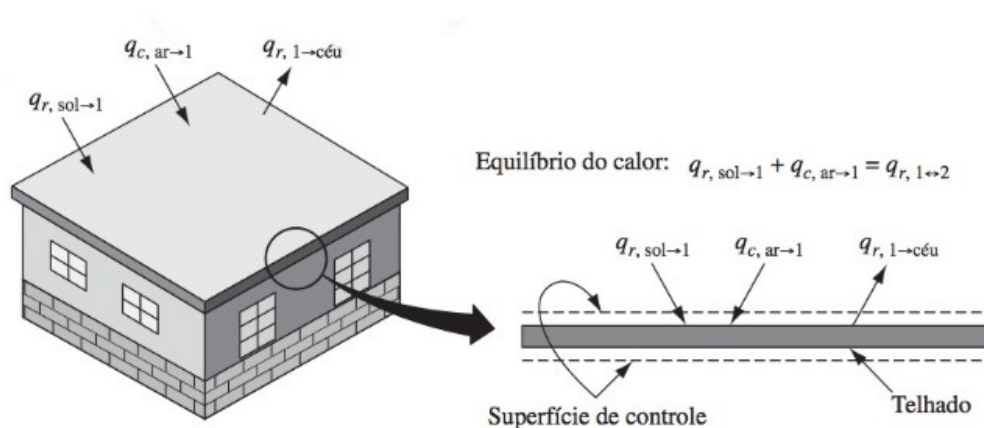
Figura 2 - Balanço de energia para transferência de calor para telhado.

$$\begin{array}{l} \text{calor da radiação} \\ \text{solar transferido} \\ \text{para o telhado} \end{array} + \begin{array}{l} \text{a taxa de convecção do} \\ \text{calor transferido} \\ \text{para o telhado} \end{array} = \begin{array}{l} \text{valor líquido da transferência} \\ \text{do calor por radiação do} \\ \text{telhado para o céu ambiente.} \end{array}$$

Fonte: Kreith, Manglik e Bohn (2016).

A equação utilizada por Kreith, Manglik e Bohn (2016), considera a transferência de calor por convecção entre o ar ambiente e o telhado, bem como a radiação solar incidente, e permite avaliar como a energia térmica é transferida da superfície externa para as telhas. Esse método fornece uma abordagem analítica simplificada para compreender o comportamento térmico do telhado.

Figura 3 - Ganho de calor do telhado por convecção e radiação.



Fonte: Adaptado Kreith, Manglik e Bohn (2016).

2.5 Ilhas de calor urbano e suas implicações no conforto térmico

O fenômeno das ilhas de calor afeta diretamente o bem-estar da população urbana, à medida que as cidades crescem e as coberturas vegetais, como árvores e gramados, são substituídas por estruturas de concreto e vias pavimentadas, o conforto térmico na área urbana sofre mudanças significativas.

Gartland (2010), descreve as ilhas de calor como um fenômeno onde as temperaturas superficiais e do ar em áreas urbanas apresentam maiores temperaturas quando comparadas a áreas rurais próximas.

O clima é influenciado por diversos fatores, dentre os quais se destaca a alteração na cobertura do solo provocada pela urbanização. A substituição da

vegetação natural por materiais artificiais, como concreto e asfalto, que possuem baixa refletância e alta capacidade de armazenar e absorver calor, favorece a formação das ilhas de calor urbano. Um dos principais impactos da ilha de calor nas cidades é o aumento do consumo de energia elétrica para refrigeração, que por sua vez contribui para a elevação das emissões de CO₂ na atmosfera e o desconforto térmico para os habitantes das cidades, podendo chegar a uma diferença de até 10 °C nos centros urbanos em relação às áreas rurais (Silva, Silva e Santos, 2018; Santamouris *et al.*, 2001).

Alguns estudos descrevem como possíveis soluções para reduzir os efeitos das ilhas de calor o uso de materiais com alta refletância solar, ou seja, materiais que podem refletir uma significativa parcela da radiação solar incidente na sua superfície e dissipar o calor absorvido. Santamouris, Synnefa e Karlessi (2011), desenvolveram amostras com pigmentos refletivos, que apresentam uma refletividade muito maior do que os materiais convencionais na mesma cor na região próxima do infra-vermelho, fazendo com que os materiais com diferentes cores, incluindo cores consideradas escuras, apresentem alta refletividade solar. Akbari *et al.* (2015) verificou que a aplicação de revestimentos brancos nos materiais que são tradicionalmente utilizados nas coberturas, é uma alternativa de obter uma alta refletância solar, como por exemplo tintas à base de dióxido de titânio ou acrílico. O autor complementa que o uso desses pigmentos pode elevar a refletância solar para valores variando entre 0,8 e 0,9 e emissividade de 0,8-0,95.

2.6 Uso de tintas na construção civil

De acordo com Bauer (2009), as tintas são constituídas a partir de uma combinação líquida de resinas, pigmentos, solventes e aditivos, e, quando aplicadas em uma superfície, formam uma fina película, desempenhando o papel de proteger e decorar a base sobre a qual foi aplicada. As tintas são materiais utilizados como acabamento de edifícios, proporcionando estética e proteção para superfícies internas e externas. Embora conhecidas por essa função, as tintas são projetadas não apenas para atender aos requisitos estéticos e protetores, mas também para interagir com a luz, especialmente a solar, podendo refletir ou dispersar.

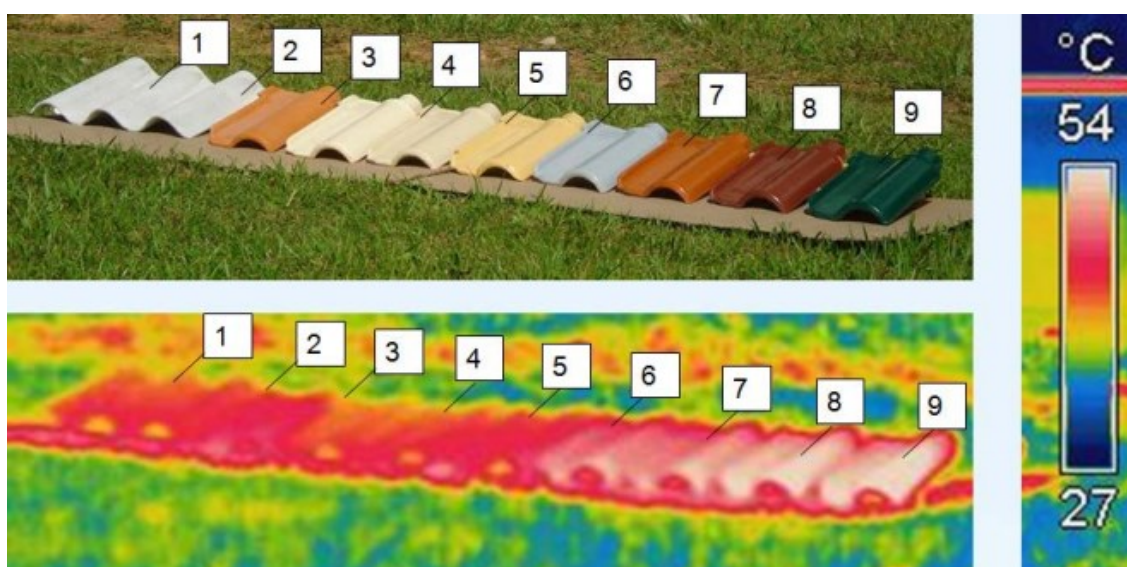
Essa capacidade de refletir a luz solar é essencial, especialmente em regiões de clima quente, pois influencia no conforto térmico das edificações, diminuindo a absorção de calor.

Segundo Fazenda (2009), as tintas látex são as mais vendidas no mundo todo, pois são fáceis de aplicar. Elas são feitas com água e resinas sintéticas, que formam uma película protetora sobre as superfícies. Essas tintas são indicadas para pinturas internas e externas de paredes, tetos, madeiras e metais.

2.7 Telhados frios como estratégia de mitigação das ilhas de calor urbano

A relevância deste estudo pode ser respaldada por pesquisas anteriores, como o trabalho de Rosenfeld *et al.* (1995), que evidencia que os “telhados frios”, ou telhados com cores claras, oferecem uma série de benefícios ao refletir mais luz solar e absorver menos calor, como a redução da temperatura transmitida dos telhados para dentro das edificações, diminuição da necessidade por ar-condicionado, consequentemente reduzindo o consumo de energia. Além disso, contribuem para mitigar os impactos das ilhas de calor urbano e melhorar a qualidade do ar das cidades ao reduzir as emissões de CO₂.

Figura 4 - Análise termográfica das variações de temperatura em superfícies.



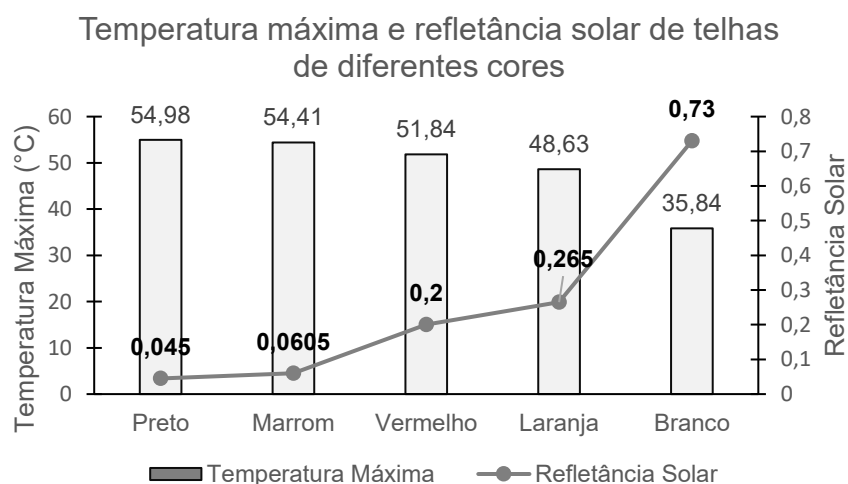
Fonte: Lamberts (2016).

A imagem mostra uma análise termográfica da superfície de várias telhas, e através das suas cores, é possível identificar variações de temperaturas nas áreas

capturadas. As regiões mais quentes são representadas por tons de vermelho e branco, enquanto as mais frias por verde e azul. As amostras de telhas que possuem coloração mais claras apresentam tons de laranja, indicando temperaturas intermediárias. Há uma escala de temperatura ao lado, dando uma referência das temperaturas relacionadas a cada cor.

Em uma pesquisa realizada na Malásia, foi possível analisar os efeitos das cores das telhas na transferência de calor, além das cores preto e branco utilizadas como referência, as outras telhas escolhidas são de cores comumente adotadas no país, sendo possível observar que as diferentes tonalidades são capazes de influenciar a absorção de radiação solar, Farhan *et al.* (2021) avaliaram a refletância solar de amostras de materiais com diferentes cores, entre elas branca, laranja, vermelho, dourado, marrom, cinza e preto. As amostras apresentaram valores de refletância solar variando de 0,045 a 0,730, a telha branca apresentou o maior valor de refletividade solar, enquanto a telha preta apresentou o menor valor. Já a telha vermelha, que é a cor mais comum em edifícios residenciais modernos na Malásia, apresentou um valor de refletividade solar de 0,265. Foi possível observar os valores de temperatura para cada superfície, a temperatura máxima da superfície da telha pode chegar a 54,98 °C quando as telhas pretas são utilizadas, enquanto a temperatura pode ser reduzida a 35,84 °C para uma amostra branca. Ao alterar a cor das telhas de vermelho para branco, é possível obter uma diferença de até 16,00 °C na temperatura da superfície do telhado.

Figura 5 - Temperatura e absorvância solar de diferentes tipos de cores.



Fonte: Adaptado Farhan *et al.* (2021).

Dornelles *et al.* (2011) destacam que o uso de tintas brancas refletivas em telhados pode reduzir significativamente a necessidade de energia que é utilizada para resfriar os edifícios, proporcionando um menor desconforto térmico em climas quentes.

No estudo conduzido pelos autores, foi realizado uma simulação computacional em climas quente e úmido, e quente e seco, representados pelas cidades de Belém e São Raimundo Nonato respectivamente. Observou-se uma significativa necessidade de energia para resfriamento, sendo 8 kWh/dia em Belém e 9,6 kWh/dia em São Raimundo Nonato, com telhas de fibrocimento em seu estado natural e refletância solar de 0,48. Entretanto, após a pintura com a tinta branca com refletância solar de 0,89, foi possível observar uma notável redução na demanda de energia de resfriamento, aproximando-se de zero em ambas as localidades. Esse resultado demonstra a eficácia da pintura branca em promover conforto térmico, minimizando a demanda por energia de resfriamento em edificações.

Xu *et al.* (2012) analisaram a relevância da instalação de telhados frios em dois edifícios comerciais em Hyderabad, Índia. Os edifícios selecionados eram semelhantes em termo de estrutura e uso, mas foram submetidos a diferentes condições de refletância solar, em seu estado natural antes e depois da aplicação de diferentes materiais com diferentes refletividades. O objetivo era desenvolver um método viável para avaliar a eficiência energética de resfriamento direto em edifícios reais e estimar a capacidade de redução das emissões de gases do efeito estufa. Com esse propósito, foi desenvolvido um método analítico baseado em dados obtidos em campo para quantificar as economias de energia de resfriamento gerada pela aplicação de telhados frios nesses edifícios comerciais.

Os autores destacam a redução de emissões de gases de efeito estufa como um dos benefícios diretos dos telhados frios. De acordo com as estimativas, a instalação de telhados frios pode levar a uma redução anual de aproximadamente 11-12 kg de dióxido de carbono (CO₂) por metro quadrado de área de telhado plano. Ou seja, cerca de 90 m² de um telhado na cor branca é capaz de compensar 1 tonelada de emissão de CO₂. Essa redução ocorre devido à redução do uso de energia de resfriamento, o que leva a uma redução nas emissões de gases de efeito estufa associadas à geração de eletricidade.

2.8 Propriedades térmicas dos materiais e componentes construtivos

A transferência de calor entre os materiais de construção e o ambiente depende de vários fatores, como a radiação solar incidente, a condutividade térmica, o calor específico, a transparência à radiação, a resistência, a condutância, a capacidade térmica e o coeficiente de convecção superficial. No entanto, entre essas propriedades, aquelas se relacionam diretamente com as características das superfícies dos materiais em relação à radiação são a absorvância, a refletância e a emissividade. Essas propriedades determinam o quanto de radiação solar que é absorvida, refletida e transmitida pelos materiais. Portanto, são fundamentais para o desempenho térmico dos materiais construtivos (Peralta, 2006).

A NBR 15220-1 trata do desempenho térmico de edificações. Ela define e fornece métodos de cálculo para diversas propriedades térmicas dos materiais e componentes de construção, entre elas a absorvância, a refletância e a emissividade.

Tabela 1 - Propriedades térmicas de materiais e componentes construtivos.

Grandeza	Definição	Símbolo
Absortância	Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.	α
Refletância	Quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.	ρ
Emissividade	Quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura.	ε

Fonte: Adaptado ABNT 15220-1 (2005).

Essas propriedades influenciam na troca de calor entre as superfícies e o ambiente, afetando o conforto térmico dos usuários. A NBR 15220-2 apresenta valores de absorvância e emissividade para diferentes tipos de superfícies e cores.

Tabela 2 - Absortância (α) para radiação solar e emissividade (ϵ).

Tipo de superfície	α	ϵ
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25	0,25
Concreto aparente	0,65/0,80	0,85/0,95
Telha de barro	0,75/0,80	0,85/0,95
Tijolo aparente	0,65/0,80	0,85/0,95
Pintura: Branca	0,20	0,90
Amarela	0,30	0,90
Verde Clara	0,40	0,90
Verde escura	0,70	0,90
Vermelha	0,74	0,90
Preta	0,97	0,90

Fonte: Adaptado NBR 15220-2 (2005).

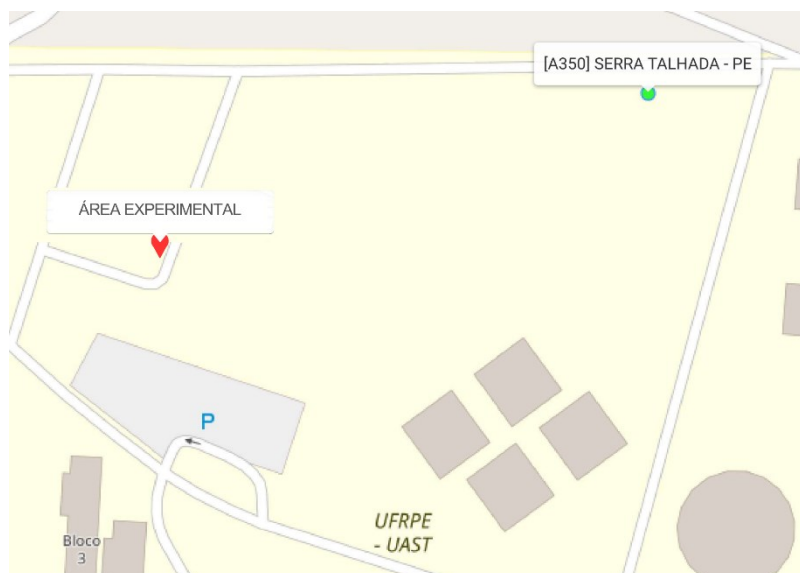
3 METODOLOGIA

3.1 Área experimental

Os testes experimentais foram realizados na Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), no período de 18 de outubro de 2023 a 27 de outubro de 2023, nas coordenadas 7°57'17" S e 38°17'49" W. A escolha desse local foi motivada pela presença da Usina Fotovoltaica, selecionada devido à sua característica de receber luz solar direta durante todo o dia, sem interferências de sombras. A ausência de sombras é essencial para o experimento, uma vez que permite uma exposição contínua ao sol.

Além disso, há também a existência da Estação Meteorológica A350, operada pelo INMET, localizada a 215 metros de distância, que fornece informações horárias detalhadas sobre temperatura, radiação solar, umidade, precipitação e outros parâmetros meteorológicos. A proximidade da estação meteorológica ao local de estudo é importante para garantir uma maior precisão e a confiabilidade dos dados.

Figura 6 - Localização da área de coleta de dados.



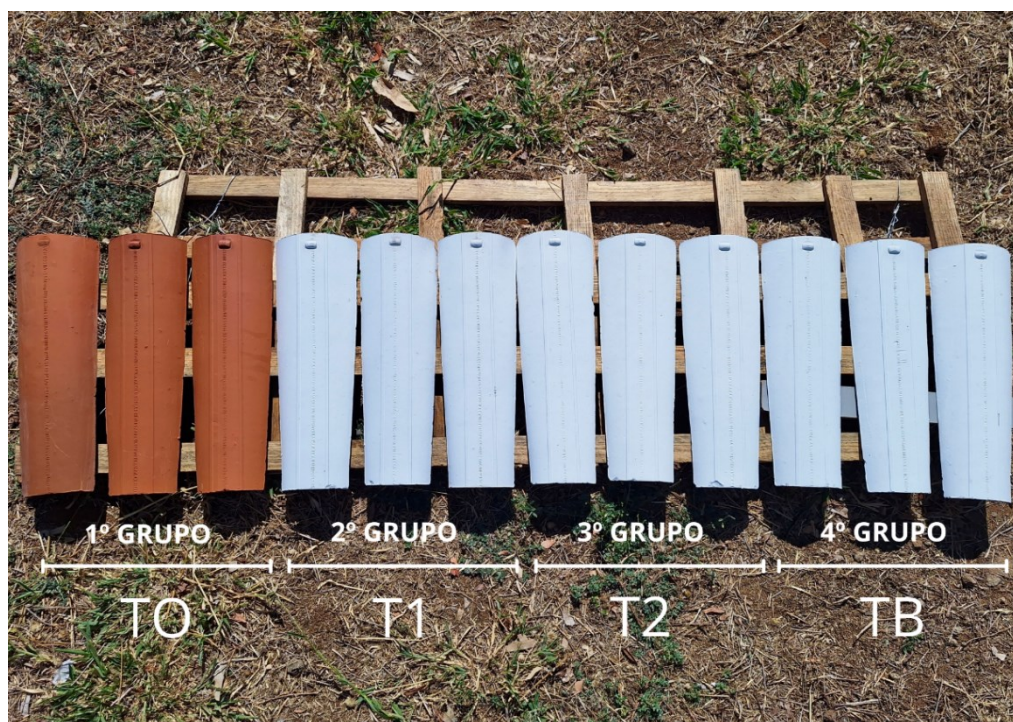
Fonte: Adaptado INMET (2023).

3.2 Procedimento experimental

Durante um período de três dias, foi conduzido um procedimento experimental visando a medição das temperaturas de 12 telhas. Para esse experimento foi utilizado tinta látex acrílica, na cor branca.

Todas as telhas utilizadas eram cerâmicas do tipo Colonial, e foram divididas em quatro grupos de três telhas cada: o 1º grupo (TO) foi composto por telhas em sua cor original; o 2º grupo (T1) foi composto por telhas pintadas com uma única demão de tinta branca; o 3º grupo (T2) foi composto por telhas que receberam duas demãos de tinta branca; e o 4º grupo (TB) foi composto pelas telhas que foram pintadas de branco nas duas faces.

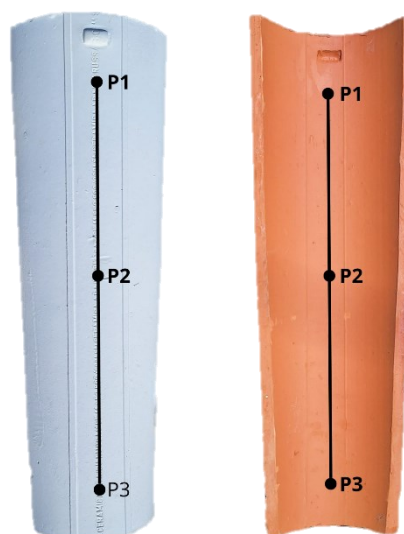
Figura 7 - Disposição de telhas cerâmicas com diferentes níveis de pintura.



Fonte: Autor (2023).

Para avaliar as temperaturas, foram selecionados três pontos de medição em cada telha, tanto na superfície superior quanto na inferior. Ao longo dos três dias, as medições foram realizadas a cada hora, no intervalo das 10h às 15h, permitindo a obtenção de uma série de dados. Essa abordagem possibilitou levar em consideração a variação diurna das temperaturas e radiação solar, o que é fundamental para entender o comportamento térmico das telhas sob diferentes condições.

Figura 8 - Pontos de controle térmico da superfície superior e inferior.



Fonte: Autor (2023).

Após a coleta dos dados, foram calculadas as médias das temperaturas das superfícies superior e inferior de cada telha, bem como o desvio padrão para avaliar a dispersão dos valores.

3.3 Coleta de dados

A coleta da temperatura foi realizada através de um termômetro infravermelho, modelo DG380, da marca DuGold. Esse dispositivo permite a medição precisa em questão de segundos, tornando-o ideal para experimentos em tempo real ou para coletar dados de forma rápida e eficiente.

O uso dos termômetros de infravermelho baseia-se no princípio da emissão e absorção de radiação infravermelha, permitindo medir a temperatura de superfícies, como telhados, sem a necessidade de contato físico. Essa característica é útil quando se trabalha com superfícies distantes, inacessíveis ou perigosas.

Figura 9 - Termômetro Infravermelho Dugold - DG380.



Fonte: Dufrio (2023).

Para garantir a precisão e a integridade dos dados foi seguido o protocolo abaixo, onde os dados foram coletados, registrados e armazenados em uma planilha Excel, incluindo detalhes sobre a frequência de leitura e as técnicas de medição.

- **Preparação do Experimento:** Antes de iniciar a coleta de dados foi necessário preparar o ambiente experimental. As telhas com diferentes condições (cores e demãos de tinta) foram dispostas em um local representativo e expostas ao ambiente a ser analisado;
- **Configuração da Pistola Térmica:** O termômetro infravermelho utilizado é capaz de medir a temperatura com um intervalo de medição de -50°C a 380°C e uma precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$. A preparação envolveu a limpeza da lente para garantir uma leitura precisa, eliminando possíveis interferências;
- **Frequência de Leitura:** As medições de temperatura foram registradas em intervalos de 1 hora devido a precisão necessária para o experimento;
- **Técnica de Medição:** A medição da temperatura foi realizada apontando a pistola térmica para as áreas de interesse nas telhas, como a superfície superior e inferior, sempre mantendo a distância constante de 15 centímetros e um ângulo de medição de 90° com a superfície;

- Registro Manual: À medida que as medições eram feitas, os valores de temperatura eram registrados manualmente em uma tabela, sendo depois repassadas a uma planilha Excel. Cada medição é inserida em uma célula específica da planilha, permitindo a criação de uma coluna de dados cronológicos;
- Formatação dos dados: Foi adicionada a planilha dados como a hora e a data de cada medição, bem como os detalhes das condições das telhas (cor e demãos de tinta). Isso ajuda na identificação e no acompanhamento dos dados.

3.4 Modelagem matemática do problema com Python

A modelagem matemática do problema consistiu em descrever as equações que regem a propagação de calor em um sistema quase-estático, permitindo que as mudanças nas propriedades termodinâmicas ocorram de maneira previsível e sem variações bruscas, garantindo um comportamento suave ao longo do processo. As equações são baseadas nos mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e radiação, incluindo definição de condições iniciais e de contorno, propriedades térmicas dos materiais, e coeficientes de transferência de calor.

Python é uma linguagem de programação de alto nível e interpretada, ou seja, ela não precisa ser compilada antes de ser executada, seu código fonte é convertido em um tipo de linguagem de máquina durante a execução, o que torna sua sintaxe e escrita intuitivas, sendo acessível para iniciantes (Lambert, 2022). Essa facilidade de uso permite que outros usuários utilizem, compreendam, expandam e modifiquem códigos compartilhados.

Segundo a TIOBE (2023), Python é a linguagem de programação mais popular do mundo desde outubro de 2021, sendo classificada pelo TIOBE Programming Community index, um ranking que ordena as linguagens de programação e indica sua popularidade no momento, com base em vários fatores.

Além disso, o Python é utilizado em diversas áreas, como desenvolvimento de jogos digitais, programação para internet, desenvolvimento de software para engenharia e aplicações científicas, entre outros (Banin, 2018).

Embora o Python seja uma linguagem conhecida por amplas aplicações, nesse contexto, o Python foi selecionado como a ferramenta para a análise da transferência de calor, destacando sua flexibilidade na manipulação de dados numéricos, integração com dados experimentais e capacidade de criação de representações visuais. Além disso, a comunidade ativa e recursos abertos oferecem suporte e facilidades na implementação.

Para calibrar o modelo, foram utilizados os dados experimentais obtidos através das medições feitas em campo para os diferentes grupos de telhas cerâmicas, com variação de cor e demãos de tinta. Com o modelo validado e calibrado, foi possível avaliar o comportamento térmico do telhado, e estudar o efeito de diferentes parâmetros, como o tipo de material, cor e espessura.

3.5 Hipóteses simplificadoras adotadas

Para lidar com a complexidade dos sistemas reais, são utilizadas hipóteses simplificadoras que transformam esses sistemas em modelos físicos e matemáticos mais simplificados. Dessa forma, ao adotar hipóteses simplificadoras, permite-se obter uma solução mais prática para os problemas, tornando as análises numéricas mais viáveis, e obtendo soluções satisfatórias.

Para modelagem matemática as seguintes hipóteses simplificadoras foram consideradas:

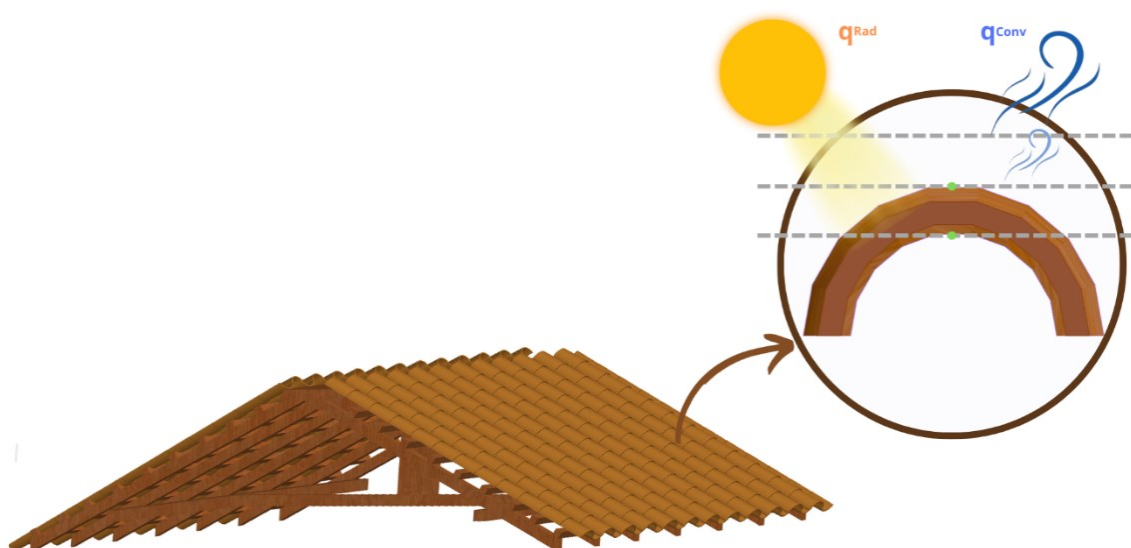
- Meio Homogêneo: Supõe-se que as telhas se apresentam como um material uniforme, o que significa que suas propriedades térmicas das cerâmicas e do ar não variam em função da espessura ou de qualquer outra direção;
- Estado Estacionário: Assume-se que o sistema está em estado estacionário, ou seja, as variáveis térmicas e condições ambientais (temperatura e radiação) não mudam com o tempo;
- Radiação solar constante: Assume-se que a incidência constante de radiação solar na superfície da cerâmica, eliminando a necessidade de modelar variações ao longo do dia;
- Transferência de calor unidimensional: Assume-se que a transferência de calor ocorre apenas ao longo da direção perpendicular a superfície da cerâmica, simplificando o problema para uma dimensão; e

- Propriedades constantes do fluido: Assume-se que o ar se comporta como um fluido ideal, como contato perfeito com a cerâmica, sem influência de outras perturbações, e com valor de convecção fixo.

3.6 Modelagem matemática

O modelo físico matemático foi baseado nas hipóteses simplificadoras apresentadas. Nelas foi estimado um volume de controle, definido como uma região para análise numérica que representa o comportamento geral do objeto real.

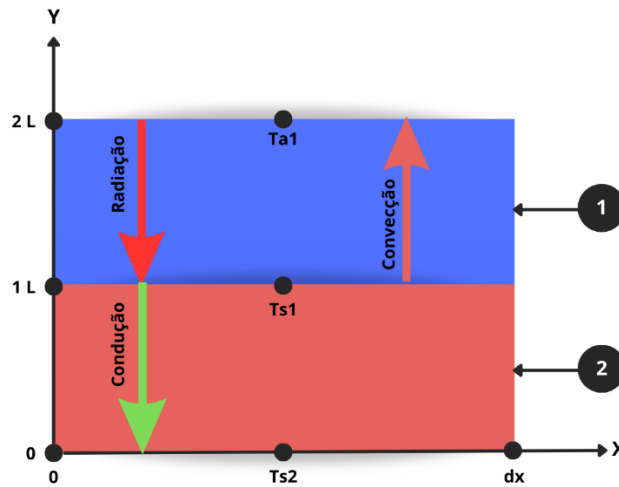
Figura 10 - Representação dos mecanismos de transferência de calor que incidem nas telhas cerâmicas.



Fonte: Autor (2023).

O volume de controle foi modelado como uma área de altura $2L$ e largura dx . O valor de L corresponde a espessura da telha cerâmica, equivalente a 8 mm, enquanto a largura corresponde a 1mm, implicando em um volume de controle de dimensões 16mm de altura por 1 mm. O Volume de controle é apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Representação do volume de controle para o problema de transferência de calor em telhas cerâmicas.



Fonte: Autor (2023).

O volume de controle foi dividido em 2 partes, todas de mesma espessura e largura, sendo elas:

- (1) – Região externa da residência: composta por ar atmosférico a temperatura ambiente (T_{a1}). Nessa região a radiação solar incidente na superfície superior da telha que promove o aumento da temperatura superior da telha (T_{s1}). Nessa região a cor da telha exerce um papel fundamental para a absorção da energia solar. Ainda nessa região, a superfície superior da telha interage com o ar acima dela, aquecendo o ar próximo da superfície à medida que o valor de T_{s1} aumentar com o fluxo de radiação solar. A modelagem da equação foi baseada nos mecanismos de transferência de calor, e tem forma análoga a encontrada no trabalho de Bretz, Akbari e Rosenfeld (1998), para essa região é dada pela equação 4 abaixo:

$$\alpha \cdot Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{s1}^4 - T_{a1}^4) + h_c \cdot (T_{s1} - T_{a1}) \quad (4)$$

Reorganizando a equação temos:

$$T_{s1} = \left[\frac{\alpha \cdot Q}{\varepsilon \cdot \sigma} + T_{a1}^4 - \frac{h_c}{\varepsilon \cdot \sigma} (T_{s1} - T_{a1}) \right]^{0,25} \quad (4)$$

Nessa região observa-se que a temperatura da superfície superior (T_{s1}) pode ser modelada a partir da radiação solar (Q), da absorvância (α) promovida pela cor da superfície superior da telha, da emissividade (ϵ), e pela constante de Stefan-Boltzmann (σ). Observa-se também um papel fundamental da perda de calor para o ambiente promovida pela diferença de temperatura da superfície com o meio, dada por $h_c \cdot (T_{s1} - T_{a1})$.

- (2) – Região da telha: composta por cerâmica com condutividade térmica [$W/m.K$] constante. Nessa região ocorre a transferência de calor entre as superfícies superior e inferior da telha, podendo ser modelada através de uma consideração na Lei de Fourier (equação 1), onde a radiação incidente, ou seja, a radiação absorvida pela telha contribui para o fluxo de calor por condução, pode ser descrita pela equação 5 abaixo:

$$\alpha \cdot Q = \frac{K (T_{s1} - T_{s2})}{L} \quad (5)$$

Reorganizando a equação temos:

$$T_{s2} = -\frac{\alpha \cdot Q \cdot L}{K} + T_{s1} \quad (5)$$

Nessa região observa-se que a temperatura da superfície inferior (T_{s2}) pode ser modelada a partir da radiação solar (Q), da absorvância (α) promovida pela cor da superfície superior da telha, da condutividade térmica da cerâmica (K), da espessura da telha (L) e da temperatura da superfície superior (T_{s1}).

3.7 Análise térmica com Python

A partir da modelagem físico-matemática exposta anteriormente, um script em linguagem Python foi criado para realizar os cálculos para as temperaturas. O código está disponível no Apêndice A. Para os cálculos foram utilizados as seguintes propriedades térmicas e parâmetros para cálculo, disponíveis nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 - Propriedades térmicas empregadas na análise numérica.

Parâmetros	Variável	TO	T1/T2/T3	Referência
Absortância cor vermelha [-]	alfa	0,48	-	Dornelles, 2021
Absortância cor branca [-]	alfa	-	0,158	Dornelles, 2008
Emissividade da telha [-]	epsilon	0,95	-	NBR 15220-2, 2005
Emissividade da pintura [-]	epsilon	-	0,90	NBR 15220-2, 2005
Const. Stefan Boltzmann [$W/m^2 \cdot K^4$]	sigma	5,67e-8	5,67e-8	-
Coef. Convectivo externo [$W/m^2 \cdot K$]	hc	25	25	Coelho, 2016
Coef. Condução de calor [$W/m \cdot K$]	k	1,05	1,05	Bauer, 2019
Coef. Temperatura Kelvin [K]	Temp_K	273,15	273,15	-

Fonte: Autor (2023).

Tabela 4 - Parâmetros empregados na análise numérica.

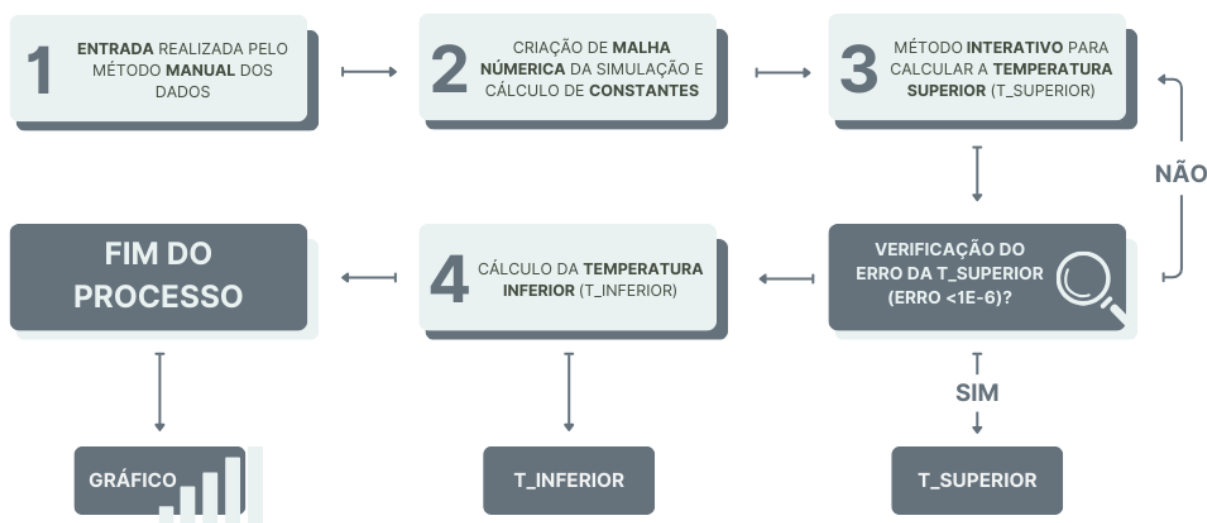
Parâmetro	Variável	TO	T1	T2	TB
Altura da telha [mm]	Alt_telha	8	8	8	8
Largura do volume de controle [mm]	dx	1	1	1	1
Tolerância do erro numérico [-]	Tolerancia	1e-6	1e-6	1e-6	1e-6
Número Max. Interações [-]	Max_i	1000	1000	1000	1000

Fonte: Autor (2023).

O fluxograma para o programa criado está representado na Figura 12, e apresenta a estrutura e sequência de execução das etapas do programa. As 4 etapas que compõe o programa estão descritas em detalhes abaixo:

1. O programa tem início com a inserção manual dos dados, onde os valores de temperatura ambiente, radiação solar, propriedades térmicas do material e parâmetros empregadas na análise numérica são inseridos dentro do código;
2. Após inserir os dados manualmente o programa executa uma função que gera uma malha, ela funciona como uma grade que divide a área estudada em espaços de mesma dimensão, sendo possível mapear como as temperaturas variam em diferentes partes da análise;
3. Após definir a malha numérica, é utilizado um método iterativo para estimar a temperatura superior ($T_{superior}$) da telha. O objetivo desse método é encontrar valores aproximados para a transferência de calor. O processo é iniciado estimando uma temperatura inicial arbitrária e, por meio de um processo de minimização de erro, a temperatura superficial é calculada ao longo de no máximo 1000 iterações. Cada novo valor de $T_{superior}$ é comparado ao valor obtido anteriormente e estimado o erro. Caso o erro permaneça abaixo da tolerância de $1E-6$, o valor atual é armazenado e permite continuar com o programa. Se, ao longo das 1000 interações, não se alcançar a tolerância desejada, o programa salva o valor da temperatura com menor erro e prossegue com a execução;
4. Assim como utilizado para determinar a temperatura superior, a obtenção da temperatura inferior da telha segue um processo específico. A determinação da temperatura inferior da telha é orientada por meio da aplicação direta da equação de transferência de calor por condução. Essa equação, considera as propriedades térmicas do material, permitindo calcular a temperatura inferior sem a necessidade de um processo iterativo. Utilizando a temperatura superior obtida anteriormente e, por meio da aplicação direta da equação, é possível determinar a temperatura inferior.

Figura 12 - Fluxograma da execução do código desenvolvido para análise de transferência de calor.



Fonte: Autor (2023).

3.8 Análise de dados

Para analisar os dados que foram coletados durante o experimento foram utilizados os conceitos de média aritmética (\bar{X}) e desvio padrão (S) para obter a temperatura das telhas ao final do experimento. Para Crespo (2009), a função da média aritmética (\bar{X}) é fornecer um ponto de referência para a tendência central dos dados, enquanto o desvio padrão (S) permite avaliar a dispersão em relação a essa média.

A análise da correlação entre os dados experimentais e numéricos foi realizada por meio da aplicação do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). Rumsey (2019) diz que a correlação de Pearson, representada pelo coeficiente (r), é uma medida estatística que varia sempre entre +1 e -1, e que avalia a relação linear entre duas variáveis. Valores próximos de +1 ou -1 representam uma relação linear perfeita positiva ou negativa, enquanto valores próximos de 0 indicam ausência de relação linear. A sua escolha está baseada em alguns aspectos citados por Moore, Notz e Fligner (2023), como a capacidade de medir a força e direção entre duas variáveis lineares, e a sua interpretação intuitiva com valores entre -1 e +1, facilitando a comparação dos resultados.

Tabela 5 - Classificação da correlação linear.

Coeficiente de Pearson (r)	Interpretação
-1,00	Relação linear perfeita (negativa)
-0,7	Relação linear forte (negativa)
-0,5	Relação linear moderada (negativa)
-0,3	Relação linear fraca (negativa)
0	Nenhuma relação linear
+0,3	Relação linear fraca (positiva)
+0,5	Relação linear moderada (positiva)
+0,7	Relação linear forte (positiva)
+1,00	Relação linear perfeita (positiva)

Fonte: Adaptado Rumsey (2019).

4 RESULTADOS

4.1 Apresentação dos dados experimentais

Os dados referentes a temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar (W/m^2) são apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6 - Comportamento médio da temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) para os dias de experimentação.

Hora	Temperatura Ambiente [$^{\circ}\text{C}$]				
	24/10/23	25/10/23	26/10/23	Média	Desvio Padrão
10:00:00	29,70	33,20	32,40	31,77	1,83
11:00:00	31,60	35,00	34,00	33,53	1,75
12:00:00	33,80	37,10	35,30	35,40	1,65
13:00:00	33,70	36,60	36,20	35,50	1,57
14:00:00	35,30	37,50	37,20	36,67	1,19
15:00:00	36,20	37,80	37,40	37,13	0,83

Fonte: Adaptado INMET (2023).

Tabela 7 - Comportamento médio da radiação solar (W/m^2) para os dias de experimentação.

Hora	Radiação Solar [W/m^2]				
	24/10/23	25/10/23	26/10/23	Média	Desvio Padrão
10:00:00	906,61	901,25	916,72	908,19	7,86
11:00:00	1018,50	1009,44	1024,00	1017,31	7,35
12:00:00	1052,06	1055,08	1057,61	1054,92	2,78
13:00:00	1006,69	1019,61	1009,25	1011,85	6,84
14:00:00	889,64	897,81	879,03	888,82	9,42
15:00:00	708,25	712,28	659,83	693,45	29,19

Fonte: Adaptado INMET (2023).

A partir de dados disponíveis em tempo real pelo Mapa de Estações Meteorológicas do INMET, foi possível obter a média para a Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e Radiação solar (W/m^2) permitindo estabelecer uma medida central, enquanto o desvio padrão indicou a variação dos valores em relação à média. A análise conjunta da

média e do desvio padrão permitiu identificar que, para os dias de medição em campo, o comportamento térmico foi constante, com uma baixa variabilidade em relação à média. Essa consistência dos dados sugere que os valores obtidos para a Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e Radiação solar (W/m^2) são confiáveis, sem a presença de valores atípicos que se distanciam da média.

Nas Tabelas 8 a 11 são apresentados os valores de temperaturas medidas, junto com a média do comportamento da temperatura na superfície superior e inferior das telhas nos casos de: telha original (TO), telha com uma demão de tinta branca (T1), telha com duas demãos de tinta branca (T2) e telha completamente branca (TB).

Tabela 8 - Temperatura aferida para o grupo (TO) em $^{\circ}\text{C}$ para os dias de medição.

Hora	TO - Superior [$^{\circ}\text{C}$]					TO - Inferior [$^{\circ}\text{C}$]				
	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Média	Desvio Padrão	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Média	Desvio Padrão
10:00:00	48,46	48,79	48,34	48,53	0,23	47,29	47,17	48,23	47,56	0,58
11:00:00	51,32	51,92	52,98	52,07	0,84	49,61	49,88	50,76	50,08	0,60
12:00:00	54,44	55,62	56,43	55,50	1,00	52,90	53,67	52,10	52,89	0,78
13:00:00	53,30	55,18	56,37	54,95	1,55	50,94	53,03	52,10	52,03	1,05
14:00:00	51,12	53,39	54,18	52,90	1,59	51,16	51,76	51,62	51,51	0,32
15:00:00	45,60	46,82	48,70	47,04	1,56	46,33	46,59	49,16	47,36	1,56

Fonte: Autor (2023).

Tabela 9 - Temperatura aferida para o grupo (T1) em $^{\circ}\text{C}$ para os dias de medição.

Hora	T1 - Superior [$^{\circ}\text{C}$]					T1 - Inferior [$^{\circ}\text{C}$]				
	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Média	Desvio Padrão	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Média	Desvio Padrão
10:00:00	39,33	37,70	38,04	38,36	0,86	38,04	37,36	38,29	37,90	0,48
11:00:00	41,77	40,86	42,31	41,64	0,74	42,31	39,76	40,53	40,87	1,31
12:00:00	43,30	42,59	43,92	43,27	0,67	43,92	41,86	41,46	42,41	1,32
13:00:00	41,67	41,43	43,89	42,33	1,36	43,89	40,92	41,50	42,10	1,57
14:00:00	40,06	40,07	42,02	40,71	1,13	42,02	39,67	40,71	40,80	1,18
15:00:00	37,52	37,73	40,26	38,50	1,52	40,26	37,94	40,17	39,46	1,31

Fonte: Autor (2023).

Tabela 10 - Temperatura aferida para o grupo (T2) em °C para os dias de medição.

Hora	T2 - Superior [°C]					T2 - Inferior [°C]				
	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Média	Desvio Padrão	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Média	Desvio Padrão
10:00:00	37,52	35,87	36,31	36,57	0,86	37,73	36,21	36,32	36,76	0,85
11:00:00	40,17	39,17	40,38	39,90	0,65	39,80	38,29	38,53	38,87	0,81
12:00:00	41,27	40,70	42,09	41,35	0,70	41,17	40,60	40,26	40,67	0,46
13:00:00	39,67	39,68	41,61	40,32	1,12	40,07	39,42	39,89	39,79	0,33
14:00:00	37,79	37,82	39,97	38,53	1,25	37,91	37,67	38,50	38,03	0,43
15:00:00	36,68	36,77	38,37	37,27	0,95	38,24	37,54	38,81	38,20	0,63

Fonte: Autor (2023).

Tabela 11 - Temperatura aferida para o grupo (TB) em °C para os dias de medição.

Hora	TB - Superior [°C]					TB - Inferior [°C]				
	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Média	Desvio Padrão	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Média	Desvio Padrão
10:00:00	37,04	36,18	36,30	36,51	0,47	37,10	35,97	36,13	36,40	0,61
11:00:00	39,61	39,42	40,09	39,71	0,34	38,77	38,14	38,84	38,59	0,38
12:00:00	40,98	40,69	42,21	41,29	0,81	41,07	40,41	41,08	40,85	0,38
13:00:00	39,14	39,41	40,83	39,80	0,91	39,29	39,39	40,71	39,80	0,79
14:00:00	37,38	37,82	39,79	38,33	1,28	37,60	37,73	39,17	38,17	0,87
15:00:00	36,51	36,74	38,41	37,22	1,04	37,97	37,42	38,26	37,88	0,42

Fonte: Autor (2023).

Assim como para a Temperatura (°C) e Radiação solar (W/m^2), o comportamento térmico da temperatura da superfície superior das telhas nos casos analisados apresentaram valores semelhantes, o desvio padrão mostrou uma baixa variabilidade nos valores registrados em relação à média, indicando que os valores médios são consistentes.

As telhas originais (TO) apresentaram as maiores temperaturas médias e os maiores valores no desvio padrão. Esse comportamento da temperatura pode ser explicado pela menor capacidade de refletir luz que a cor original das telhas apresenta em função da radiação solar. Os demais grupos apresentaram temperaturas médias mais baixas e menores desvios padrões. Esse comportamento pode ser explicado pela capacidade da cor branca em refletir grande parte da radiação solar, mantendo uma temperatura mais estável ao longo do dia.

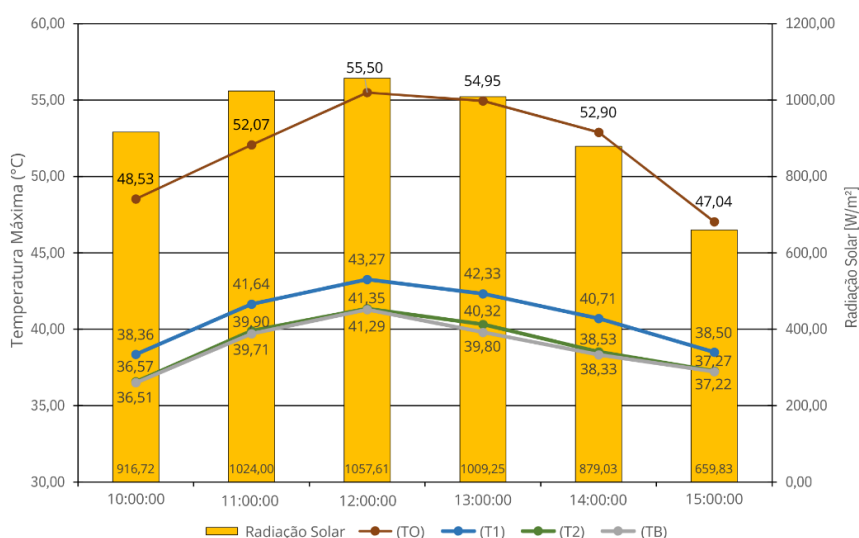
Da mesma forma que observado na superfície superior, o comportamento térmico da temperatura na superfície inferior das telhas também apresentou temperaturas constantes, sem grandes oscilações. Verifica-se que os valores de desvio padrão foram baixos, indicando que as temperaturas medidas se mantiveram próximos à média, mostrando baixa variação.

Semelhante ao observado na superfície superior, a superfície inferior das telhas originais (TO) demonstrou as temperaturas médias mais elevadas e uma variação significativa no desvio padrão.

Por outro lado, as telhas brancas apresentaram temperaturas médias mais baixas e desvios padrão menores, uma vez que a cor branca reflete mais radiação solar, o que as torna menos influenciadas pelas variações diárias na intensidade da radiação solar. A telha com uma camada de tinta branca (T1) apresentou desvio padrão maiores, isso pode ter influência na qualidade da cobertura e espessura da camada, porém, se comparada com a telha original (TO), observa-se um comportamento térmico muito melhor, levando a até 10°C de diferença nas temperaturas.

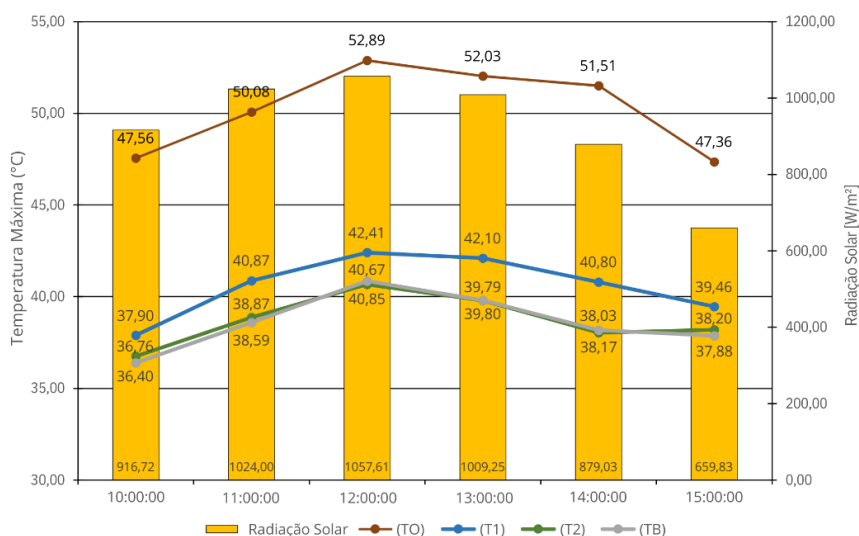
Nas Figuras 13 e 14 são exibidas a variação da temperatura das superfícies superior e inferior das telhas cerâmicas, nas cores natural e branca, ao longo do dia. Os gráficos também apresentam a radiação solar incidente em cada horário.

Figura 13 - Comparativo entre os valores de temperatura superior para cada grupo de telhas cerâmicas.



Fonte: Autor (2023).

Figura 14 - Comparativo entre os valores de temperatura inferior para cada grupo de telhas cerâmicas.



Fonte: Autor (2023).

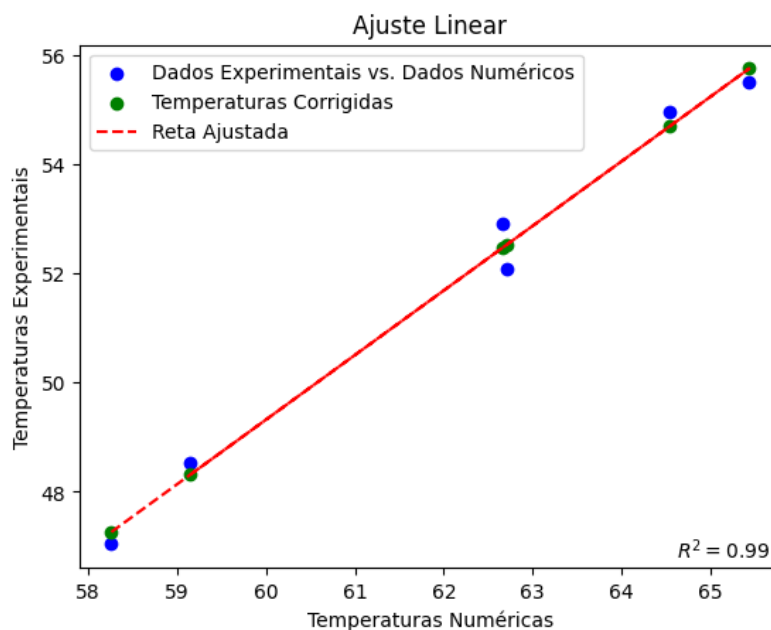
4.2 Resultados numéricos

Por ser um modelo simplificado, que não considera todas as condições que afetam a transferência de calor em telhados, os resultados da simulação numérica são geralmente mais altos do que os valores experimentais. No entanto, é importante mencionar que esses resultados refletem o comportamento esperado.

Para ajustar e comparar os dados experimentais e numéricos da temperatura das telhas cerâmicas, foi realizada uma regressão linear. A regressão linear foi aplicada para ajustar as temperaturas obtidas através do script aos dados experimentais. Essa abordagem foi utilizada para reduzir as variações de valores entre os conjuntos de dados, permitindo uma comparação mais precisa.

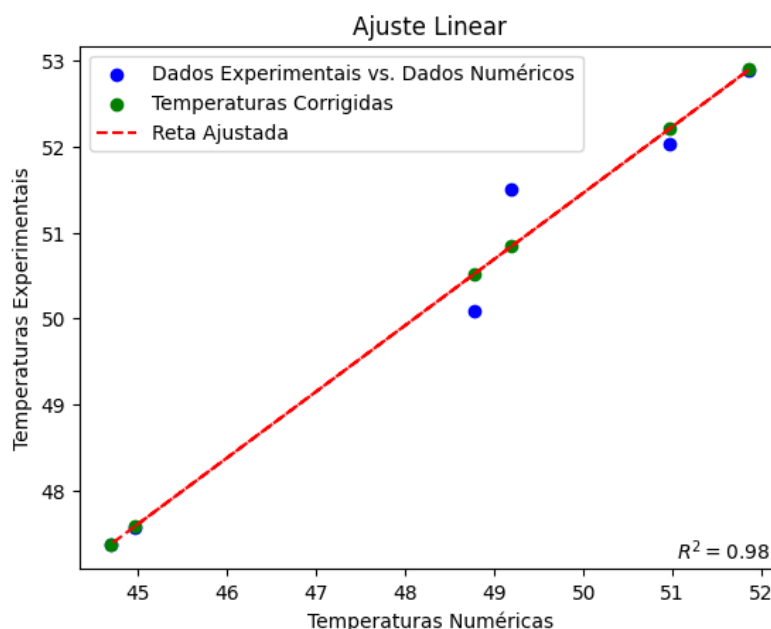
As figuras 15 e 16 exibem gráficos de dispersão, onde os pontos azuis ilustram a relação entre as temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente, a reta vermelha representa a linha de tendência obtida pelo ajuste linear, e os pontos verdes os valores experimentais e numéricos corrigidos pela reta ajustada.

Figura 15 - Dados experimentais e numéricos da superfície superior da amostra TO ajustados pela regressão linear.



Fonte: Autor (2023).

Figura 16 - Dados experimentais e numéricos da superfície inferior da amostra TO ajustados pela regressão linear.



Fonte: Autor (2023).

Os resultados da regressão linear estão resumidos na tabela 12, os coeficientes foram ajustados para melhor se adequar aos dados experimentais.

Tabela 12 - Coeficientes de regressão linear para ajuste dos dados.

Variáveis	TO	T1	T2	TB
Coeficiente angular de ajuste superior	1,181	0,865	0,785	0,742
Coeficiente linear de ajuste superior	-21,565	1,063	2,897	4,690
Coeficiente angular de ajuste inferior	0,771	0,973	0,772	0,974
Coeficiente linear de ajuste inferior	12,891	1,976	9,497	1,910

Fonte: Autor (2023).

Os resultados para a modelagem numérica, assim como a comparação com os dados experimentais, estão apresentados a seguir na forma de tabelas. Nas Tabelas 13 a 16 são apresentados o comparativo entre os valores experimentais e numéricos para a temperatura superior e inferior nos casos de: telha original (TO), telha com uma demão de tinta branca (T1), telha com duas demãos de tinta branca (T2) e telha completamente branca (TB), respectivamente.

Tabela 13 - Comparação entre os dados experimentais e numéricos para a Telha original (TO).

Hora	Temperatura Ambiente [°C]	Radiação Solar [W/m ²]	TO - Superior			TO - Inferior		
			EXP.	NUM.	Δ [%]	EXP.	NUM.	Δ [%]
10:00:00	32,40	908,19	48,53	48,29	0,49	47,56	47,56	0,00
11:00:00	34,00	1017,31	52,07	52,50	-0,81	50,08	50,50	-0,84
12:00:00	35,30	1054,92	55,50	55,72	-0,40	52,89	52,88	0,03
13:00:00	36,20	1011,85	54,95	54,67	0,51	52,03	52,19	-0,31
14:00:00	37,20	888,82	52,90	52,44	0,87	51,51	50,82	1,35
15:00:00	37,40	693,45	47,04	47,24	-0,42	47,36	47,35	0,01

Fonte: Autor (2023).

Tabela 14 - Comparação entre os dados experimentais e numéricos para a Telha com uma demão de tinta branca (T1).

Hora	Temperatura Ambiente [°C]	Radiação Solar [W/m ²]	T1 - Superior [°C]			T1 - Inferior [°C]		
			EXP.	NUM.	Δ [%]	EXP.	NUM.	Δ [%]
10:00:00	32,40	908,19	38,36	38,16	0,51	37,90	38,05	-0,39
11:00:00	34,00	1017,31	41,64	40,17	3,54	40,87	39,87	2,43
12:00:00	35,30	1054,92	43,27	42,36	2,11	42,41	41,96	1,07
13:00:00	36,20	1011,85	42,33	42,05	0,67	42,10	41,70	0,95
14:00:00	37,20	888,82	40,71	41,83	-2,74	40,80	41,64	-2,05
15:00:00	37,40	693,45	38,50	40,36	-4,82	39,46	40,44	-2,49

Fonte: Autor (2023).

Tabela 15 - Comparação entre os dados experimentais e numéricos para a Telha com duas demãos de tinta branca (T2).

Hora	Temperatura Ambiente [°C]	Radiação Solar [W/m ²]	T2 - Superior [°C]			T2 - Inferior [°C]		
			EXP.	NUM.	Δ [%]	EXP.	NUM.	Δ [%]
10:00:00	32,40	908,19	36,57	36,57	0,00	36,76	36,88	-0,34
11:00:00	34,00	1017,31	39,90	38,39	3,80	38,87	38,18	1,77
12:00:00	35,30	1054,92	41,35	40,37	2,37	40,67	39,68	2,44
13:00:00	36,20	1011,85	40,32	40,09	0,57	39,79	39,50	0,72
14:00:00	37,20	888,82	38,53	39,89	-3,55	38,03	39,47	-3,79
15:00:00	37,40	693,45	37,27	38,56	-3,46	38,20	38,62	-1,09

Fonte: Autor (2023).

Tabela 16 - Comparação entre os dados experimentais e numéricos para a Telha completamente branca (TB).

Hora	Temperatura Ambiente [°C]	Radiação Solar [W/m ²]	TB - Superior [°C]			TB - Inferior [°C]		
			EXP.	NUM.	Δ [%]	EXP.	NUM.	Δ [%]
10:00:00	32,40	908,19	36,51	36,51	-0,02	36,40	36,41	-0,02
11:00:00	34,00	1017,31	39,71	38,24	3,71	38,59	37,96	1,63
12:00:00	35,30	1054,92	41,29	40,11	2,86	40,85	39,74	2,72
13:00:00	36,20	1011,85	39,80	39,85	-0,12	39,80	39,54	0,66
14:00:00	37,20	888,82	38,33	39,66	-3,47	38,17	39,50	-3,48
15:00:00	37,40	693,45	37,22	38,40	-3,16	37,88	38,49	-1,62

Fonte: Autor (2023).

De acordo com as tabelas apresentadas acima, é possível observar que o modelo numérico proposto apresentou um bom comportamento para todas as amostras de telhas, incluindo as telhas originais (TO) e as telhas com diferentes demãos de pintura (T1, T2 e TB), em relação a superfície superior. No entanto, em alguns casos, foram observadas diferenças entre os valores experimentais e numéricos.

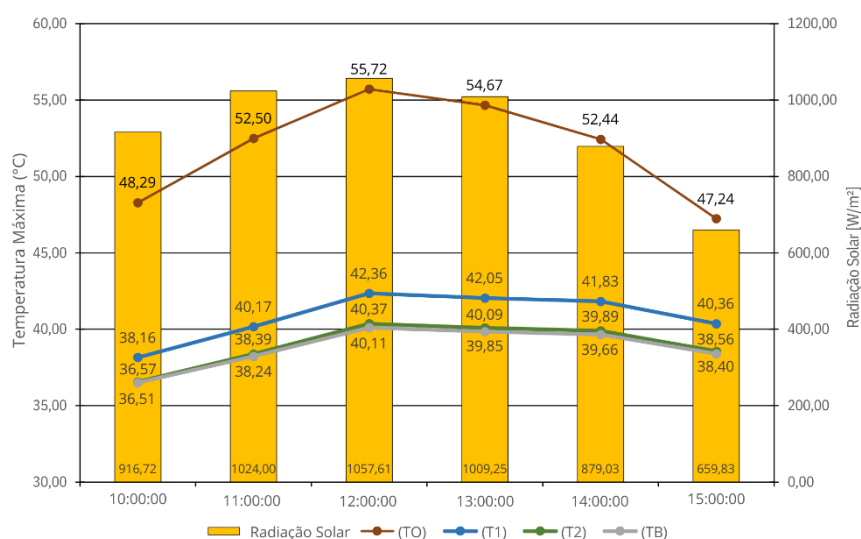
Para as telhas com superfícies vermelha, TO, o comportamento dos valores da análise numérica é semelhante aos valores experimentais em todo o período analisado, sem variações significantes. Para alguns horários, observa-se que o valores das amostras T1, T2 e TB, apresentam uma leve diferença em relação aos dados experimentais, com uma divergência máxima de -4,82%, indicando uma variação de -1,86°C, esse comportamento pode estar relacionado a influência do

ajuste linear, que não conseguiu reproduzir a correspondência dos dados para alguns pontos em específico, apesar de apresentar o mesmo comportamento dos dados experimentais.

O modelo numérico proposto, ao analisar o comportamento dos dados de temperatura inferior da telha, demonstra, assim como no caso das temperaturas superiores, um bom ajuste aos dados experimentais, especialmente para o caso da telha original (TO). Para as telhas com superfícies brancas, T1, T2 e TB, respectivamente, o comportamento dos valores da análise numéricos apresentaram uma maior variação de temperatura quando comparadas as telhas originais, com diferenças máximas de 0,98°C, -1,44°C e -1,33°C respectivamente.

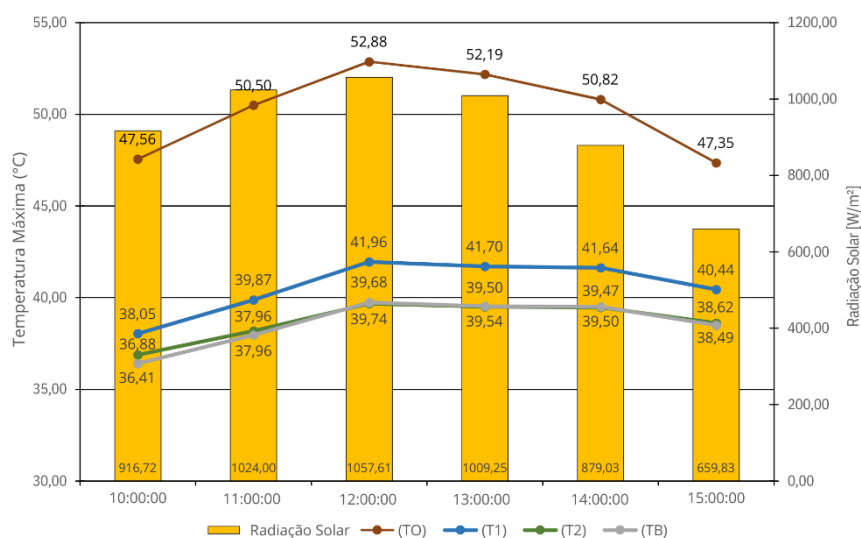
As figuras 17 e 18 ilustram o comportamento dos resultados numéricos em relação à variação da temperatura na superfície superior e inferior das telhas cerâmicas. Embora visualmente não haja uma comparação direta com os dados experimentais, é possível perceber a relação entre os resultados numéricos e os padrões observados nos dados experimentais apresentados nas figuras 13 e 14.

Figura 17 - Comportamento dos resultados numéricos da temperatura superior das telhas cerâmicas.



Fonte: Autor (2023).

Figura 18 - Comportamento dos resultados numéricos da temperatura inferior das telhas cerâmicas.



Fonte: Autor (2023).

Ao analisar o comportamento entre os dados experimentais e numéricos pelo coeficiente de Pearson, destaca-se a relação linear, indicando correlação entre o conjunto de dados. As Tabelas 17 e 18 apresentam os valores dos coeficientes de Pearson e a classificação, segundo a Tabela 5.

Tabela 17 - Classificação dos coeficientes de Pearson para a superfície superior dos casos analisados.

Caso	TO	T1	T2	TB
Coef. Pearson	0,995	0,785	0,809	0,805
Classificação	Forte	Forte	Forte	Forte

Fonte: Autor (2023).

Tabela 18 - Classificação dos coeficientes de Pearson para a superfície inferior dos casos analisados.

Caso	TO	T1	T2	TB
Coef. Pearson	0,987	0,887	0,777	0,825
Classificação	Forte	Forte	Forte	Forte

Fonte: Autor (2023).

Na análise dos coeficientes de Pearson apresentados nas Tabelas 17 e 18 para as superfícies superior e inferior, respectivamente, é possível observar que o modelo

proposto se ajusta de forma considerável para todos os casos analisados. Na superfície superior (Tabela 17), destaca-se que, apesar de haver leves variações nas temperaturas, o modelo proposto se ajusta bem aos casos das telhas (TO, T1, T2 e TB), evidenciando valores elevados para a correlação de Pearson.

E para a superfície inferior (Tabela 18), os coeficientes de Pearson também mantêm uma classificação "Forte" para todas as telhas, sugerindo uma excelente correlação mesmo considerando as diferenças entre os valores experimentais e numéricos. Este resultado destaca a capacidade da metodologia e do modelo criado em reproduzir o comportamento térmico das telhas, demonstrando o comportamento coeso entre os valores experimentais e numéricos do ponto de vista da transferência de calor.

Para as condições e simplificações adotadas durante essa pesquisa, os resultados revelaram que ao utilizar as telhas cerâmicas na cor branca, a temperatura média superficial é reduzida em até 14,21°C (25,60%) nos dados experimentais e 15,61°C (28,01%) nos dados numéricos, indicando que a utilização de cores claras resulta em uma menor absorção de radiação solar. Esses valores são semelhantes com os de Silva (2019) e Silva, Marinoski e Guths (2020) que estudaram o efeito da cor das telhas cerâmicas sobre o desempenho térmico de edificações, obtendo redução máxima na temperatura superficial de até 17,8°C (26,49%) e 17°C (26,28%) respectivamente.

Segundo estimativas, as telhas que apresentam as superfícies superiores pintadas de branco, seja com um ou duas demãos, permitem que o interior tenha uma temperatura inferior à do ambiente. Embora não tenha sido feita uma análise da temperatura interna do ambiente nesse trabalho, é possível estimar com base em estudos similares, correlacionando a temperatura superior dos telhados com a temperatura interna.

Autores como Silva (2019), Silva, Marinoski e Guths (2020) e Durante *et al.* (2019), destacam que o uso de tinta branca em telhados cerâmicos é capaz de reduzir a temperatura interna em uma faixa de 2,48 a 4,27°C, uma vez que as telhas que apresentam coloração mais clara em sua superfície refletem uma maior parte da radiação solar, absorvendo menos calor. Um telhado mais frio significa que há menos transferência de calor para o interior da edificação, contribuindo para a economia de energia, redução nos custos de refrigeração, melhoria do conforto térmico, qualidade de vida e sustentabilidade.

O script desenvolvido na linguagem de programação Python está disponível no APÊNDICE A, e os gráficos do gradiente térmico ao longo da altura e espessura da telha, analisados pelo programa desenvolvido, estão disponíveis no APÊNDICE B.

5 CONCLUSÃO

Ao fim desse estudo, sobre a utilização de cores claras em telhas cerâmicas para a redução da transferência de calor, os resultados obtidos na comparação entre os dados experimentais e pela simulação numérica correspondem aos objetivos propostos, demonstraram que a pintura com tinta branca foi capaz de reduzir consideravelmente a temperatura das telhas, comprovando que esse procedimento pode ser eficaz em climas quentes, como a cidade de Serra Talhada.

Contudo, é importante considerar a necessidade da manutenção da pintura a longo prazo, as coberturas pintadas com tinta são afetadas pela exposição ao intemperismo natural, podendo causar escurecimento da cor através do acúmulo de poeira, sujeira e poluição urbana.

Portanto, é recomendado a manutenção periódica dessas superfícies, com limpezas e se necessário repintura, para garantir a durabilidade e eficiência.

A comparação entre os resultados experimentais e numéricos, realizada através do parâmetro estatístico Coeficiente de Pearson, apresentou uma excelente conformidade. A similaridade entre os gráficos do comportamento das temperaturas ilustra visualmente essa correspondência. Assim pôde-se observar que a metodologia utilizada para o modelo numérico reproduziu de forma precisa as condições experimentais, embora os resultados numéricos apresentem pequenas variações nas temperaturas observadas.

A partir dos dados experimentais foi possível desenvolver um programa, em linguagem Python, capaz de obter valores numéricos para a temperatura superior e inferior de modo bastante aproximado aos dados experimentais.

Embora o programa desenvolvido seja um protótipo, ele é capaz de estimar as temperaturas e pode ser usado em projetos e iniciativas futuras do próprio Instituto Federal na conscientização e melhoria de tecnologias para a sociedade.

O desenvolvimento do programa não permite ignorar a necessidade de experimentos, mas permite ter, mesmo que de forma provisória, uma ferramenta capaz de estimar as temperaturas e pode ser usado em projetos e iniciativas futuras do próprio IFSertãoPE na conscientização e melhoria de tecnologias para a sociedade.

As consequências práticas dos resultados permitem refletir sobre como tecnologias básicas podem melhorar as condições habitacionais, em especial em

áreas com clima tão intenso quando a cidade de Serra Talhada. Além do exposto, a utilização do programa desenvolvido, embora limitado por ser um protótipo, se mostra um ferramental útil para estudar a análise de calor aplicada aos telhados, ajudando a melhorar o entendimento e conscientização da população e melhorias do próprio campus em projetos futuros de sustentabilidade.

O programa desenvolvido cumpre o objetivo de simular a transferência de calor em telhados, mas apresenta limitações quanto às equações aplicadas, erros experimentais cometidos durante as observações e incerteza nos resultados dos equipamentos de medida. Devido às limitações surgem as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Melhoria no programa de análise e transferência de calor com base em experimentações com duração maiores, avaliando a variação de temperatura ao longo do dia e da noite;
- Melhoria do programa para inclusão da modelagem da telha de fibrocimento;
- Melhoria na modelagem físico-matemática para inclusão de fenômenos desconsiderados durante a análise e modelagem.
- Realizar uma análise econômica dos custos de aplicação e manutenção da pintura.
- Realizar uma análise de redução do consumo de energia de resfriamento após a aplicação da pintura.
- Comparar o potencial de redução do uso de energia de resfriamento para todos os grupos de telha com a aplicação de diferentes demãos de tinta branca.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro: 2005.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro: 2005.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro: 2005.

AKBARI, Hashem *et al.* LOCAL CLIMATE CHANGE AND URBAN HEAT ISLAND MITIGATION TECHNIQUES – THE STATE OF THE ART. **Journal Of Civil Engineering And Management**, v. 22, n. 1, p. 1-16, 18 dez. 2015. Vilnius Gediminas Technical University. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934>.

AKBARI, Hashem; LEVINSON, Ronnen. Evolution of Cool-Roof Standards in the US. **Advances In Building Energy Research**, v. 2, n. 1, p. 1-32, jan. 2008.

AKBARI, Hashem; MENON, Surabi; ROSENFELD, Arthur. Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset co2. **Climatic Change**, v. 94, n. 3-4, p. 275-286, 20 nov. 2008. Springer Science and Business Media LLC.

BANIN, Sérgio L. **Python 3 - Conceitos e Aplicações - Uma abordagem didática**. São Paulo: Editora Saraiva, 2018. E-book. ISBN 9788536530253. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536530253/>.

BAUER, L. A F. **Materiais de Construção - Vol. 2**. 6. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019. E-book. ISBN 9788521636618. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636618/>. Acesso em: 11 set. 2023.

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. **Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. E-book. ISBN 9788521636656. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788521636656/>. Acesso em: 11 set. 2023.

BRETZ, Sarah; AKBARI, Hashem; ROSENFELD, Arthur. Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 1, p. 95-101, jan. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1352-2310\(97\)00182-9](http://dx.doi.org/10.1016/s1352-2310(97)00182-9).

BUXTON, Pamela. **Manual do arquiteto**. Porto Alegre: Grupo A, 2017. E-book. ISBN 9788582604311. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788582604311/>.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. E-book. ISBN 9788580552010. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788580552010/>. Acesso em: 13 out. 2023.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. E-book. ISBN 9788580551280. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788580551280/>. Acesso em: 13 out. 2023.

COELHO, João Carlos M. **Energia e fluidos: transferência de calor**. v.3. São Paulo: Editora Blucher, 2016. E-book. ISBN 9788521209508. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788521209508/>. Acesso em: 15 nov. 2023.

CRESPO, Antônio A. **Estatística fácil**. São Paulo: Editora Saraiva, 2009. E-book. ISBN 9788502122345. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788502122345/>. Acesso em: 04 nov. 2023.

DORNELLES, Kelen Almeida. **Absortancia solar de superficies opacas: metodos de determminação e base de dados para tintas latex acrilica e PVA**. 2008. 160p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP.

DORNELLES, Kelen Almeida. **Biblioteca de absortância de telhas: base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios**. Universidade

de São Paulo. Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, 2021. DOI: Disponível em: www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/571. Acesso em 15 nov. 2023.

DORNELLES, Kelen *et al.* Thermal Performance of White Solar-Reflective Paints for Cool Roofs and the Influence on the Thermal Comfort and Building Energy Use in Hot Climates. **Proceedings Of The ISES Solar World Congress 2011**, Kassel, 2011. International Solar Energy Society. <http://dx.doi.org/10.18086/swc.2011.02.02>.

DUFRIO, Refrigeração. **Termômetro Mira Laser Dugold - DG380**. 2023. Disponível em: <https://www.dufrio.com.br/termometro-mira-laser-dugold-dg380.html>. Acesso em: 29 out. 2023.

DURANTE, Luciane Cleonice *et al.* Conservação de energia em habitação de interesse social: um estudo aplicado ao sistema de cobertura. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 5, n. 10, p. 21226-21243, 2019. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv5n10-282>.

FARHAN, Syed Ahmad *et al.* Effect of Roof Tile Colour on Heat Conduction Transfer, Roof-Top Surface Temperature and Cooling Load in Modern Residential Buildings under the Tropical Climate of Malaysia. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 4665, 22 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su13094665>.

FAZENDA, Jorge M R. **Tintas ciência e tecnologia**. 4. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009. E-book. ISBN 9788521217657. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521217657/>. Acesso em: 07 out. 2023.

GARTLAND, Lisa. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. Tradução Sílvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **DADOS HISTÓRICOS ANUAIS**. 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 16 ago. 2023.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **MAPA DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS**. 2023. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br>. Acesso em: 29 out. 2023.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição (2017)**. 2023. LABREN - Laboratório de Modelagem e Estudos de

Recursos Renováveis de Energia. Disponível em:
http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_PE.html. Acesso em: 16 ago. 2023.

JR., William D C. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2020. E-book. ISBN 9788521637325. Disponível em:
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em: 28 ago. 2023.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. **Princípios de transferência de calor - Tradução da 7ª edição norte-americana**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016. E-book. ISBN 9788522122028. Disponível em:
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522122028/>. Acesso em: 13 out. 2023.

LAMBERT, Kenneth A. **Fundamentos de Python: primeiros programas**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2022. E-book. ISBN 9786555584301. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555584301/>.

LAMBERTS, Roberto. **Desempenho Térmico de Edificações: Aula 9: Desempenho térmico de paredes e coberturas**. Florianópolis: UFSC, 2016.

LEVINSON, Ronnen; BERDAHL, Paul; AKBARI, Hashem. Solar spectral optical properties of pigments—Part I: model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, v. 89, n. 4, p. 319-349, dez. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2004.11.012>.

LEVINSON, Ronnen; BERDAHL, Paul; AKBARI, Hashem. Solar spectral optical properties of pigments—Part II: survey of common colorants. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, v. 89, n. 4, p. 351-389, dez. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2004.11.013>.

MICHELS, Caren. **Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MOORE, David S.; NOTZ, William I.; FLIGNER, Michael A. **A Estatística Básica e sua Prática**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2023. E-book. ISBN 9788521638612. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521638612/>. Acesso em: 10 dez. 2023.

NIMER, Edmon. **CLIMATOLOGIA DO BRASIL**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 422 p.

PERALTA, Gizela. **Desempenho térmico de telhas: análise de monitoramento e normalização específica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. doi:10.11606/D.18.2006.tde-16042007-154420.

ROSENFELD, Arthur H. *et al.* Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. **Energy And Buildings**, v. 22, n. 3, p. 255-265, ago. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00927-p](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(95)00927-p).

RUMSEY, Deborah J. **Estatística para Leigos**. Rio de Janeiro: Editora Alta Books, 2019. E-book. ISBN 9786555200409. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9786555200409/>. Acesso em: 19 nov. 2023.

SANTAMOURIS, M. *et al.* On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 201-216, 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x\(00\)00095-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x(00)00095-5).

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T.. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy**, v. 85, n. 12, p. 3085-3102, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>.

SENA, Anny Isadora Araújo. **MODELAGEM POR DIFERENÇAS FINITAS DO TELHADO VERDE PARA O CLIMA DE CRATEÚS**. 2022. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022.

SILVA, Janilci Serra; SILVA, Richarde Marques da; SANTOS, Celso Augusto Guimarães. Spatiotemporal impact of land use/land cover changes on urban heat islands: a case study of paço do lumiar, brazil. **Building And Environment**, v. 136, p. 279-292, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.041>.

SILVA, M. P.; MARINOSKI, D.; GUTHS, S. AVALIAÇÃO DE TELHADOS CERÂMICOS DE ALTA REFLETÂNCIA SOLAR ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA E ANÁLISE ECONÔMICA EM UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE

CONSTRUÍDO, 18., 2020. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/735>. Acesso em: 28 nov. 2023.

SILVA, Milena Paim da. **Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de alta refletância solar em uma residência unifamiliar**. 2019. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/215434/PECV1199-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 28 nov. 2023.

STINE, W. B.; GEYER, M. **Power From The Sun**. 2001. Disponível em: <http://www.powerfromthesun.net/book.html>. Acesso em: 30 out. 2023.

TIOBE. **TIOBE Programming Community index**. 2023. Disponível em: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/>.

WELTY, James R.; RORRER, Gregory L.; FOSTER, David G. **Fundamentos de Transferência de Momento, de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. E-book. ISBN 9788521634201. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634201/>. Acesso em: 13 out. 2023.

XU, Tengfang *et al.* Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions. **Building And Environment**, v. 48, p. 1-6, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.011>.

APÊNDICE A – SCRIPT DA SIMULAÇÃO EM PYTHON

```

import math as mt
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# -----
# Parâmetros experimentais
# -----
alfa = 0.48 # Absortância da superfície. [TO/T1, T2 e TB] [0.48, 0.158]
epsilon = 0.95 # Emissividade da superfície. [TO/T1, T2 e TB] [0.95, 0.90]
Ajuste_s = 1.181 # Coeficiente angular de ajuste da temperatura
[TO/T1/T2/TB] [1.181, 0.865, 0.785, 0.742]
Ajuste_s_cte = -21.565 # Coeficiente linear de ajuste da temperatura
[TO/T1/T2/TB] [-21.565, 1.063, 2.897, 4.690]
Ajuste_i = 0.771 # Coeficiente de ajuste da temperatura [TO/T1/T2/TB]
[0.771, 0.973, 0.772, 0.974]
Ajuste_i_cte = 12.891 # Coeficiente linear de ajuste da temperatura
[TO/T1/T2/TB] [12.891, 1.976, 9.497, 1.910]
Q = 908.19 # Radiação solar a superfície (W/m²) [908.19, 1017.31, 1054.92,
1011.85, 888.82, 693.45]
T_a = 31.77 # Temperatura ambiente (°C) [31.77, 33.03, 35.40, 35.50,
36.67, 37.13]

# -----
# Parâmetros de entrada da simulação
# -----
sigma = 5.67e-8 # Constante de Stefan-Boltzmann (W/m².K⁴)
hc = 25 # Coeficiente de transferência de calor convectivo (W/(m².K))
k = 1.05 # Coeficiente de transferência de calor por condução (W/(m.K))
altura_telha = 8 # Altura do sólido (milímetros)
tolerancia = 1e-6 # Tolerância
max_iterations = 1000 # Máximo de iterações
dx = 1 # Intervalo (milímetros)
num_pontos_x = 25 # Número de pontos na direção x para a telha
num_pontos_y = 25 # Número de pontos na direção y para a telha

# -----
# Cálculo das constantes matemáticas
# -----
T_ambiente = T_a + 273.15 # Temperatura ambiente em graus Kelvin
T_superior = T_ambiente # Chute inicial da temperatura superior em graus
Kelvin
T_interior = T_ambiente # Chute inicial da temperatura inferior em graus
Kelvin
a_const = (alfa * Q) / (epsilon * sigma) # Constante 1 (K⁴)
b_const = (hc) / (epsilon * sigma) # Constante 2 (K³)
T_erro_superior = []

```

```

# -----
# Criação da malha de impressão dos dados
# -----
x = np.linspace(0, dx, num_pontos_x) # Criação da grade de pontos
horizontal
y = np.linspace(0, altura_telha, num_pontos_y) # Criação da grade de
pontos vertical
X, Y = np.meshgrid(x, y) # Criação de uma malha cartesiana de pontos

# -----
# Método iterativo para calcular T_superior
# -----
for i in range(max_iterations):
    T_superior1 = T_superior
    T_superior = ((a_const + T_ambiente ** 4 - b_const * (T_superior1 -
T_ambiente))) ** 0.25

    if T_superior > T_superior1:
        T_superior = (T_superior + T_superior1) * 0.50
    else:
        T_superior = T_superior1

    if isinstance(T_superior, complex):
        print("Erro na função: T_interior: ", T_superior)
        break

    # Verificar a tolerância
    erro_temperatura_sup = abs(T_superior - T_superior1)
    T_erro_superior.append(erro_temperatura_sup)
    if erro_temperatura_sup < tolerancia:
        break

T_superior = T_superior - 273.15 # Converte a temperatura para graus
Celsius
T_superior = round(T_superior, 2)
T_superior = Ajuste_s * T_superior + Ajuste_s_cte

# -----
# Estimativa da T_inferior
# -----
T_inferior = round(T_superior - (altura_telha * Q * alfa / (1000 * k)),
2)
T_inferior = Ajuste_i * T_inferior + Ajuste_i_cte

# -----
# Imprime os valores da temperatura
# -----
print("")
print(f"Estimativa da temperatura superfície superior (T_superior) da
telha: {T_superior:.2f} °C")

```

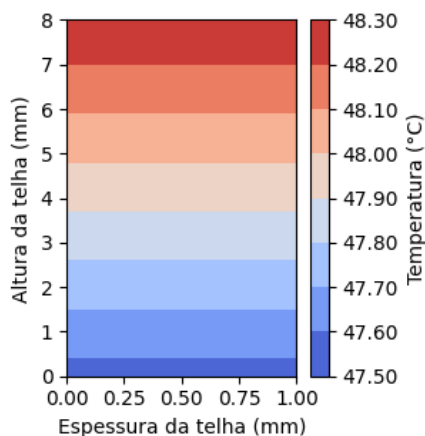
```
print(f"Estimativa da temperatura superfície inferior (T_inferior) da
telha: {T_inferior:.2f} °C")
print("")

# -----
# Plot da distribuição de temperatura
# -----
Tt = T_inferior + (T_superior - T_inferior) * (Y / altura_telha) # Calcula
o gradiente de temperatura entre as superfícies da telha
print("")

plt.figure(figsize=(2.6, 3.25))
plt.contourf(X, Y, Tt, cmap='coolwarm')
plt.colorbar(label='Temperatura (°C)', format='%.2f')
plt.rcParams.update({'font.size': 9})
plt.xlabel('Espessura da telha (mm)')
plt.ylabel('Altura da telha (mm)')
plt.show()
print("")
```

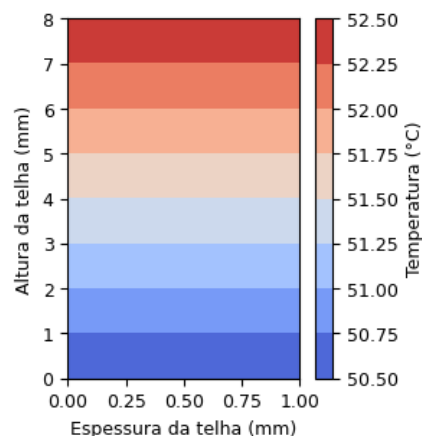
APÊNDICE B – GRÁFICOS DO GRADIENTE TÉRMICO DA TELHA

Figura 19 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 10:00.



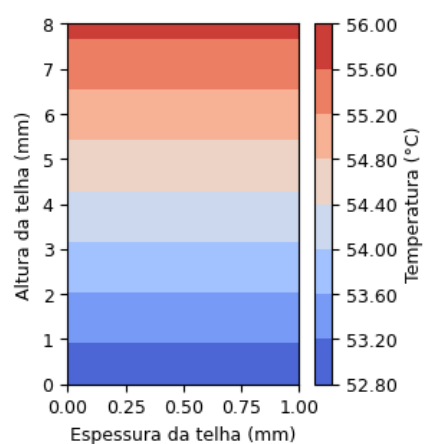
Fonte: Autor (2023).

Figura 20 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 11:00.



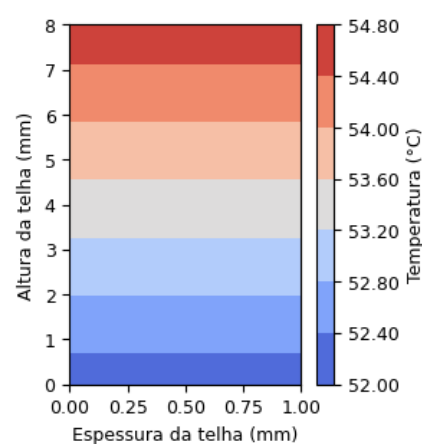
Fonte: Autor (2023).

Figura 21 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 12:00.



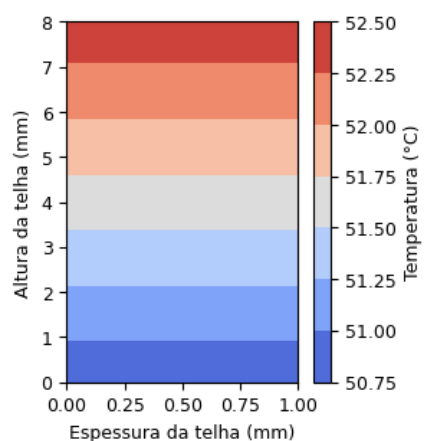
Fonte: Autor (2023).

Figura 22 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 13:00.



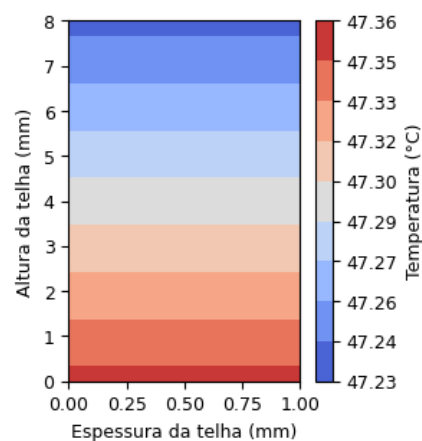
Fonte: Autor (2023).

Figura 23 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 14:00.



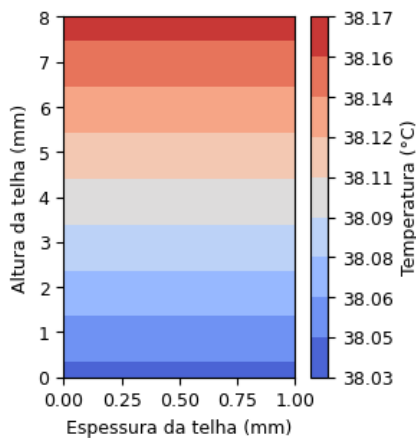
Fonte: Autor (2023).

Figura 24 - Comportamento térmico da Telha original (TO) às 15:00.



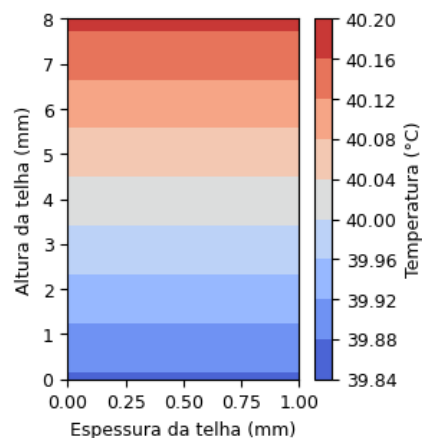
Fonte: Autor (2023).

Figura 25 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 10:00.



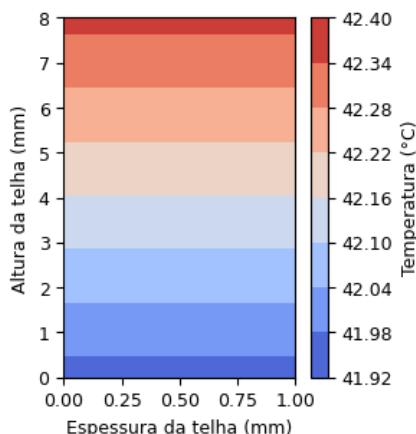
Fonte: Autor (2023).

Figura 26 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 11:00.



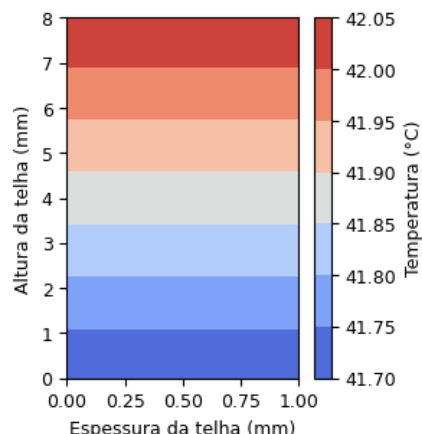
Fonte: Autor (2023).

Figura 27 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 12:00.



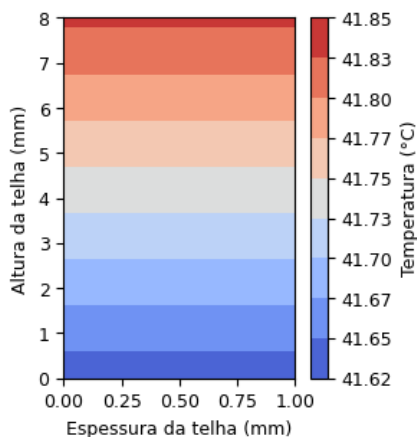
Fonte: Autor (2023).

Figura 28 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 13:00.



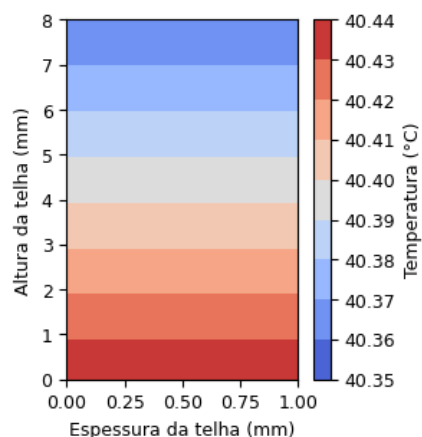
Fonte: Autor (2023).

Figura 29 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 14:00.



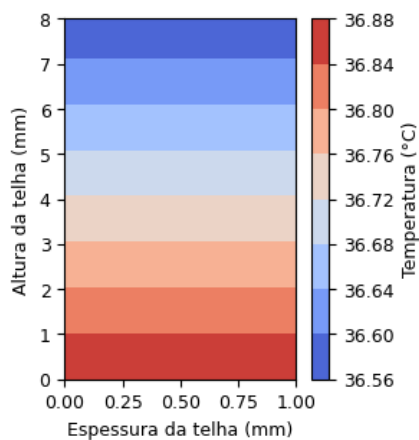
Fonte: Autor (2023).

Figura 30 - Comportamento térmico da Telha com uma demão de tinta branca (T1) às 15:00.



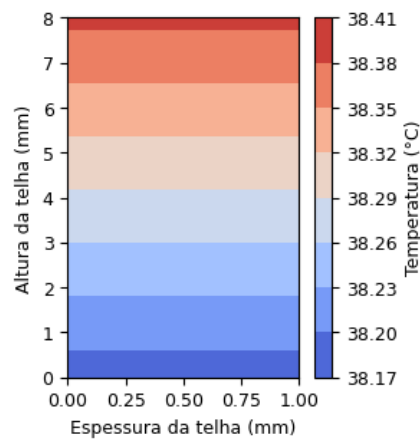
Fonte: Autor (2023).

Figura 31 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 10:00.



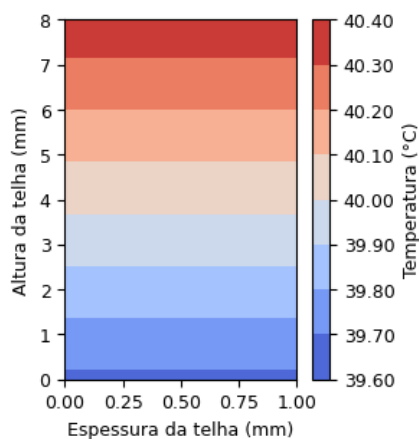
Fonte: Autor (2023).

Figura 32 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 11:00.



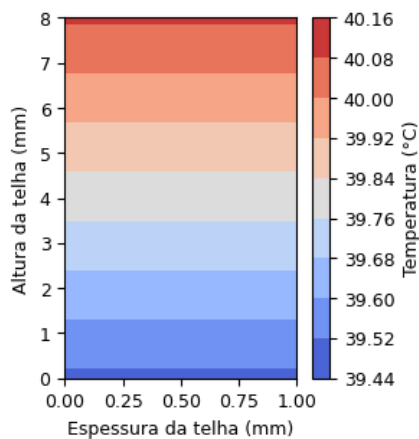
Fonte: Autor (2023).

Figura 33 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 12:00.



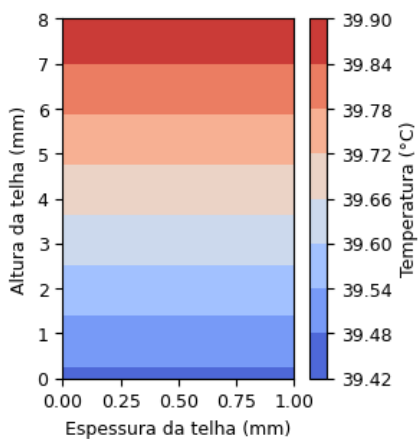
Fonte: Autor (2023).

Figura 34 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 13:00.



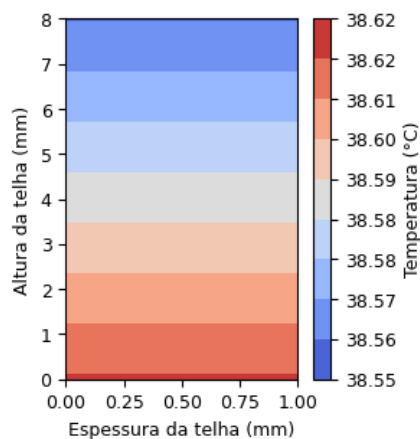
Fonte: Autor (2023).

Figura 35 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 14:00.



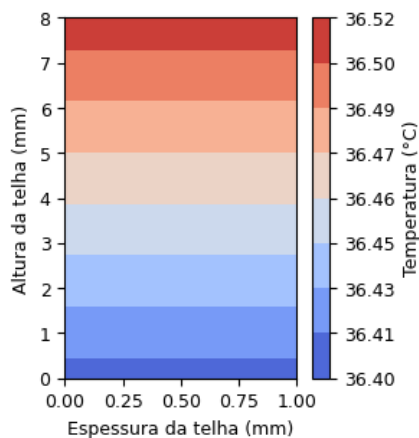
Fonte: Autor (2023).

Figura 36 - Comportamento térmico da Telha com duas demãos de tinta branca (T2) às 15:00.



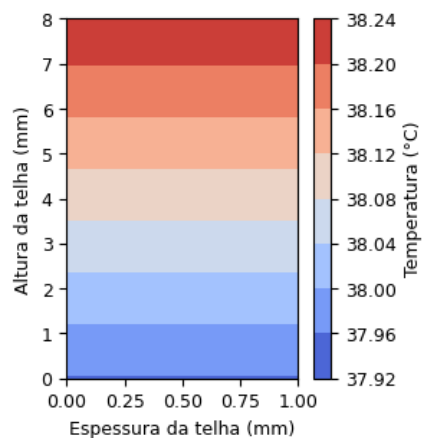
Fonte: Autor (2023).

Figura 37 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 10:00.



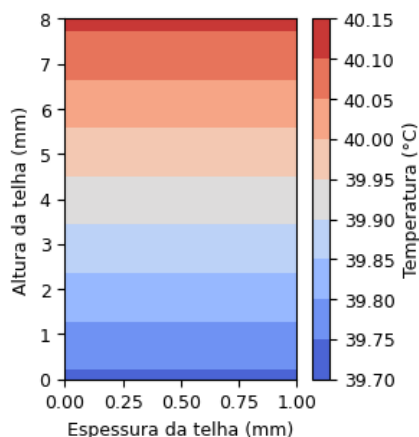
Fonte: Autor (2023).

Figura 38 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 11:00.



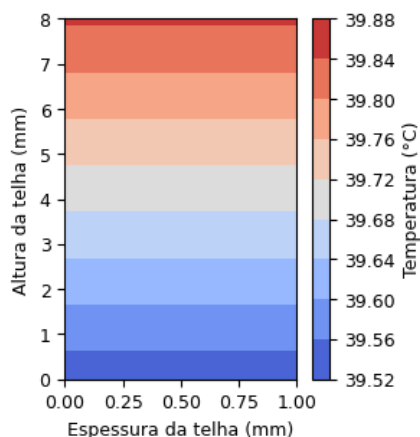
Fonte: Autor (2023).

Figura 39 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 12:00.



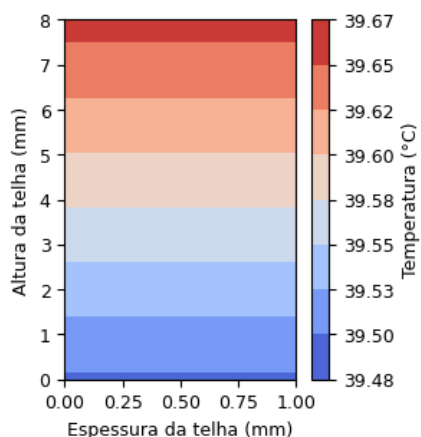
Fonte: Autor (2023).

Figura 40 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 13:00.



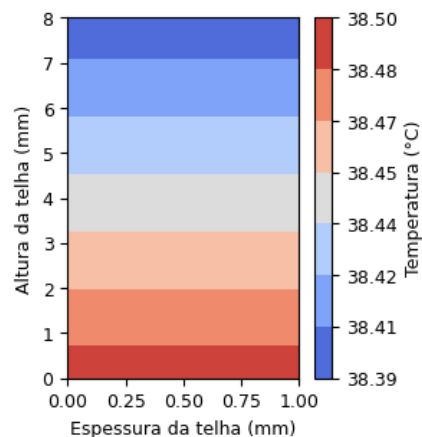
Fonte: Autor (2023).

Figura 41 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 14:00.



Fonte: Autor (2023).

Figura 42 - Comportamento térmico da Telha completamente branca (TB) às 15:00.



Fonte: Autor (2023).