

Samara Katyana Brique

**EMPREGO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NO  
DIAGNÓSTICO DE FALHAS DE ADERÊNCIA DE PEÇAS  
CERÂMICAS UTILIZADAS EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Civil.  
Orientador: Prof. Dr. Ivo José Padaratz

Florianópolis

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

BRIQUE, SAMARA KATYANA

EMPREGO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NO DIAGNÓSTICO DE FALHAS DE ADERÊNCIA DE PEÇAS CERÂMICAS UTILIZADAS EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS / SAMARA KATYANA BRIQUE ; orientador, IVO JOSÉ PADARATZ - Florianópolis, SC, 2016. 176 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. TERMOGRAFIA. 3. DETECÇÃO DE DEFEITOS. 4. ABSORTÂNCIAS. 5. FACHADAS. I. PADARATZ, IVO JOSÉ. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Samara Katyana Brique

**EMPREGO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NO  
DIAGNÓSTICO DE FALHAS DE ADERÊNCIA DE PEÇAS  
CERÂMICAS UTILIZADAS EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 07 de dezembro de 2016.

---

Prof. Dr. Glicério Trichês  
Coordenador do Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil

---

Prof. Ivo José Padaratz – Orientador, ECV/UFSC

**Banca examinadora:**

---

Prof. Elton Bauer, PECC/UnB (Vídeoconferência)

---

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, ECV/UFSC

---

Prof. Roberto Lamberts, ECV/UFSC



*Este trabalho é dedicado a  
minha avó Saete, pelo apoio  
incondicional.*



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, em primeiro lugar, pela vida, saúde, amigos e por mais uma vitória alcançada em minha vida.

À minha família, principalmente minha vó Salete, pelo amor e constante apoio.

Ao professor Ivo, meu orientador, por quem tenho grande admiração, pela sugestão da linha de pesquisa, pela generosidade no compartilhamento do conhecimento, dedicação e apoio sempre presentes.

Ao meu noivo Paulo, pelo encanto no sorriso que faz desaparecer as dúvidas e por me fazer acreditar que sou especial.

Ao Deivis L. Marinoski, por me auxiliar no ensaio de absorção dos revestimentos e sempre estar disponível nos momentos de dúvidas.

Ao Prof. Ricardo Rütger, por ter permitido que eu usasse as dependências do Centro Integrado de Pesquisa em Energia Solar para realizar os ensaios.

A todos os professores e técnicos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC que contribuíram para este trabalho.



## RESUMO

Os recorrentes casos de falhas de aderência em revestimentos de fachadas têm se tornado um grande problema para a indústria da construção civil, notoriamente sobre aquelas em acabamento cerâmico. A identificação da falha somente após a sua manifestação visual restringe as alternativas de correção e minimização do problema. O objetivo principal deste trabalho de mestrado foi avaliar o emprego da técnica de termografia infravermelha na detecção de falhas de aderência em fachadas com revestimentos cerâmicos. Para desenvolver essa tarefa, foi realizado um programa experimental por meio da confecção de painéis de alvenaria revestidos com cerâmica nas cores preta e branca (cores extremas), onde foram simuladas falhas internas variando alguns parâmetros, como profundidade, dimensões da falha e tempo de aquecimento. Os painéis foram avaliados por meio da termografia passiva, onde a análise conta com as condições naturais da estrutura estudada e do seu entorno, sendo o calor do sol um fator determinante. Como resultado, observou-se que a cor do revestimento e sua respectiva absorvância apresentaram influência na detecção dos defeitos na fase de aquecimento das peças, tanto em termos qualitativos (visualização do defeito) quanto quantitativos (*Delta-T*). Porém, a partir do momento em que as peças entram em equilíbrio térmico com o ambiente e também na fase de resfriamento, a cor não demonstrou mais influência, uma vez que os resultados foram semelhantes para ambas as cores. Na maioria dos casos, verificou-se que a realização do ensaio entre 10h00min e 16h00min não traz resultados satisfatórios, independente da cor. Para a cor branca, os melhores contrastes foram percebidos na fase de resfriamento das peças, a partir das 16h00min. Na cor preta, os maiores *Delta-Ts* foram detectados na fase de aquecimento, exceto nos dias em que a temperatura ambiente média estava abaixo de 18°C ou quando a superfície analisada estava voltada para o sul.

**Palavras chave:** termografia, detecção de defeitos, absorvâncias, fachadas.



## **ABSTRACT**

The recurrent cases of adhesion failure on facade coatings has become a great problem for the construction industry, specially about those with ceramic finishing. The failure identification only after of its visual manifestation limit the alternatives of correction and minimization of the problem. The main objective of this work was to assess the potentialities and limitations of the infrared termography in to the detection and characterization of ceramic finishing facades. To perform this task, it was performed an experimental program through the production of masonry panels lined with ceramic in the colors black and white (extreme colors), in which internal failures were simulated varying some parameters as depth, dimenions and heating time. The panels were assessed through passive termography, in which the assessment counts with natural conditions of the structure and its surroundings, being the heating from the Sun a predominant factor. As a result, it was observed that the lining color and its respective absorptance show influence in the detection of defects at the heating phase, in both qualitative (defect visualization) and quantitative (Delta-T) terms. However, from the moment in which the panels reach the thermal equilibrium with the environment and in the cooling phase, the lining color doesn't show influence anymore, once the results are similar for both colors. In most cases, it was verified that performing the tests between 10:00 am and 4:00 pm doesn't bring good results, regardless of color. For the white color, better contrasts were noticed in the cooling phase, starting at 4:00 pm. For the black color, the greater Delta-Ts were detected in the heating phase, with the exception of the days in which the mean temperature was lower than 18°C or when the assessed surface was facing South.

**Keywords:** termography, defects detection, absorptance.



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>17</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>25</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>27</b>
<b>1.1. Considerações preliminares .....</b>	<b>27</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>29</b>
<b>1.3. Hipóteses .....</b>	<b>30</b>
<b>1.4. Organização do trabalho .....</b>	<b>30</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>33</b>
<b>2.1. Princípios fundamentais da termografia infravermelha .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2. Fenômenos de transferência de calor .....</b>	<b>34</b>
2.2.1. <i>Convecção</i> .....	35
2.2.2. <i>Condução</i> .....	36
2.2.3. <i>Radiação</i> .....	37
<b>2.3. A natureza da radiação térmica: conceitos fundamentais.....</b>	<b>38</b>
<b>2.4. Absorção, reflexão e transmissão de superfícies reais .....</b>	<b>41</b>
2.4.1. <i>Absortância solar e as cores das superfícies</i> .....	42
<b>2.5. Lei de Kirchhoff .....</b>	<b>45</b>
<b>2.6. Manifestações patológicas em sistemas de revestimento cerâmico .....</b>	<b>46</b>
2.6.1. <i>Gretamentos</i> .....	46
2.6.2. <i>Presença de fungos ou algas</i> .....	46
2.6.3. <i>Fissuras</i> .....	46
2.6.4. <i>Descolamentos</i> .....	47
<b>2.7. Termografia infravermelha como ensaio não destrutivo.....</b>	<b>48</b>
2.7.1. <i>O sistema de termografia infravermelha para ensaios não destrutivos</i> .....	48
2.7.2. <i>Métodos de inspeção: Ativa e Passiva</i> .....	50

2.7.3. Tipos de Investigação: Qualitativa e Quantitativa .....	51
2.7.4. Detecção de defeitos.....	52
2.7.5. Fatores que influenciam os resultados dos ensaios .....	54
<b>2.8. Estudos recentes sobre a aplicação da Termografia Infravermelha em Engenharia Civil.....</b>	<b>60</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1. Materiais.....</b>	<b>65</b>
3.1.1. Confeção dos painéis.....	66
<b>3.2. Métodos.....</b>	<b>68</b>
3.2.1. Ensaios preliminares.....	69
3.2.2. Aquisição das imagens termográficas.....	76
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>81</b>
<b>4.1. Ensaio 01 – LPV (Leste, plena, verão) .....</b>	<b>82</b>
4.1.1. Considerações iniciais .....	82
4.1.2. Obtenção dos termogramas .....	83
4.1.3. Evolução do aquecimento dos painéis .....	90
4.1.4. Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos.....	93
4.1.5. Conclusões gerais sobre o ensaio .....	94
<b>4.2. Ensaio 2 – LPI (leste, plena, inverno).....</b>	<b>96</b>
4.2.1. Considerações iniciais .....	96
4.2.2. Obtenção dos termogramas .....	97
4.2.3. Evolução do aquecimento dos painéis .....	103
4.2.4. Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos.....	106
4.2.5. Conclusões gerais sobre o ensaio .....	107
<b>4.3. Ensaio 3 – LNO (leste, nublado, outono) .....</b>	<b>108</b>
4.3.1. Considerações iniciais .....	108

4.3.2. Obtenção dos termogramas.....	109
4.3.3. Evolução do aquecimento dos painéis.....	114
4.3.4. Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos.....	117
4.3.5. Conclusões gerais sobre o ensaio .....	117
<b>4.4. Ensaio 4 - OPV (oeste, plena, verão).....</b>	<b>119</b>
4.4.1. Considerações iniciais.....	119
4.4.2. Obtenção dos termogramas.....	120
4.4.3. Evolução do aquecimento dos painéis.....	123
4.4.4. Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos.....	125
4.4.5. Conclusões gerais sobre o ensaio .....	125
<b>4.5. Ensaio 5 – OPI (Oeste, plena, inverno).....</b>	<b>127</b>
4.5.1. Considerações iniciais.....	127
4.5.2. Obtenção dos termogramas.....	128
4.5.3. Evolução do aquecimento dos painéis.....	132
4.5.4. Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos.....	135
4.5.5. Conclusões gerais sobre o ensaio .....	135
<b>4.6. Ensaio 6 – ONO (Oeste, nublado, outono) .....</b>	<b>137</b>
4.6.1. Considerações iniciais.....	137
4.6.2. Obtenção dos termogramas.....	138
4.6.3. Evolução do aquecimento dos painéis.....	145
4.6.4. Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos.....	148
4.6.5. Conclusões gerais sobre o ensaio .....	148
<b>4.7. Ensaio 7 – NPO (norte, plena, outono) .....</b>	<b>149</b>
4.7.1. Considerações iniciais.....	149
4.7.2. Obtenção dos termogramas.....	150

4.7.3. <i>Evolução do aquecimento dos painéis</i> .....	158
4.7.4. <i>Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos</i> .....	162
4.7.5. <i>Conclusões gerais sobre o ensaio</i> .....	162
<b>4.8. Ensaio 8 – SPO (sul, plena, outono)</b> .....	<b>163</b>
4.8.1. <i>Considerações iniciais</i> .....	163
4.8.2. <i>Obtenção dos termogramas</i> .....	164
4.8.3. <i>Evolução do aquecimento dos painéis</i> .....	168
4.8.4. <i>Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos</i> .....	170
4.8.5. <i>Conclusões gerais sobre o ensaio</i> .....	170
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>171</b>
<b>5.1. Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	<b>174</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>175</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismos de transferência de calor em edifícios.....	35
Figura 2 – Convecção de uma superfície para um fluido em movimento.....	36
Figura 3 - Modo de transferência de calor por condução.....	37
Figura 4 - Espectro eletromagnético.....	38
Figura 5 - Absorção, reflexão e transmissão de superfícies reais.....	41
Figura 6 – Curva de sensibilidade do olho humano.....	43
Figura 7 - Curvas espectrais de refletância para diferentes cores de tinta na região visível.....	44
Figura 8 - Representação esquemática do sistema termográfico.....	49
Figura 9 - Variação da temperatura superficial em função da variação da emissividade considerada.....	52
Figura 10 – Detecção de defeitos a partir de: (a) curva de decaimento de temperatura, (b) perfis de temperatura e (c) termograma.....	53
Figura 11 - Emissividade espectral de alguns não metais (1 – água; 2 – terra; 3 – plástico).....	56
Figura 12 - Variação da emissividade com o comprimento de onda para metais (1 - cobre; 2 – ferro; 3 – alumínio; 4 – prata).....	57
Figura 13 - Variação da emissividade em função do ângulo de observação.....	58
Figura 14 - Variação da emissividade total com a temperatura de alguns não metais: borracha (1), porcelana (2), cortiça (3); papel (4); argila refratária (5).....	59
Figura 15 - Imagem visível e termograma da Igreja do Carmo.....	61
Figura 16 - Configuração dos painéis.....	66
Figura 17 – Produção dos painéis: (a) e (b) execução do emboço; (c), (d) e (e) execução da argamassa colante e assentamento da pastilha; (f) painéis prontos.....	67
Figura 18 – Disposição do ensaio.....	68
Figura 19 - Câmera Flir B-400.....	69
Figura 20 – Método refletor.....	70
Figura 21: Simulação de temperatura refletida para TR=29,2°C (real).....	71
Figura 22: Simulação de temperatura refletida para TR=27,1°C.....	72
Figura 23: Simulação de temperatura refletida para TR=32,1°C.....	72
Figura 24: Simulação de temperatura refletida para TR=37,1°C.....	73
Figura 25: Curva de refletância espectral das amostras.....	75
Figura 26 - Espectro padrão.....	76
Figura 27 - Métodos de transmissão e reflexão.....	78
Figura 28 - Distância mínima focal.....	79

Figura 29 – Calculadora do campo de visão.....	79
Figura 30 - Campo de visão (FOV) e Campo de Visão Instantâneo (IFOV).....	80
Figura 31 - (a) Painel Branco; (b) Painel preto e; (c) perfil térmico .....	81
Figura 32 – Esquema de ensaio .....	82
Figura 33: LPV, 08h00min: (a) painel branco; (b) painel preto e; (c) perfil de temperatura. ....	84
Figura 34: LPV, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	84
Figura 35: LPV, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	85
Figura 36: LPV, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	85
Figura 37: LPV, 10h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	85
Figura 38: LPV, 10h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	86
Figura 39: LPV, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	86
Figura 40: LPV, 11h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	87
Figura 41: LPV, 12h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	87
Figura 42: LPV, 16h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	88
Figura 43: LPV, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	88
Figura 44: LPV, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	89
Figura 45: LPV, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	89
Figura 46: LPV, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	89
Figura 47: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia.....	90
Figura 48: <i>Delta-T</i> – defeitos de 3cm.....	91
Figura 49: <i>Delta-T</i> – defeitos de 6cm.....	92
Figura 50: <i>Delta-T</i> – defeitos de 9cm.....	92
Figura 51 – Gráfico <i>Delta-T</i> x velocidade do vento.....	93
Figura 52 – Esquema de ensaio.....	96
Figura 53: LPI, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	98

Figura 54: LPI, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	98
Figura 55: LPI, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	98
Figura 56: LPI, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	99
Figura 57: LPI, 10h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	99
Figura 58: LPI, 10h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	99
Figura 59: LPI, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	100
Figura 60: LPI, 11h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	100
Figura 61: LPI, 12h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	100
Figura 62: LPI, 12h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	101
Figura 63: LPI, 16h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	101
Figura 64: LPI, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	102
Figura 65: LPI, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	102
Figura 66: LPI, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	102
Figura 67: LPI, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	103
Figura 68: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia.....	103
Figura 69: <i>Delta-T</i> – defeitos de 3cm.....	104
Figura 70: <i>Delta-T</i> – defeitos de 6cm.....	105
Figura 71: <i>Delta-T</i> – defeitos de 9cm.....	106
Figura 72 - Gráfico <i>Delta-T</i> x velocidade do vento.....	107
Figura 73 – Esquema de ensaio .....	108
Figura 74: LNO, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	110
Figura 75: LNO, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	110
Figura 76: LNO, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	111

Figura 77: LNO, 09h30min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	111
Figura 78: LNO, 10h00min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	111
Figura 79: LNO, 10h30min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	112
Figura 80: LNO, 11h00min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	112
Figura 81: LNO, 11h30min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	112
Figura 82: LNO, 15h30min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	113
Figura 83: LNO, 16h00min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	113
Figura 84: LNO, 16h30min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	114
Figura 85: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia.....	114
Figura 86: <i>Delta-T</i> – defeitos de 3cm.....	115
Figura 87: <i>Delta-T</i> – defeitos de 6cm.....	116
Figura 88: <i>Delta-T</i> – defeitos de 9cm.....	116
Figura 89 – Gráfico <i>Delta-T</i> x velocidade do vento.....	117
Figura 90 – Esquema de ensaio .....	119
Figura 91: OPV, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	121
Figura 92: OPV, 14h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	121
Figura 93: OPV, 14h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	122
Figura 94: OPV, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	122
Figura 95: OPV, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	123
Figura 96: OPV, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	123
Figura 97 - Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia .....	124
Figura 98: <i>Delta-T</i> – defeitos de 6cm.....	124
Figura 99: <i>Delta-T</i> – defeitos de 9cm.....	125
Figura 100 – Esquema de ensaio.....	127
Figura 101: OPI, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	129

Figura 102: OPI, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	129
Figura 103: OPI, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	129
Figura 104: OPI, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	130
Figura 105: OPI, 10h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	130
Figura 106: OPI, 10h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	130
Figura 107: OPI, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	131
Figura 108: OPI, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	131
Figura 109: OPI, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	131
Figura 110: OPI, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	132
Figura 111: OPI, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	132
Figura 112: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia.....	133
Figura 113: <i>Delta-T</i> – defeitos de 3cm.....	134
Figura 114: <i>Delta-T</i> – defeitos de 6cm.....	134
Figura 115 – <i>Delta-T</i> – defeitos de 9cm .....	135
Figura 116 – Esquema de ensaio .....	137
Figura 117: ONO, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	139
Figura 118: ONO, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	139
Figura 119: ONO, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	140
Figura 120: ONO, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	140
Figura 121: ONO, 10h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	140
Figura 122: ONO, 10h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	141
Figura 123: ONO, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	141
Figura 124: ONO, 11h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	141

Figura 125: ONO, 12h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	142
Figura 126: ONO, 12h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	142
Figura 127: ONO, 13h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	142
Figura 128: ONO, 13h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	143
Figura 129: ONO, 14h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	143
Figura 130: ONO, 14h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	143
Figura 131: ONO, 15h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	144
Figura 132: ONO, 15h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	144
Figura 133: ONO, 16h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	144
Figura 134: ONO, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	145
Figura 135: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia.....	145
Figura 136: <i>Delta-T</i> – defeitos de 3cm.....	146
Figura 137: <i>Delta-T</i> – defeitos de 6cm.....	147
Figura 138: <i>Delta-T</i> – defeitos de 9cm.....	147
Figura 139 – Esquema de ensaio.....	149
Figura 140: NPO, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	151
Figura 141: NPO, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	151
Figura 142: NPO, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	151
Figura 143: NPO, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	152
Figura 144: NPO, 10h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	152
Figura 145: NPO, 10h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	152
Figura 146: NPO, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	153
Figura 147: NPO, 11h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	153

Figura 148: NPO, 12h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	153
Figura 149: NPO, 12h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	154
Figura 150: NPO, 13h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	154
Figura 151: NPO, 13h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	154
Figura 152: NPO, 14h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	155
Figura 153: NPO, 14h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	155
Figura 154: NPO, 15h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	155
Figura 155: NPO, 15h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	156
Figura 156: NPO, 16h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	156
Figura 157: NPO, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	156
Figura 158: NPO, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	157
Figura 159: NPO, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	157
Figura 160: NPO, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	157
Figura 161 - 11h00min: Insolação plena .....	158
Figura 162 - 11h30min: Insolação parcial .....	158
Figura 163 - 12h00min: Insolação plena .....	159
Figura 164 - 12h30min: Insolação parcial .....	159
Figura 165: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia.....	159
Figura 166: <i>Delta-T</i> – defeitos de 3cm.....	160
Figura 167: <i>Delta-T</i> – defeitos de 6cm.....	161
Figura 168: <i>Delta-T</i> – defeitos de 9cm.....	161
Figura 169 – Esquema de ensaio .....	163
Figura 170: SPO, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	165
Figura 171: SPO, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	165
Figura 172: SPO, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.....	165

Figura 173: SPO, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	166
Figura 174: SPO, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	166
Figura 175: SPO, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	167
Figura 176: SPO, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	167
Figura 177: SPO, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura .....	167
Figura 178: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia.....	168
Figura 179: <i>Delta-T</i> – defeitos de 3cm.....	168
Figura 180: <i>Delta-T</i> – defeitos de 6cm.....	169
Figura 181: <i>Delta-T</i> – defeitos de 9cm.....	170

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de emissividade de diferentes materiais (FREITAS, 2012).....	40
Tabela 2 - Valores de absorvidade de diferentes materiais (FREITAS, 2012).....	41
Tabela 3 - Composição dos painéis.....	65
Tabela 4 - Especificações da câmara.....	69
Tabela 5 - Temperaturas observadas no painel preto.....	73
Tabela 6 - Refletância solar das amostras.....	75
Tabela 7 - Condições climáticas em 11 de março de 2016.....	83
Tabela 8 - Condições climáticas em 24 de junho de 2016.....	97
Tabela 9 - Condições climáticas em 19 de abril de 2016.....	109
Tabela 10 - Condições climáticas em 06 de março de 2016.....	120
Tabela 11 – Condições climáticas em 21 de junho de 2016.....	128
Tabela 12 – Condições climáticas em 03 de maio de 2016.....	138
Tabela 13 - Condições climáticas em 30 de março de 2016.....	150
Tabela 14 – Condições climáticas em 07 de abril de 2016.....	164



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações preliminares

Os recorrentes casos de falhas de aderência em revestimentos de fachadas têm se tornado um grande problema para a indústria da construção civil, notoriamente sobre aquelas em acabamento cerâmico. Ainda que as vantagens do produto sejam inquestionáveis, principalmente no que se refere à durabilidade e menor necessidade de manutenção, a ocorrência de casos de descolamentos de placas tornou-se alvo de discussões no setor, em função do risco em que são submetidos os moradores e transeuntes.

Nesse cenário, a identificação da falha somente após a sua manifestação visual restringe as alternativas de correção e minimização do problema. Um dos principais obstáculos encontrados para obter um diagnóstico preliminar é a dificuldade na avaliação e quantificação desses defeitos. A elevada altura dos edifícios, as dificuldades de acesso e a necessidade de realizar avaliações com os prédios já ocupados são alguns pontos que tratam o quão complexa pode ser a obtenção de dados e elaboração de diagnósticos satisfatórios.

possibilidade de inspecionar a qualidade e durabilidade de um produto ou sistema sem a posterior inutilidade e descarte do mesmo torna as técnicas de Ensaio Não-Destrutivo (END) uma ferramenta valiosa. Entre os diferentes métodos de END que podem ser empregados, a Termografia Infravermelha (TIR) tem se mostrado uma das técnicas de inspeção mais atrativas e promissoras, principalmente pela possibilidade de realizar o ensaio sem contato com a superfície investigada.

Partindo do princípio de que todos os corpos com temperatura acima de zero absoluto (0 K) emitem radiação infravermelha, a inspeção é realizada com a captação dessa radiação e, através do campo de temperatura da superfície, defeitos internos podem ser detectados e caracterizados. Esta radiação é naturalmente emitida por corpos e depende da temperatura e emissividade, ou seja, a capacidade de emitir calor da superfície. Quanto mais quente o objeto, maior a quantidade de radiação emitida.

Sabe-se que a absorção de calor é sensivelmente alterada em função da cor da superfície refletida. As distintas cores dos revestimentos têm valores de absorções diferentes, ou seja, absorvem diferentemente a radiação com o consequente aquecimento. Desse fato, resultam variações de temperatura superficial visualizadas nos

termogramas. Esse foi um dos problemas abordados nesta pesquisa. Ou seja, a variação da temperatura na imagem térmica devido às diferentes absorvâncias das cores pode ser tão acentuada a ponto de camuflar a existência de defeitos entre o revestimento e o suporte?

A presença de falhas reduz a taxa de transporte de calor no material, a qual pode ser detectada na superfície. Assim, as anomalias podem ser identificadas por comparação com as regiões circunvizinhas. No entanto, uma imagem termográfica está associada à dinâmica das trocas de calor do elemento construtivo e, dependendo das condições existentes na fachada, uma anomalia pode aparecer como um ponto quente, ponto frio, ou ainda não ser detectada.

O vento, com uma velocidade significativa, afeta as imagens térmicas. Se a temperatura ambiente está muito alta ou muito baixa, os sistemas de detecção de radiação infravermelha tornam-se menos estáveis. Os fluxos de calor na envoltória do edifício obviamente não são estáticos nem constantes ao longo do dia, e dependem em grande escala do aquecimento pelo sol, da temperatura ambiente e das condições de resfriamento da fachada.

Em face dessa situação, verifica-se que tanto a captura da imagem como a análise da mesma necessitam de padrões e critérios capazes de identificar e associar os pontos ou regiões da imagem às anomalias na fachada.

Para responder a essas questões, foi realizado um programa experimental por meio da confecção de painéis de alvenaria revestidos com cerâmica nas cores preta e branca (cores extremas), onde foram simuladas falhas internas variando alguns parâmetros, como profundidade, dimensões da falha e tempo de aquecimento. Os painéis foram avaliados por meio da termografia passiva, onde a análise conta com as condições naturais da superfície estudada e do seu entorno, sendo o calor do sol um fator determinante.

Os painéis foram posicionados em quatro diferentes orientações solares (leste, oeste, norte e sul) onde houve um acompanhamento da evolução do aquecimento desses painéis por um período pré-determinado. Nas orientações leste e oeste, foram realizados ensaios em três situações climáticas distintas: 1 - insolação plena (sem nuvens), verão; 2 - insolação plena, inverno; 3 - insolação parcial (nublado), outono. Nas orientações norte e sul, os ensaios ocorreram apenas em uma situação climática: insolação plena, outono. Considerando que foram tomadas 19 imagens por dia (entre 08h00min e 18h00min), foram analisadas, no total, 152 imagens.

Esta é a segunda pesquisa realizada na Universidade Federal de Santa Catarina que tem como objetivo investigar as potencialidades da Termografia Infravermelha na detecção de defeitos. Entre 2014 e 2015, Caldeira analisou danos subsuperficiais na interface PRF/concreto, utilizando diferentes equipamentos para excitação térmica, e constatou que os resultados mais expressivos foram obtidos para os aquecimentos com lâmpada incandescente e aquecedor halógeno, ambas fontes de calor que emitem radiação. Constatou, ainda, que a inserção incorreta dos parâmetros de entrada da câmera causam grandes distúrbios nas medições, principalmente em relação à emissividade. Como conclusão geral do trabalho, observou que a termografia infravermelha promove notável identificação de falhas subsuperficiais entre concreto e PRF.

As informações levantadas no presente trabalho indicam que a aplicação do ensaio não destrutivo de termografia infravermelha possui inúmeras vantagens quando utilizado na inspeção de defeitos em painéis revestidos com cerâmica, porém, algumas limitações e minuciosidades foram observadas, as quais serão discutidas e apresentadas ao longo deste trabalho.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o emprego da técnica de termografia infravermelha na detecção de falhas de aderência em fachadas com revestimentos cerâmicos. Para desenvolver essa tarefa, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o comportamento das imagens infravermelhas quando as superfícies investigadas possuem refletâncias distintas e, conseqüentemente, absorvem diferentemente a radiação;
- Em razão da diferença na absorção de calor, investigar o tempo de aquecimento necessário para que as falhas de descolamento das peças cerâmicas sejam percebidas nos termogramas para as duas cores analisadas;
- Avaliar as melhores condições para captura das imagens, em função da exposição ao sol e do fluxo de calor no elemento;
- Utilizar os termogramas obtidos nos experimentos para analisar as limitações da técnica no que se refere aos tamanhos e profundidades dos defeitos.

### 1.3. Hipóteses

- As falhas de aderência no interior do revestimento cerâmico apresentam comportamentos diferenciados na transferência de calor por radiação;
- A técnica da termografia infravermelha passiva é capaz de captar e registrar esses gradientes térmicos superficiais, mesmo quando há variação de diferentes parâmetros, tais como profundidade e tamanho dos defeitos;
- As distintas cores dos revestimentos têm valores de absorvidades diferentes, e cores mais claras, cuja absorção de calor é sensivelmente menor do que em cores escuras, podem mascarar ou dificultar a obtenção dos termogramas;
- Dependendo da orientação solar da fachada que está sendo investigada e o tempo de aquecimento, haverá um melhor horário para captura das imagens, onde estas serão obtidas com maior nitidez.

### 1.4. Organização do trabalho

Esta dissertação está dividida em uma parte teórica, onde serão estudados os principais aspectos que envolvem o uso da técnica de Termografia Infravermelha, fenômenos de transferência de calor por radiação e fatores que podem vir a influenciar nos resultados; e em uma parte experimental, onde se procurou validar as hipóteses propostas. O estudo teórico permitiu fundamentar e estabelecer os limites de detecção de defeitos variando diferentes parâmetros que intervêm durante o processo de medição, além de prover informações úteis que ajudam a interpretar as informações obtidas experimentalmente.

A organização do trabalho será a seguinte:

No Capítulo 1, apresentam-se as problemáticas que envolvem a pesquisa, os interesses e objetivos do estudo e as hipóteses que fundamentam o trabalho, bem como a organização do mesmo.

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos fundamentais da Termografia Infravermelha e os principais fatores que influenciam os resultados dos ensaios, com atenção especial no processo de transferência de calor por radiação. Nesse Capítulo é discutido, ainda, os diferentes métodos e técnicas de detecção de defeitos empregados,

assim como parâmetros de análises e interpretação das imagens térmicas.

No Capítulo 3, de caráter experimental, apresentam-se os diferentes materiais e equipamentos necessários para o desenvolvimento da pesquisa. Igualmente se apresenta a metodologia empregada para realização dos ensaios não destrutivos, detalhando passo a passo cada um dos procedimentos e técnicas utilizadas.

Nos Capítulos 4, 5 e 6 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios, as considerações finais acerca da pesquisa, sugestões para trabalhos futuros e a lista de autores consultados na elaboração do trabalho.



## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Princípios fundamentais da termografia infravermelha**

A termografia por infravermelhos (TIR) é uma técnica utilizada para converter a radiação térmica emitida pela superfície de um objeto, que é invisível ao olho humano devido ao seu comprimento de onda, em imagens visuais detalhadas do perfil de temperaturas. Trata-se de uma técnica versátil, que permite identificar regiões ou pontos onde a temperatura se encontra alterada em relação a um padrão pré-estabelecido, baseando-se na medição da radiação que está sendo emitida.

Para a realização do ensaio, é utilizada uma câmera termográfica que capta a radiação térmica emitida pela superfície, sem a necessidade de um período de estabilização das temperaturas nem de contato com o objeto analisado, permitindo a realização de medidas em situações onde não seria possível utilizar outras técnicas mais convencionais (SILVA, 2012).

Os primeiros estudos desta técnica datam de 1800, quando Willians Herschel e depois seu filho John Herschel (1840) realizaram as primeiras imagens utilizando o sistema infravermelho por meio da técnica evaporográfica, ou seja, a evaporação de álcool obtido de uma superfície pintada com carbono.

Os detectores de infravermelhos foram utilizados exclusivamente pela comunidade científica e para uso militar durante muitos anos. As primeiras câmeras comerciais foram desenvolvidas na década de 60 e na década de 90 surgiram novos tipos de equipamentos, aumentando aplicabilidade e capacidade do método, incluindo o diagnóstico de manifestações patológicas em edifícios (GARCIA, 2014).

A termografia infravermelha é, portanto, uma técnica de ensaios não destrutivos que se baseia no mapeamento térmico de uma peça, componente ou estrutura para a localização das suas regiões danificadas ou defeituosas. Isto é possível porque a condutividade térmica ou, inversamente, a resistividade térmica dos materiais depende fortemente do seu grau de integridade. Ou seja, o fluxo de calor no material é alterado em função dessas anomalias, e essas mudanças causam diferenças localizadas na temperatura do material. Desta forma, o aquecimento ou resfriamento da peça, seja por termografia ativa ou passiva, revelam a presença de danos e/ou defeitos. O termograma exibe as diferentes temperaturas locais por meio de gradientes de coloração,

que podem ser escalas monocromáticas (tons de cinza), ou policromáticas (PEREIRA, 2014).

## **2.2. Fenômenos de transferência de calor**

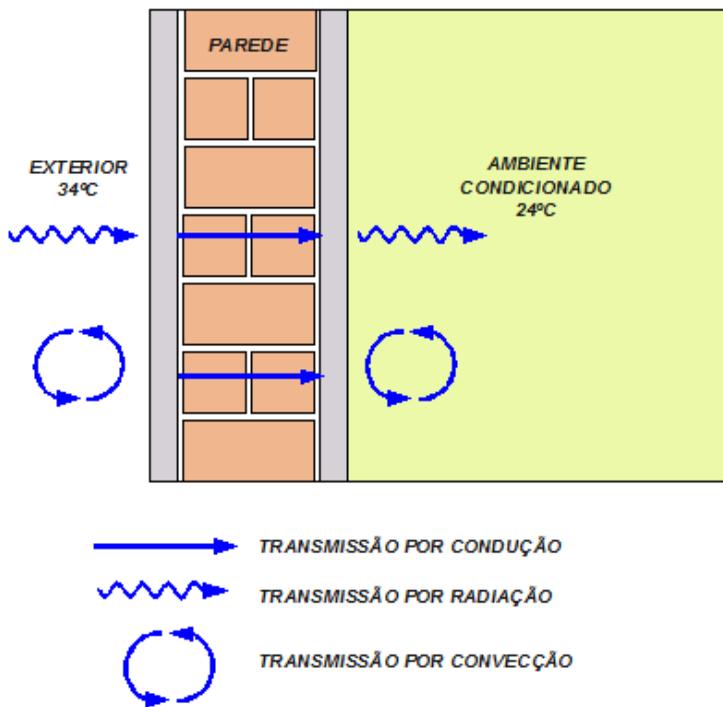
Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, ocorre, necessariamente, transferência de calor. As moléculas de um corpo ou de diferentes corpos estão em contínuo processo de troca de energia entre si. Essa energia pode ser cedida ou recebida por meio de ondas eletromagnéticas. A temperatura constante em um corpo é determinada pela distribuição da energia entre suas partículas, pois as moléculas variam sempre sua energia devido às trocas com as moléculas vizinhas.

As trocas de calor que envolvem variações de temperatura são denominadas de trocas secas. Esse termo é utilizado em contraposição de trocas úmidas, relativa às trocas térmicas que envolvem água. As trocas térmicas entre os corpos acontecem por meio de duas condições básicas: a existência de corpos em temperaturas distintas e mudança de estado de agregação (FROTA, 2001).

Denomina-se calor sensível o calor perdido para o ambiente através das trocas secas e é função das diferenças de temperatura entre o corpo e o ambiente. O calor perdido por meio de trocas úmidas é denominado calor latente e envolve mudanças de fase, como, por exemplo, o suor que passa do estado líquido para o estado gasoso por meio da evaporação (LAMBERTS *et al*, 2000).

Os mecanismos de trocas secas são convecção, condução e radiação. Apesar de serem diferentes, elas podem ocorrer simultaneamente, como é demonstrado na Figura 1. Nas superfícies em contato com o ar exterior, as transferências de calor ocorrem fundamentalmente por influência da convecção e da radiação, e no interior da peça, por condução (GARCIA, 2014).

Figura 1 - Mecanismos de transferência de calor em edifícios.

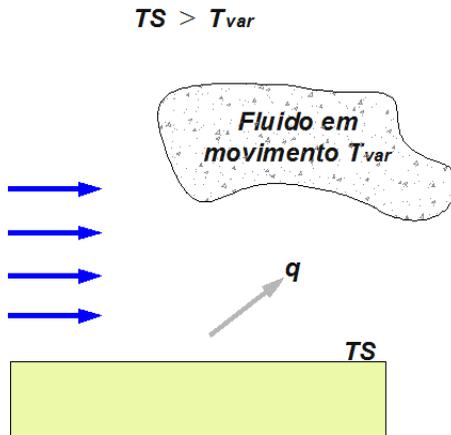


Fonte: Adaptado de GARCIA, 2014.

### 2.2.1. Convecção

Incropera *et al* (2008) explicam que a forma de transferência de calor que ocorre entre a superfície de um sólido e um fluido (gás ou líquido) em movimento quando eles estiverem em diferentes temperaturas é denominada convecção (Figura 2).

Figura 2 – Convecção de uma superfície para um fluido em movimento.



( $q$ : fluxo térmico;  $T_s$ : temperatura da superfície;  $T_{var}$ : temperatura do fluido)

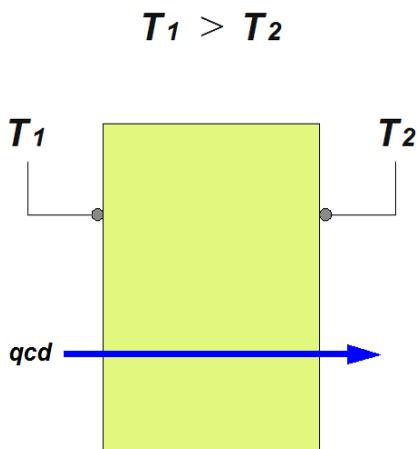
Fonte: Adaptado de INCROPERA et al, 2008.

Segundo Lamberts *et al* (2000), o processo divide-se em duas fases: na primeira, o calor se transmite por condução, e na segunda, a alteração sofrida pela temperatura do fluido modifica sua densidade provocando o movimento convectivo.

### 2.2.2. Condução

O processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto das moléculas (Figura 3) é denominado de condução. A fonte de calor excita diretamente as partículas que transferem parte de suas energias a partículas vizinhas e essas, por sua vez, transferem a outras partículas (QUITES *et al*, 2005).

Figura 3 - Modo de transferência de calor por condução.



( $q_{cd}$ : fluxo térmico por condução;  $T_1$ : Temperatura da superfície 1,  $T_2$ : temperatura da superfície 2)

Fonte: Adaptado de INCROPERA et al, 2008.

### 2.2.3. Radiação

Radiação é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura positiva e maior que zero (na escala Kelvin), ou seja -  $273^{\circ}\text{C}$ , e que não necessita de um meio material para se propagar. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas. Independente do seu estado físico ou composição, todos os corpos estão emitindo e recebendo radiação eletromagnética continuamente ao elevar ou diminuir a energia térmica de suas moléculas (INCROPERA *et al*, 2008).

Diferente da convecção e da condução, na radiação térmica o transporte de energia é instantâneo e ocorre associado a um mecanismo diferente. A energia não é transportada ponto a ponto no interior do meio, mas a partir da troca direta das superfícies afastadas e a diferentes temperaturas.

Segundo Lamberts *et al* (2000), a radiação ocorre por meio de uma dupla transformação de energia: uma fração do calor de um corpo com temperatura mais elevada se converte em energia radiante que chega até o corpo de menor temperatura. Essa radiação é absorvida numa proporção que depende das propriedades da superfície receptora, sendo novamente transformada em calor.

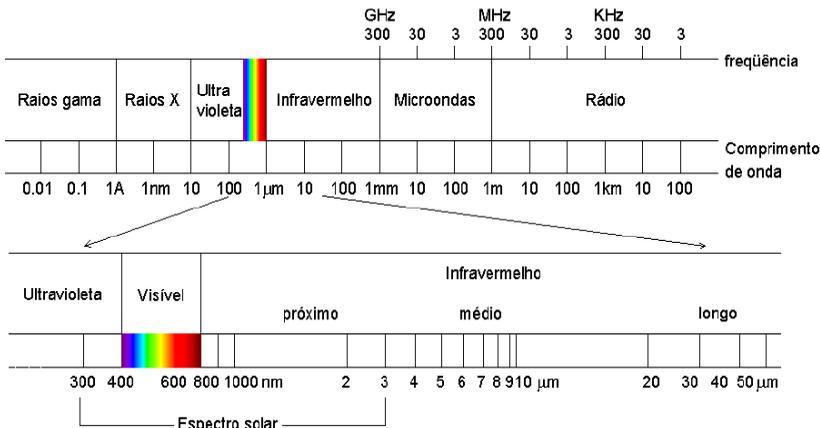
A transferência de calor por radiação é fundamento para a medição de temperatura por meio da termografia infravermelha, que detecta a radiação infravermelha proveniente do objeto em inspeção.

A radiação térmica pode ser emitida nas faixas do ultravioleta, visível e infravermelho do espectro eletromagnético. Todavia, para temperaturas típicas encontradas na Terra, a maior parte da radiação térmica é emitida dentro da faixa de infravermelho (CHRZANOWSKI, 2001). Desta forma, os termovisores são fabricados com detectores que respondem a essa faixa do espectro.

### 2.3. A natureza da radiação térmica: conceitos fundamentais

A radiação eletromagnética é um tipo de energia que é transmitida através do espaço sem necessidade de meio de suporte para se propagar. As formas mais facilmente sentidas e observadas de radiação são o calor e a luz visível, mas ela pode ser encontrada em muitas outras formas, conforme se observa na Figura 4 que representa o “espectro eletromagnético”.

Figura 4 - Espectro eletromagnético.



Fonte: DORNELLES, 2008.

Todas as ondas que constituem esse espectro se propagam no vácuo com a mesma velocidade ( $v = 3,0 \times 10^8$  m/s) e podem ser originadas pela aceleração de uma carga elétrica. Assim, sempre que uma carga elétrica é acelerada, ela irradia um tipo de onda

eletromagnética, o qual irá depender do valor de aceleração da carga (MÁXIMO, 2006).

O espectro é descrito como um conjunto de diversas regiões, onde cada região representa uma faixa de frequência que é associada a um conjunto de propriedades/aplicações, sendo que a transição de uma região para outra é feita de forma gradual. Cada divisão é função do tipo de interação que ocorre entre a radiação incidente e o objeto, do processo físico que dá origem à energia eletromagnética, e da transparência da atmosfera em relação à radiação eletromagnética (DORNELLES, 2008).

Por exemplo, como a retina do olho humano é sensível às ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda no intervalo aproximado de  $0,4 \times 10^{-6}$  m a  $0,8 \times 10^{-6}$  m, essas ondas eletromagnéticas recebem, coletivamente, o nome de luz. As frequências acima do visível são chamadas de ultravioleta, Raios-X e Raios-Gama. Para além do espectro visível estão as radiações de infravermelho, micro-ondas e as radiofrequências que são utilizadas em radares e transmissões de rádio e TV (PEDRA, 2011).

Denomina-se radiação térmica o intervalo intermediário do espectro, que se estende de  $0,1\mu\text{m}$  a  $100\mu\text{m}$ , por atuar no estado térmico ou na temperatura dos corpos. A radiação térmica pode ser dividida em três bandas espectrais: o ultravioleta (UV), todo o espectro visível e ainda o infravermelho (IR), que é dividido em próximo, médio e longe. Para a termografia infravermelha e para os ensaios não destrutivos (END) a região do IR médio é a mais importante (TANCREDI, 2011).

O comprimento de onda das radiações depende da temperatura do corpo que emite energia. O Sol apresenta um brilho branco incandescente e a sua energia está localizada na parte visível do espectro é denominada radiação de ondas curtas. A Terra e a atmosfera se aquecem absorvendo radiações de onda curta. Estas, em contrapartida, irradiam energia (em temperatura muito inferior à do Sol, naturalmente) e essa radiação é emitida em ondas longas (infravermelho). A radiação da Terra e sua atmosfera é sentida muito mais como calor do que vista como luz (PIMENTEL, 2014).

Em casos práticos, divide-se a radiação térmica em dois tipos:

- Radiação proveniente do sol (com pequeno comprimento de onda e altas temperaturas – 6000K) e;
- Radiação proveniente de outras superfícies (com comprimentos de onda longos e temperaturas entre  $-100^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ ).

a) Radiação com comprimento de onda longo

A radiação térmica com longo comprimento de onda pode ser classificada como a emitida por todos os outros materiais a não ser o sol. A propriedade da radiação que possibilita a comparação de um material com um corpo negro é a emissividade e alguns valores podem ser vistos na Tabela 1(FREITAS, 2012):

Tabela 1 - Valores de emissividade de diferentes materiais (FREITAS, 2012).

<b>Material</b>	<b><math>\epsilon</math></b>
Alumínio polido	0,05
Aço polido	0,27
Aço oxidado	0,61
Pintura branca	0,85
Cerâmica	0,93
Madeira	0,90
Vidro	0,92
Argamassa	0,93

b) Radiação térmica com comprimento de onda curto

A fração de radiação absorvida quando ela incide sobre uma superfície é denominada absorptividade ( $A$ ) e a maior fonte de radiação eletromagnética captada pelo planeta Terra é o sol, responsável por mais de 99% de toda radiação incidente. Alguns valores de absorptividade ( $A$ ) da radiação solar podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de absortividade de diferentes materiais (FREITAS, 2012).

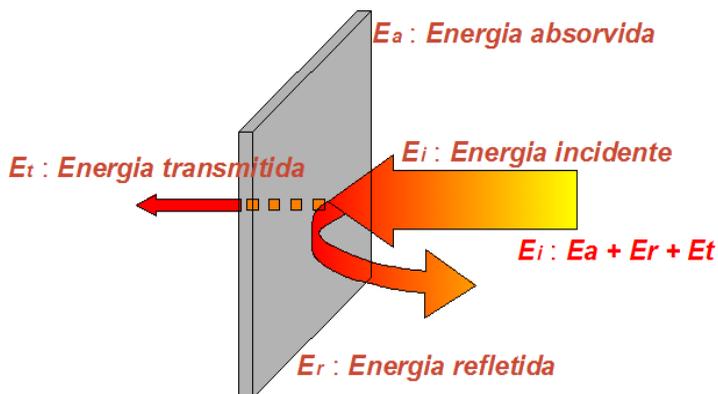
<b>Material</b>	<b>A</b>
Superfície caiada	0,20
Blocos cerâmicos	0,75
Concreto	0,60 – 0,70
Asfalto	0,93

Esses valores correspondem ao conceito de superfícies claras e escuras. A radiação solar pode causar altas temperaturas superficiais, sendo que a cor da superfície é decisiva para tanto.

#### 2.4. Absorção, reflexão e transmissão de superfícies reais

Outras propriedades importantes de uma superfície real quando se busca uma medição de temperatura, utilizando à radiação infravermelha, são a absortividade, refletividade, e transmissividade. A irradiação (radiação incidente) coletada nos equipamentos de medição, originadas da superfície a ser medida, não representa somente a emissão. A reflexão e a transmissão também se somam ao feixe incidente no equipamento e interferem na própria medição, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Absorção, reflexão e transmissão de superfícies reais.



Fonte: Adaptado de SANTOS, 2006.

O comportamento dos elementos construtivos pode ser diferente em relação à radiação térmica incidente. A radiação que incide sobre uma superfície terá uma parcela refletida, uma absorvida e, se for um material translúcido, também uma parcela transmitida diretamente para o interior, cujos valores dependerão respectivamente da refletividade ( $\rho$ ), da absortividade ( $\alpha$ ) e da transmissividade ( $\tau$ ). O somatório dessas três parcelas da radiação incidente corresponde a 100% do total, ou seja (LAMBERTS *et al*, 2014):

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.9)$$

Em relação à absortividade, os autores afirmam que os materiais de construção são seletivos à radiação de onda curta (radiação solar) e a principal determinante dessa característica é sua cor superficial, conforme explicado no subitem 2.2b. Uma superfície escura absorverá a maior parte da radiação incidente, enquanto que uma superfície de cor clara absorverá pouco.

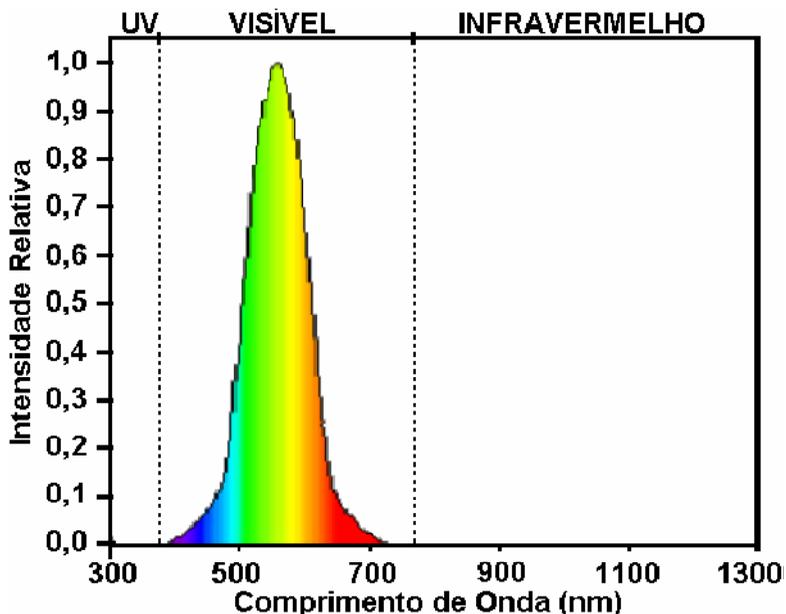
Para materiais opacos (como paredes, coberturas e pisos), do total da energia radiante que incide sobre suas superfícies, uma parcela é refletida e outra absorvida, sendo sua transmitância nula ( $t = 0$ ). Isso torna possível determinar qualquer uma dessas propriedades (absortância ou refletância) a partir da outra (DORNELLES, 2008).

#### 2.4.1. Absortância solar e as cores das superfícies

A absorção e a reflexão na superfície são responsáveis pela nossa percepção de cor. Com exceção de superfícies que estejam incandescentes, ou seja, a uma temperatura muito elevada ( $>1000$  K), a cor em hipótese alguma é devida à emissão, que se encontra concentrada na região do infravermelho, sendo portanto imperceptível ao olho humano. A cor se deve à reflexão e absorção seletivas da porção visível da radiação oriunda do sol ou outra fonte artificial de luz. Entretanto, é importante evitar confundir este fenômeno do espectro visível com o resto do espectro de radiação térmica (INCROPERA *et al*, 2008; LAMBERTS *et al*, 2000).

A região do espectro solar que sensibiliza o olho humano e permite a visão dos objetos é chamada de visível e possui um intervalo espectral bem definido, que varia de 380 a 780 nm (Figura 6). Dessa forma, como a visão humana percebe apenas um estreito intervalo de radiações, não permite identificar a refletância ou a absortância de um objeto em relação ao espectro solar total (DORNELLES *et al*, 2007).

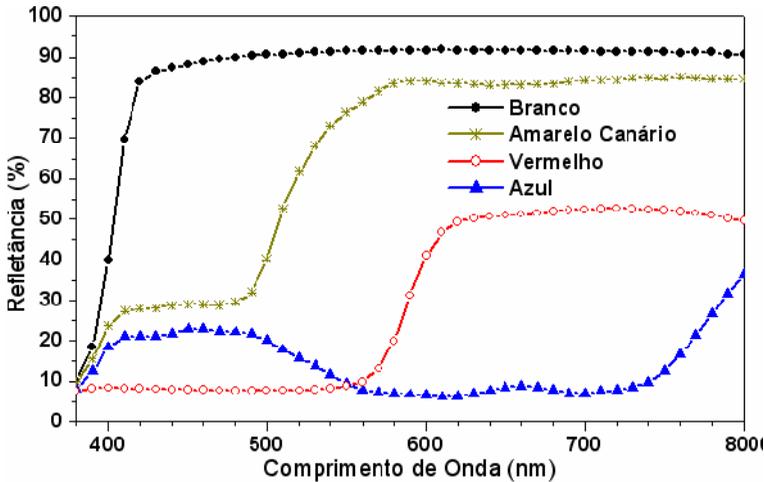
Figura 6 – Curva de sensibilidade do olho humano



Fonte: DORNELLES, 2008.

O comportamento óptico de cada superfície pode ser representado por uma curva de distribuição de suas refletâncias (ou absortâncias) ao longo do espectro solar, uma vez que a refletância das superfícies também varia em função do comprimento de onda dos raios incidentes. Dessa forma, os raios refletidos na faixa do visível são captados pelo olho e provocam as sensações cromáticas. Dornelles e Roriz (2006) analisaram algumas amostras e apresentaram curvas de refletância espectral (Figura 7), mostrando que refletâncias na região visível (380 a 780 nm) são mais altas nos comprimentos de onda correspondentes a cada cor.

Figura 7 - Curvas espectrais de refletância para diferentes cores de tinta na região visível.



Fonte: DORNELLES et al, 2006.

Analisando a Figura 7, verifica-se que a amostra pintada de branco confirma que essa cor reflete uniformemente em todo o espectro visível. Já a amostra pintada de azul reflete comprimentos de onda entre 400 e 500 nm, pois este intervalo corresponde à sensação de azul. No caso da tinta vermelha reflete comprimentos de onda acima de 600 nm, pois provocam justamente a sensação visual da cor vermelho. A tinta na cor Amarelo Canário reflete comprimentos de onda relacionados ao amarelo, acima de 550 nm.

Estudos divulgados por Dornelles e Roriz (2007) mostram que, apesar das amostras apresentarem o comportamento esperado para a região visível, suas refletâncias na região do infravermelho-próximo não obedecem ao mesmo padrão de comportamento. Com isso, para identificar de forma precisa a absorvância solar de uma amostra, é necessário medir sua refletância em um espectrofotômetro. Essa análise permite varrer toda a região espectral relativa ao ultravioleta, visível e infravermelho-próximo, possibilitando escolher as regiões de interesse. Com isso, é possível comparar o comportamento espectral de diferentes superfícies frente à radiação solar, sem a necessidade de se basear apenas na percepção visual.

## 2.5. Lei de Kirchhoff

Até o momento, as propriedades superficiais associadas à emissão e à absorção foram analisadas separadamente, em que o primeiro depende exclusivamente da temperatura superficial e o segundo da radiação incidente na superfície. No entanto, para condições de regime permanente, a emissividade de um corpo é igual a sua absorvidade. Esta relação, conhecida como a *Lei de Kirchhoff*, é definida para um determinado comprimento de onda.

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda} \quad (2.10)$$

As superfícies que seguem a relação 2.10 são conhecidas como superfícies cinza (ou cinzentas) (LAMBERTS *et al*, 2014).

Ou seja, a *Lei de Kirchhoff* diz que a capacidade de um corpo em absorver energia incidente em um determinado comprimento de onda  $\lambda$  é equivalente à capacidade deste corpo em emitir energia no mesmo comprimento de onda.

Para uma melhor compreensão, considera-se um objeto opaco que está em equilíbrio térmico. De acordo com a lei mencionada, para que sua temperatura permaneça constante, a radiação emitida deve estar balanceada com a radiação absorvida. Se a radiação emitida for maior que a radiação absorvida o objeto se resfriará. Por outro lado, se a radiação absorvida for maior do que a radiação emitida o objeto se aquecerá. A capacidade de uma superfície, em emitir e absorver radiação em um determinado comprimento de onda está relacionada à emissividade espectral, sendo que superfícies com alta emissividade têm maior capacidade em emitir e absorver radiação (SANTOS, 2006).

## **2.6. Manifestações patológicas em sistemas de revestimento cerâmico**

As manifestações patológicas nos sistemas de revestimento cerâmico de fachada são caracterizadas pela deterioração de parte ou de todo o sistema, e necessitam de atenção especial principalmente em função do risco que geram aos usuários, como o destacamento e queda de peças cerâmicas.

Alguns autores classificam as manifestações patológicas mais comuns segundo a camada onde ocorrem: defeito das placas cerâmicas, falhas no substrato e falhas no adesivo. As causas mais comuns para o destacamento das cerâmicas são a inexistência de juntas de movimentação, a deficiência no assentamento da cerâmica e a inadequação do material empregado.

Diversas manifestações patológicas atingem os sistemas de revestimento cerâmico de fachada, e as que mais se destacam são o gretamento, presença de fungos ou algas no rejuntamento, fissuras, e objeto de estudo deste trabalho, os descolamentos.

### *2.6.1. Gretamentos*

Trata-se da fissuração que ocorre na camada de esmalte superficial da placa cerâmica, e se desenvolve devido às diferenças na capacidade de absorver deformações entre a base da placa cerâmica e a camada de esmalte.

A gretagem apresenta-se por meio do aparecimento de várias microfissuras em forma de círculos irregulares ou formando uma teia de aranha na superfície esmaltada da peça.

### *2.6.2. Presença de fungos ou algas*

Esse tipo de manifestação ocorre principalmente em razão da elevada porosidade da argamassa de rejunte, favorecendo a proliferação de fungos e algas (CICHINELLI, 2006). Não representa grave risco ao usuário, no entanto, resulta em uma estética comprometida, necessitando de manutenção periódica.

### *2.6.3. Fissuras*

As trincas ou fissuras são rupturas que ocorrem no corpo da peça cerâmica, que por esforço mecânico, causa a separação de suas partes

(GROFF, 2011). As principais causas para o surgimento destas manifestações são:

- a) dilatação e retração do componente cerâmico em razão da variação térmica ou de umidade;
- b) deformação estrutural excessiva, originando tensões não previstas na alvenaria;
- c) ausência de detalhes construtivos, como vergas e contravergas, pingadeiras e juntas de movimentação dos revestimentos.

#### 2.6.4. *Descolamentos*

Os descolamentos são caracterizados pela perda de aderência das peças cerâmicas do substrato, ou da argamassa colante, e ocorrem quando as tensões surgidas no revestimento cerâmico ultrapassam a capacidade de aderência das ligações entre a placa cerâmica e argamassa colante e/ou emboço.

A ocorrência cíclica das solicitações, somadas às perdas naturais de aderência dos materiais de fixação, em situações de subdimensionamento do sistema, caracterizam esse tipo de falha, que costumam resultar em problemas graves, como quedas. A movimentação higroscópica exige compensação na resistência de aderência da argamassa colante, menor rigidez da argamassa de rejuntamento e compatibilidade do emboço de substrato (GROFF, 2011).

As principais causas para o surgimento desse tipo de problema são:

- a) Preparação inadequada da base;
- b) Chapisco preparado com areia fina;
- c) Argamassa com espessura excessiva gerando tensões elevadas de tração entre a base e o chapisco;
- d) Argamassa rica em cimento;
- e) Ausência de chapisco;
- f) Acabamento inadequado de camada intermediária;
- g) Grandes variações de temperatura, gerando tensões de cisalhamento entre argamassa e base.

Entre as manifestações existentes, destaca-se como a mais preocupante, pois a queda do material pode vir a atingir os usuários. Assim sendo, esse trabalho trata especificamente desse tema, e busca

analisar se a termografia infravermelha é uma ferramenta eficiente na identificação e caracterização desse tipo de falha.

## **2.7. Termografia infravermelha como ensaio não destrutivo**

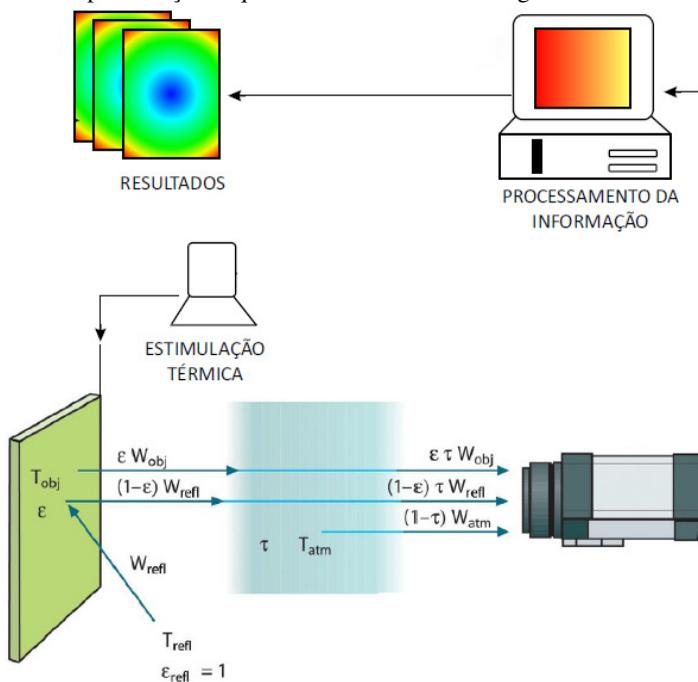
Dentro do grupo de técnicas conhecidas como ensaios não-destrutivos (END) encontra-se a Termografia Infravermelha (TIR). As vantagens dos ensaios não destrutivos são: proporcionar pouco ou nenhum dano à estrutura, serem aplicados com a estrutura em uso e permitir que problemas possam ser detectados em estágio ainda inicial.

Para tornar viável a utilização de técnicas não destrutivas, são feitas análises por meio de métodos mais complexos, que requerem múltiplos estágios de processamento da informação. Por exemplo, na Termografia Infravermelha, são analisadas medições de temperatura e fluxos de calor para diagnosticar ou prever um defeito no material. Trata-se de um mapeamento de padrões térmicos da superfície de um objeto, sendo, portanto, sem contato e sem intrusão.

### *2.7.1. O sistema de termografia infravermelha para ensaios não destrutivos*

A fonte de estimulação térmica, o sistema observado, a câmera infravermelha e um sistema para o processamento, análise e posterior apresentação da informação são os elementos básicos do Sistema de Termografia Infravermelha (Figura 8).

Figura 8 - Representação esquemática do sistema termográfico



A câmara, ao ser apontada a um objeto, recebe radiações emitidas pela superfície do próprio objeto, bem como de outras fontes envolvidas no meio em que o mesmo está inserido. Interpretando os elementos da Figura 10, tem-se que  $T_{obj}$  - temperatura do objeto,  $T_{refl}$  - temperatura do meio adjacente,  $T_{atm}$  - temperatura da atmosfera,  $W_{obj}$  - Potência da radiação emitida pelo objeto,  $W_{refl}$  - Potência da radiação emitida pelo meio adjacente,  $W_{atm}$ : Potência da radiação emitida pela atmosfera. Todos esses elementos participam do sistema que compõe uma investigação termográfica.

A configuração da Figura 10 pode ser descrita de acordo com a Equação 2.11.

$$W_{tot} = \varepsilon \tau W_{obj} + (1-\varepsilon) \tau W_{refl} + (1-\tau) W_{atm} \quad (2.11)$$

Sendo:

$W_{obj}$ : potência da radiação emitida pelo objeto

$W_{refl}$ : potência da radiação emitida pelo meio adjacente

$W_{atm}$ : potência da radiação emitida pela atmosfera

$\varepsilon$  : emitância do objeto

$\tau$ : transmitância da atmosfera

Para tornar possível uma análise por TIR, é importante que se conheça o comportamento térmico do objeto em estudo e suas interações com o meio externo. A transferência de calor que ocorre no interior do material depende das propriedades termofísicas do meio, das condições iniciais e das condições externas, afetando a temperatura da superfície do objeto em análise (RODRIGUEZ, 2010).

Comparado com outros sinais de radiação, o sinal infravermelho é relativamente fraco e, aliado a isto, a atmosfera dispersa a radiação na sua trajetória entre o objeto e a câmera. O sinal convertido pelo sensor infravermelho da câmera sofre ainda perdas e degradações em todas as etapas de transferência e conversão da informação. Desta forma, a etapa de processamento e tratamento dos dados em softwares especializados é inevitável (TANCREDI, 2011).

### 2.7.2. *Métodos de inspeção: Ativa e Passiva*

Ao fazer uso de sensores térmicos, a captação da radiação incidente é obtida a partir da estimulação que promove o aquecimento ou resfriamento do objeto. Os sistemas que utilizam sensores térmicos são classificados em passivos e ativos, dependendo da forma como é feita essa estimulação.

#### a) Termografia passiva

Para utilização da termografia passiva, onde nenhuma estimulação artificial é utilizada, deve existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto em estudo e o meio no qual ele está inserido, que frequentemente está a uma temperatura mais elevada. A análise pelo método passivo conta com as condições naturais da estrutura estudada e do seu entorno, sendo o calor do sol um fator determinante (CORTIZO, 2007).

#### b) Termografia ativa

Diferente da termografia passiva, na termografia ativa um estímulo externo é necessário para gerar diferenças relevantes de temperatura. Diferentes técnicas de estimulação térmica podem ser

empregadas para provocar um fluxo de calor no objeto de estudo, cada qual com características e limitações próprias. A escolha do tipo de estímulo térmico depende das características do objeto a ser testado e do tipo de informação a ser pesquisada (PEDRA, 2011)

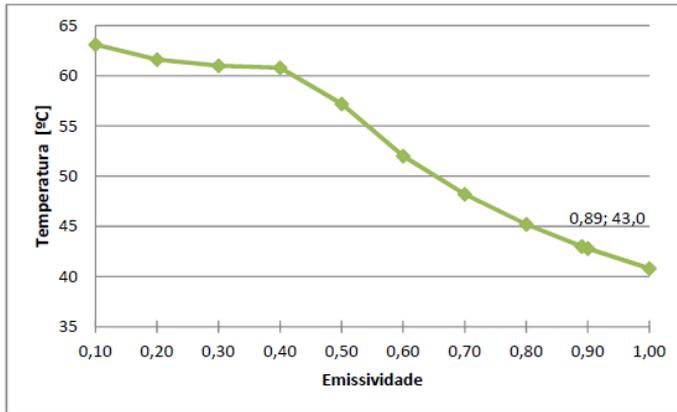
A termografia ativa apresenta vários tipos de estimulação térmica aplicada ao material para induzir o fluxo interno de calor. Dependendo do tipo de estimulação utilizada, a análise e processamento da informação obtida serão diferentes. Os tipos de termografia ativa mais usados são: pulsada, aquecimento de longo pulso, modulada e vibrotermografia (RODRIGUEZ, 2010).

A técnica de termografia pulsada é a mais tradicional delas e consiste basicamente na aplicação de pulsos curtos de energia térmica na superfície do objeto em estudo. Essa estimulação pode ser “quente” ou “fria”, o importante é o estabelecimento de um gradiente de temperatura entre a fonte térmica e o objeto de estudo.

### *2.7.3. Tipos de Investigação: Qualitativa e Quantitativa*

Numa análise termográfica, há dois princípios diferentes de investigação: o qualitativo e o quantitativo. Basicamente, a termografia qualitativa debruça-se na análise de padrões térmicos para revelar a localização e a existência das anomalias, enquanto a termografia quantitativa utiliza medições de temperatura como um critério para determinar a gravidade de uma anomalia e conseguir delinear prioridades de reparação (PEREIRA, 2014). No entanto, a correta medição da temperatura depende fortemente do valor considerado como referência para a emissividade do material. Este aspecto pode ser analisado por meio do gráfico da Figura 11, que relaciona a temperatura superficial lida com o valor da emissividade considerado para a mesma superfície.

Figura 9 - Variação da temperatura superficial em função da variação da emissividade considerada.



Fonte: Pereira, 2014.

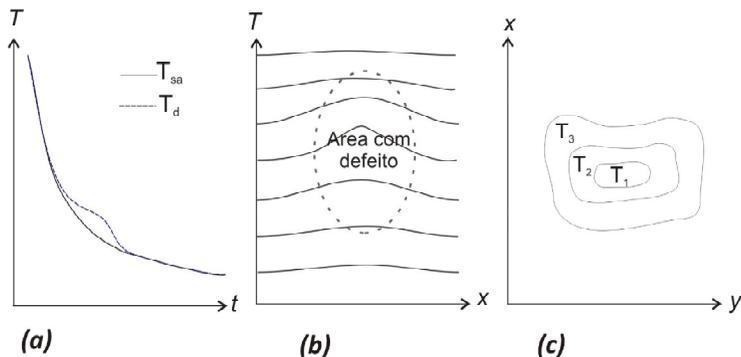
No exemplo da Figura 9, para a superfície estudada, a emissividade correta é de 0,89, que corresponde uma leitura de temperatura de 43 °C. Observando o gráfico, ao introduzir um valor para a emissividade diferente do correto, o valor da temperatura lido afasta-se do valor real, e tanto mais quanto maior for o erro na consideração da emissividade. Desta forma, ressalta-se a importância de utilizar o valor correto da emissividade, principalmente em análises quantitativas.

#### 2.7.4. Detecção de defeitos

A análise e interpretação das imagens obtidas durante um ensaio de Termografia Infravermelha Quantitativa estão baseadas em modelos físicos que permitam a identificação quantitativa dos parâmetros em estudo. Após a obtenção da sequência de imagens, a primeira tarefa é a detecção dos defeitos, onde é analisado o comportamento de diferentes parâmetros, tais como a curva de evolução de temperatura, perfis de temperatura e o contraste térmico.

A diferença do comportamento da curva de decaimento de temperatura de uma área sã ( $T_{sa}$ ) e uma área com defeito ( $T_d$ ) pode ser observada na Figura 12a. A curva da área com defeito pode estar acima ou abaixo da curva de decaimento da área sã, situações que dependerão da profundidade e as propriedades termofísicas do defeito (RODRIGUEZ, 2010).

Figura 10 – Detecção de defeitos a partir de: (a) curva de decaimento de temperatura, (b) perfis de temperatura e (c) termograma.



Fonte: RODRIGUEZ, 2010.

Ainda em relação à detecção de defeitos, é possível observá-los a partir dos perfis de temperatura, como o esquematizado na Fig. 12b. Regiões danificadas apresentarão perfis anormais que indicam a variação de temperatura de um pixel em relação ao vizinho do lado. Ressalta-se, porém, que ao contrário da curva de decaimento de temperatura, onde se estuda o comportamento transiente de um pixel em coordenadas, neste caso a análise é unidimensional. Dessa forma, a partir do perfil de temperatura, é possível determinar parâmetros como o tamanho e profundidade do defeito, no entanto, Rodriguez (2010) afirma que a análise apresenta dificuldades com as não-uniformidades no aquecimento, produzido durante o processo de estimulação térmica e cujos padrões podem ser confundidos com defeitos internos.

O contraste de temperatura entre uma zona sã e outra com defeito (Figura 12c) é um dos parâmetros mais utilizados para detecção e análise quantitativa de anomalias. Informações qualitativas e quantitativas, como visualização e caracterização do defeito, são fornecidas por meio do contraste térmico. Durante a estimulação externa, a presença de algum defeito no interior muda a taxa de difusão de calor e, quando a superfície é observada durante o processo de resfriamento, os defeitos aparecerão como áreas de diferentes temperaturas em relação a vizinhanças.

### 2.7.5. *Fatores que influenciam os resultados dos ensaios*

Uma atividade aparentemente simples, na qual o inspetor opera o termovisor, aponta-o para o objeto em inspeção e detecta o defeito através da análise do termograma obtido. Apesar da simplicidade aparente da termografia, a análise dos resultados pode ser complicada e até conduzir a conclusões erradas se não forem tomadas certas precauções antes e durante a realização do ensaio.

Alguns fatores exteriores, como condições térmicas do objeto e da sua envolvente, presença de fontes externas (sombras, reflexões, etc) e condições de medição (temperatura do ar, distância e emissividade, definições do equipamento), elevam muito o risco de defeitos serem confundidos com não homogeneidades na temperatura superficial (BARREIRA, 2004).

Nesse cenário mais complexo, as limitações e características dos personagens envolvidos na inspeção termográfica devem ser consideradas para uma análise consistente e confiável das anomalias térmicas encontradas.

#### a) Qualificação do Operador

Um dos principais fatores que limitam a técnica de inspeção termográfica é o próprio operador, que deve ter conhecimento da forte influência da radiação solar, do vento, da chuva, e na forma como esses fatores afetam a distribuição térmica do objeto analisado em ambiente aberto. Sua motivação para a realização da inspeção pode interferir diretamente nos resultados, tanto com relação à qualidade das imagens térmicas obtidas, quanto na quantidade de defeitos encontrados (SANTOS, 2006).

É necessário conhecimento especial acerca da teoria básica que envolve radiação infravermelha e os princípios de transferência de calor, entendimentos essenciais para uma análise correta dos termogramas e do funcionamento dos equipamentos inspecionados.

Para que sejam obtidos resultados consistentes e confiáveis, o inspetor deve ter um alto nível de treinamento e estar motivado e qualificado para a função, de forma a ser capaz de detectar todas as falhas existentes e saber diferenciar um defeito real de uma falsa anomalia, podendo economizar milhares de reais em paradas não programadas e/ou paradas e manutenções desnecessárias (SANTOS, 2006). O investimento em qualificação e treinamento torna-se

importante e necessário na redução dos erros inseridos pelo inspetor de termografia nos resultados da inspeção.

Procedimentos padronizados e normatizados devem ser estabelecidos para que os resultados alcançados pela termografia possam ter um tratamento sistêmico e com níveis de repetibilidade aceitáveis, tanto para a aplicação do método quanto para a qualificação do operador. Nesse diapasão, algumas normas foram criadas, com a cooperação de entidades interessadas.

Em 2005, foi formado no Brasil o Grupo de Trabalho responsável pela elaboração de normas brasileiras, cuja entidade responsável pela coordenação do Grupo de Trabalho é a Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção – ABENDI, credenciada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, para elaboração de normas relativas a ensaios não destrutivos. Por meio desta comissão, foram criadas algumas normas referentes ao tema (ABNT, 2015):

**ABNT NBR 16292:2014:** Ensaios não destrutivos — Termografia — Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas;

**ABNT NBR 15572:2013:** Ensaios não destrutivos — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos;

**ABNT NBR 15866:2010:** Ensaio não destrutivo — Termografia — Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos;

**ABNT NBR 15763:2009:** Ensaios não destrutivos - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência;

**ABNT NBR 15718:2009:** Ensaios não destrutivos — Termografia — Guia para verificação de termovisores;

**ABNT NBR 15424:2006:** Ensaios não destrutivos - Termografia – Terminologia.

Nota-se que estas normas são principalmente direcionadas para sistemas elétricos e, portanto, muito pouco ou nada aproveitáveis para a

área de construção civil. Sendo assim, o Brasil ainda necessita de normas específicas para este método aplicado à engenharia civil.

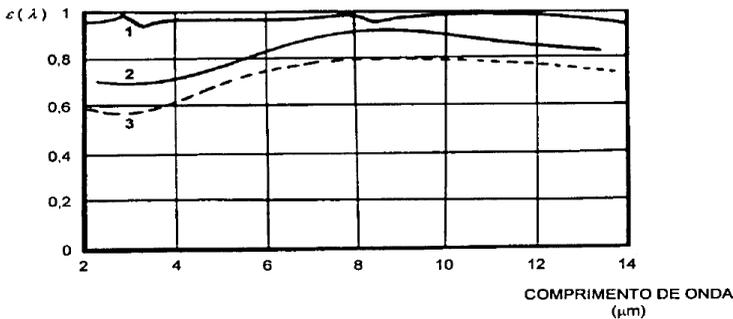
## b) Emissividade

A emissividade varia com diversos fatores que podem levar a um ajuste incorreto do valor, distorcendo o resultado na medição de infravermelhos. Entre eles, os mais importantes são os seguintes:

### I. Variação da emissividade com o comprimento de onda

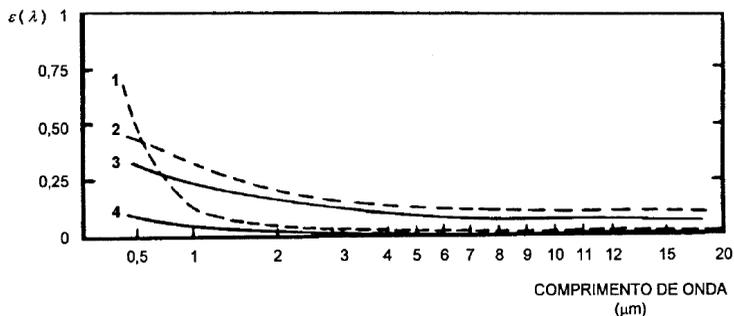
Barreira (2004) afirma que, para materiais sólidos, a emissividade varia com o comprimento de onda de uma forma relativamente lenta, no entanto, apresenta flutuações bruscas para gases ou líquidos. Para os não-metals, a emissividade tende a aumentar com o comprimento de onda (Figura 13) e para os metais, tende a diminuir (Figura 14).

Figura 11 - Emissividade espectral de alguns não metais (1 – água; 2 – terra; 3 – plástico).



Fonte: BARREIRA, 2004.

Figura 12 - Variação da emissividade com o comprimento de onda para metais (1 - cobre; 2 - ferro; 3 - alumínio; 4 - prata).



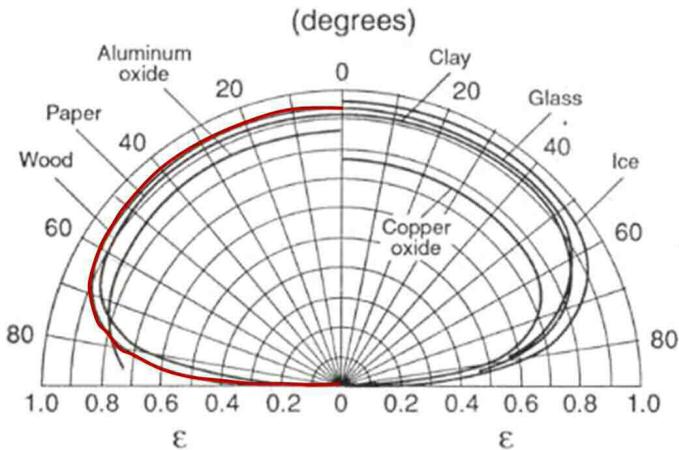
Fonte: BARREIRA, 2004.

## II. Variação da emissividade com o ângulo de observação

Nos metais, os valores da emissividade são baixos e sem grandes variações para ângulos entre  $0^\circ$  e  $40^\circ$ , aumentando consideravelmente para ângulos superiores. A variação da emissividade dos não metais com o ângulo de observação é praticamente nula entre ângulos de  $0^\circ$  a  $60^\circ$  em relação à perpendicular da superfície. Ou seja, essa alteração pode ser evitada se a câmera for colocada sensivelmente perpendicular em relação à superfície investigada.

Para ângulos superiores a  $70^\circ$  o valor da emissividade decai rapidamente até zero (Figura 15) (BARREIRA, 2004).

Figura 13 - Variação da emissividade em função do ângulo de observação (degrees)

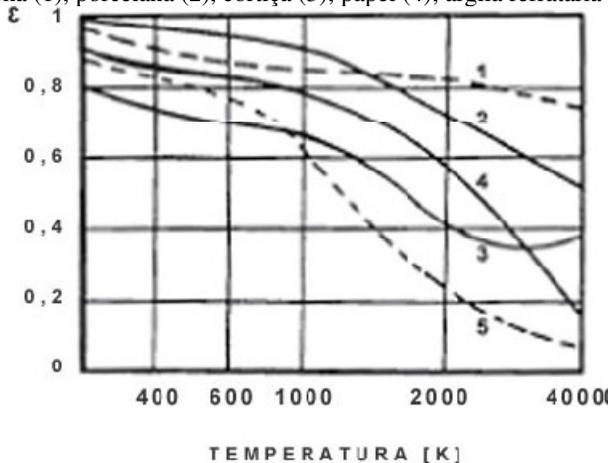


Fonte: BARREIRA, 2004.

### III. Variação da emissividade com a temperatura

A autora afirma que existem alguns materiais cuja emissividade não depende da direção da radiação (superfícies difusas), e que têm um comportamento aproximado do corpo cinzento (emissividade independente do comprimento de onda). Nesses materiais é possível considerar a emissividade constante para uma determinada temperatura. Os metais têm emissividade total pouco elevada, que aumenta com a temperatura. A formação de óxidos na superfície de um metal altera consideravelmente o valor da emissividade. Os demais materiais têm uma emissividade total normalmente superior a 0,80, diminuindo com a temperatura (Figura 16):

Figura 14 - Variação da emissividade total com a temperatura de alguns não metais: borracha (1), porcelana (2), cortiça (3); papel (4); argila refratária (5).



Fonte: BARREIRA, 2004.

### c) Refletividade

Outro fator que pode influenciar nos resultados é a refletividade dos materiais. Barreira (2004) afirma que a energia captada pelo receptor, resultando da radiação emitida por um corpo à temperatura  $T_0$ , resulta da sobreposição de três efeitos:

- a) O corpo reflete uma fração de energia emitida pelo ambiente, equivalente à emitida por um corpo negro à mesma temperatura  $T_a$ ;
- b) Se o corpo é parcialmente transparente, transmite uma fração da radiação emitida pelo fundo, correspondente à emitida por um corpo negro à temperatura  $T_f$ ;
- c) O corpo emite radiação própria, por se encontrar à temperatura  $T_0$ ;

Se o corpo analisado estiver rodeado de outros corpos a diferentes temperaturas, eventualmente superiores à do objeto em estudo, a parcela referente à emissão própria do corpo, função da temperatura  $T_0$  e da sua

emissividade, vem afetada de um erro devido à reflexão por esse corpo de radiação emitida pelos objetos que o rodeiam.

d) Atenuação atmosférica

A atmosfera presente entre a fonte emissora e o receptor pode originar perturbações na medição. Além disso, os gradientes térmicos e a turbulência alteram o índice de refração do ar provocando uma redução na qualidade da imagem. A atenuação atmosférica é uma das maiores causas de problemas, pois gera um erro sistemático em função da gama espectral utilizada, da distância de observação e das condições meteorológicas. Por isso, medições feitas com distância acima de 10 metros devem ser corrigidas (BARREIRA, 2004).

e) Outros fatores que influenciam os resultados

O vento, com uma velocidade significativa, afeta as imagens térmicas. O fluxo de ar incidindo na superfície exterior de uma fachada reduz a resistência térmica superficial. Este efeito é maior nos cantos, visto que a velocidade do vento é maior nesta área.

Uma fonte de calor externa que pode afetar a medição termográfica é o sol. Quando o calor irradiado pelo sol atinge uma fachada, este altera o fluxo normal de calor do interior para o exterior (BARREIRA, 2004).

A distância entre o equipamento e o objeto pode alterar a leitura da temperatura superficial. A distância diminui a resolução dos termogramas e influencia a atenuação atmosférica. Por fim, outro fator que influencia a medição é a temperatura ambiente. Se a temperatura está muito alta ou muito baixa, os sistemas de detecção de radiação infravermelha tornam-se menos estáveis (BARREIRA, 2004).

## **2.8. Estudos recentes sobre a aplicação da Termografia Infravermelha em Engenharia Civil**

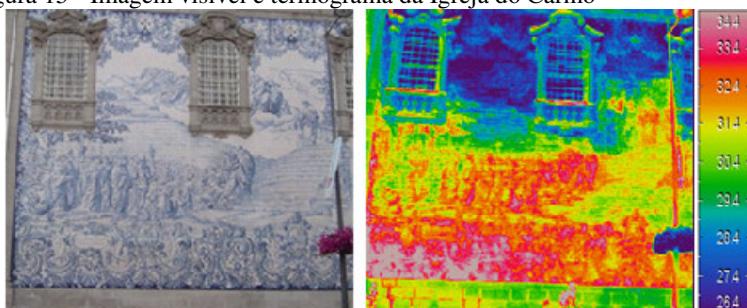
A termografia infravermelha já vem sendo utilizada na Engenharia Civil com uma grande abrangência especialmente no diagnóstico de patologias em edificações.

Como exemplo, destaca-se o estudo de Barreira e Freitas (2007), onde os autores avaliaram a influência das cores na análise de revestimentos utilizando a termografia. As imagens térmicas foram

obtidas na fachada da Igreja do Carmo (Portugal), cuja coloração dos azulejos presentes na mesma varia entre a cor branca e diferentes tons de azul (Figura 17). Foram efetuados diversos termogramas em diferentes fases do dia, com o objetivo de obter imagens térmicas durante a fase de aquecimento e durante a fase de resfriamento.

Como resultado, os autores constataram que as imagens térmicas revelaram notáveis diferenças de temperatura causadas pela variação da coloração. No entanto, essas diferenças eram mais pronunciadas durante o dia. Ao final do dia, quando as diferenças de temperatura eram menos pronunciadas, a variação de cor não se mostrava mais importante.

Figura 15 - Imagem visível e termograma da Igreja do Carmo



Fonte: BARREIRA, 2004.

Souza (2010) fez um estudo sobre alternativas para aumentar o desempenho e o conforto térmico em edificações, analisando como os materiais e suas cores podem influenciar na temperatura das edificações, utilizando a termografia infravermelha. Foram realizados ensaios com telhas de fibrocimento e telhas cerâmicas em diferentes cores. Foi constatado que as telhas de cerâmica chegaram a uma temperatura maior quando comparadas às de fibrocimento. Quando realizados os testes para a comparação em relação às cores, a pesquisadora encontrou uma diferença de 14°C entre a telha cerâmica na cor cinza e a telha cerâmica na cor verde escuro. A autora concluiu que a termografia infravermelha tem grande potencial para aplicações em análises térmicas quando utilizada de forma correta, com as variáveis corretamente estabelecidas.

Cerdeira *et al* (2011) desenvolveram modelos experimentais compostos por painéis de granito, onde foram produzidos defeitos na argamassa com o objetivo de verificar se eram detectáveis pela técnica. As peças de granito tinham 2 cm e 3 cm de espessura e eram estruturados em paredes compostas de blocos cerâmicos revestidas com

argamassa de cimento. Para a simulação dos defeitos, foram retirados porções de argamassa em formatos circulares e retangulares, simulando descolamentos. Os testes foram conduzidos em laboratório. Utilizou-se um aquecedor para obter gradiente de temperatura de 4 °C a 30 °C. Os resultados obtidos demonstraram que a técnica da termografia permite a identificação dos defeitos sob os painéis com as duas espessuras (2 cm e 3 cm). No entanto, o defeito circular com 3 cm de diâmetro, o menor deles, não foi verificado sob o painel de granito de 3 cm de espessura, o que pode gerar uma ideia do menor tamanho de defeito detectável pela técnica. Os autores concluíram ainda que, quando os painéis eram aquecidos, as áreas com defeitos possuíam temperatura inferior em relação às regiões de seu entorno, demonstrando que a transferência de calor por condução pela parede é diferente se o local possui ou não algum tipo de vazio. Em partes do revestimento de argamassa sem defeitos não foi constatada variação de temperatura. Já em locais com vazios, observou-se variação de temperatura de 1 °C.

Edis *et al* (2011) estudaram o efeito das condições atmosféricas *in-situ* em revestimentos cerâmicos vidrados e não vidrados. Os resultados mostraram que o estudo da cerâmica vidrada deve ser feito após o período de calor, contrariamente a não vidrada. As áreas úmidas foram observadas como áreas mais frias nos termogramas e, por fim, que a presença de eflorescências perturba a medição com a câmera termográfica.

Freitas (2012) utilizou a termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura. Para isso, realizou imagens em diferentes horários do dia nas estações seca e chuvosa em uma edificação na cidade de Goiânia, GO. Aferiu, também, a temperatura superficial em diversos pontos das quatro orientações das fachadas analisadas. Concluiu, por fim, que parte das fissuras levantadas pôde ser visualizada nos termogramas e que o período seco e o horário da tarde provocaram maiores diferenças nas temperaturas superficiais, resultando em isotérmicas mais claras, possibilitando a obtenção de imagens que revelaram alguns dos problemas mapeados.

Bauer *et al* (2015) realizaram um estudo sobre a correta interpretação dos termogramas obtidos nas inspeções de fachadas com revestimento cerâmico e com revestimento de argamassa. A análise foi realizada utilizando parâmetros termográficos como a emissividade, a temperatura aparente refletida e a distância, que tiveram valores determinados experimentalmente (fisicamente corretos) e outros atribuídos erroneamente, de modo a não retratar a realidade do parâmetro. Concluíram que os erros gerados da variação da temperatura

aparente refletida e da distância são relativamente pequenos comparados com os erros gerados pela variação da emissividade. No caso da emissividade, esses erros são maiores com o aumento da temperatura média da superfície do corpo de prova.

Caldeira (2016) utilizou a termografia infravermelha ativa para analisar danos subsuperficiais na interface PRF/concreto. A autora pesquisou diferentes equipamentos para excitação térmica e quais as influências disso na identificação do dano nas imagens infravermelhas. O estudo demonstrou que equipamentos simples de aquecimento podem fornecer resultados bastante satisfatórios para a visualização de danos na interface concreto/PRF de estruturas reforçadas. Os resultados mais expressivos foram obtidos para os aquecimentos com lâmpada incandescente e aquecedor halógeno (quando comparados à lâmpada de mercúrio, termoventilador e soprador térmico).

O trabalho compreendeu ainda análises quantitativas voltadas para a termografia infravermelha passiva por aquecimento solar. Nesta etapa, a autora buscou comparar os componentes das amostras reforçadas com mantas de PRF e ainda o tempo de excitação térmica, por meio da avaliação da temperatura central que o defeito demonstrou nas imagens infravermelhas, utilizando-se para isso a estatística. A autora levou em consideração diferentes tempos de exposição solar, tipos de reforços (mantas) e tipos de defeitos. Nesta etapa experimental, além das mantas de PRFC e PRFV, a autora analisou também a manta de PRFB (Polímero Reforçado com Fibras de Basalto). As análises dos perfis de temperatura compararam as mantas de PRFC, PRFV e PRFB e os resultados mostraram que o basalto foi o material que propiciou as melhores visualizações dos defeitos, enquanto o carbono, tão comumente utilizado em reforços, foi aquele com pior visualização dos danos. A análise estatística mostrou que o tempo de exposição térmica é o fator que influencia na análise termográfica em todos os casos.

Bauer *et al* (2016) utilizaram a termografia quantitativa num estudo de caso de fissuração intensa em fachada revestida com argamassa, analisando a evolução das temperaturas e do Delta-T. A fachada investigada foi identificada e mapeada sendo consideradas 3 regiões de análise (A, B e C). Os pontos da região A acompanham uma fissura principal com características lineares. Os pontos da região B acompanham uma fissura linear e uma situação de fissuração ramificada. Os pontos da região C se referem a uma situação de fissuração ramificada generalizada. Realizaram o estudo da evolução das temperaturas ao longo de um dia de análise, onde ocorreu incidência do sol em parte do período de estudo. Efetuaram a aquisição de

termogramas a cada hora do período estudado. Pela evolução dos parâmetros, observaram que as maiores temperaturas ocorrem as 12:00 horas, e os maiores Delta-T entre 10:00 e 12:00 horas. Perceberam diferença entre o perfil do Delta-T entre as 3 regiões estudadas. O melhor momento para análise é o em que se tem maiores Delta-Ts. Fissuras com maiores Delta-T foram consideradas mais degradadas, sendo que as fissuras ramificadas não permitiram conclusão comparativa. Concluíram que as análises em campo são complexas, quer pela variabilidade da ação climática, quer pelas variações construtivas e de degradação dos elementos estudados.

Considerando os trabalhos citados, observa-se a necessidade de complementação de estudos sobre alguns fatores relacionados ao uso da termografia infravermelha, principalmente no que se refere à avaliação de falhas de aderência em sistemas cerâmicos de fachadas, em razão da carência de estudos nessa área. Por isso, este trabalho foca a análise em algumas variáveis importantes, como a influência da cor do revestimento e sua respectiva absorvância na detecção de defeitos, tempo necessário de aquecimento para visualização das falhas, limitações quanto a tamanho e profundidade de defeitos, conforme mostram os experimentos e seus respectivos resultados apresentados na sequência.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta Seção serão detalhados os diferentes equipamentos, materiais e métodos que foram utilizados na pesquisa. A metodologia definida para o desenvolvimento deste trabalho buscou simular situações reais encontradas em obras, mais especificamente problemas de descolamento/aderência de peças cerâmicas utilizadas em fachadas.

Os ensaios experimentais foram realizados entre os meses de março a junho de 2016, nas imediações do prédio que abriga o Centro Integrado de Pesquisa em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina, localizado no Sapiens Parque – Bairro Canasvieiras – Florianópolis/SC.

Para a realização dos testes, foram confeccionados dois painéis de alvenaria revestidos com cerâmica em duas cores (preto e branco), onde foram simuladas falhas internas variando dois parâmetros: profundidade e dimensão.

#### 3.1. Materiais

Para a fabricação dos painéis, foram utilizados blocos cerâmicos de seis furos, com dimensões de 9x14x24cm, que foram assentados com argamassa produzida *in loco* no traço 1:1:6, utilizando cimento CP-IV, cal e areia comum lavada. A relação água/cimento foi estipulada em 0,50. Os traços e espessuras das camadas de revestimento estão especificados na Tabela 3, a seguir:

Tabela 3 - Composição dos painéis

Camada	Traço	Espessura (mm)
Chapisco	1:3 (cimento:areia)	3,0
Emboço paulista	1:2:8 (cimento:cal:areia)	10,0
Arg. colante – AC-II	Espec. fabricante	4,0
Pastilha	-	6,0

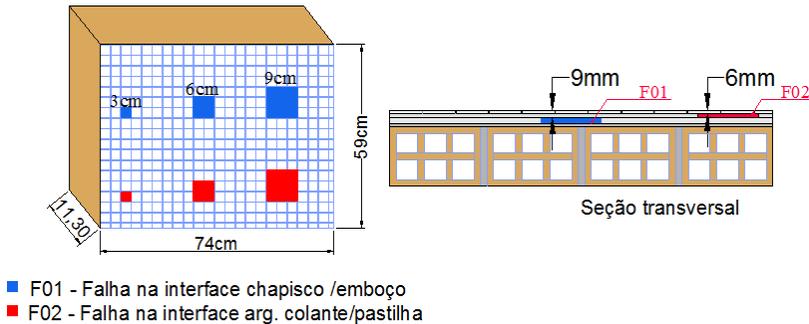
A fixação das pastilhas foi realizada com argamassa colante, do tipo AC-II, específica para peças cerâmicas em áreas internas e externas

sujeitas às oscilações de temperatura e umidade. O rejunte utilizado foi cimentício para revestimento cerâmico (flexível) com espaçamento mínimo de 3mm. A pastilha cerâmica utilizada possui dimensões de 7,50 x 7,50cm, sendo fornecida em placas de 30x30cm.

### 3.1.1. Confeção dos painéis

Para a realização dos testes, foram confeccionados 02 painéis de alvenaria, com dimensões de 74 x 59 x 11,30cm, revestidos em um dos lados com chapisco, emboço, argamassa colante e pastilha cerâmica (Figura 16). A superfície posterior do painel não foi revestida, ou seja, o bloco cerâmico permaneceu exposto.

Figura 16 - Configuração dos painéis



As falhas internas foram simuladas removendo-se manualmente porções de argamassa nas dimensões especificadas na Figura 16, nas interfaces chapisco/emboço (F01) e argamassa colante/placa cerâmica (F02) nas seguintes dimensões: 3x3cm, 6x6cm e 9x9cm. Os defeitos F01 e F02 ficaram distanciados 9mm e 6mm da superfície, respectivamente.

A Figura 17 apresenta as etapas de produção dos painéis. Foram utilizadas placas de poliestireno expandido/EPS nas dimensões definidas para auxiliar na execução do emboço. Ao iniciar a pega, o EPS foi removido, restando apenas o vazio (Figuras 19a e 19b).

Após um intervalo de 8 dias, iniciou-se o assentamento da argamassa colante. Para garantir que ela não escorresse para dentro dos vazios deixados no emboço, a cola foi distribuída primeiramente no tardo da pastilha, aguardando um tempo de aproximadamente 10 minutos para que ficasse mais firme (Figura 19c). Após isso, a placa de

pastilha foi assentada no emboço, garantindo que o vazio continuasse íntegro.

Figura 17 – Produção dos painéis: (a) e (b) execução do emboço; (c), (d) e (e) execução da argamassa colante e assentamento da pastilha; (f) painéis prontos



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

### 3.2. Métodos

Para a realização do estudo, foi empregada a termografia passiva, onde o estímulo térmico ocorre por meio da carga solar ambiental atuando sobre o corpo. Para isso, os painéis foram transportados para a área externa do Centro de Pesquisa e apoiados sobre uma plataforma em madeira, conforme demonstrado na Figura 18.

A cada ensaio, os painéis eram posicionados com a superfície revestida voltada para uma orientação solar distinta (leste, oeste, norte e sul). A câmera foi disposta em um tripé com 1,20m de altura, ficando sempre perpendicular às superfícies inspecionadas. A distância estabelecida entre a câmera e o painel foi de 3,50m, definida em função do Campo de Visão (FOV) do aparelho, conforme será explicado adiante.

Figura 18 – Disposição do ensaio



Fonte: Autora

A câmera utilizada foi a FLIR B 400 (Figura 19), que capta a energia emitida pela superfície de um objeto e converte em sinais elétricos por um detector de infravermelhos em matriz bidimensional, e o sinal de temperatura analógico é amplificado e convertido num sinal digital. Esse sinal digital é exibido como uma imagem térmica colorida ou monocromática. Na Tabela 4 são descritas as características da câmera FLIR B 400.

Figura 19 - Câmera Flir B-400



Fonte: Manual FLIR.

Tabela 4 - Especificações da câmera

Câmera termográfica	FLIR B 400
Faixa de temperatura empregada (°C)	-15 a 50
Precisão (%)	± 2,0
Faixa espectral (µm)	7,50 x 13,0
Resolução da imagem (pixels)	320 x 240
L.F.O.V (mrad)	1,36
Lentes (°)	25

A adequada aplicação do método de termografia infravermelha necessita que sejam considerados, previamente, vários fatores, como temperatura ambiente, umidade relativa do ar, temperatura refletida e a garantia de perpendicularidade e distância entre a câmera e o painel em estudo, que serão tratados a seguir.

### 3.2.1. Ensaios preliminares

#### a) Determinação da emissividade

A emissividade foi medida conforme procedimento sugerido pela norma ASTM E 1933 – 99a - Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers. Inicialmente, foi colada na cerâmica uma fita isolante de emissividade elevada conhecida ( $\epsilon = 0,97$ ) e esperou-se o período de

aproximadamente uma hora e meia para que a fita e a superfície da amostra entrassem em equilíbrio térmico.

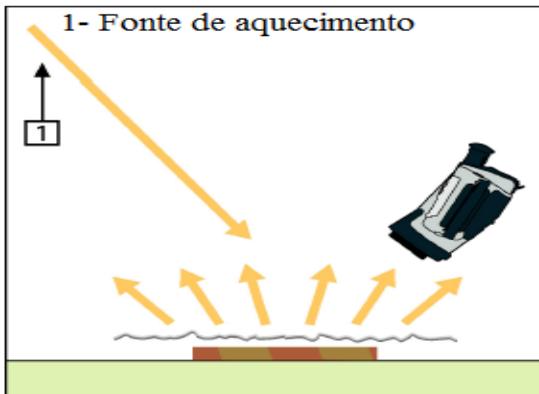
Após isso, a emissividade da câmera foi ajustada de acordo com a emissividade da fita isolante. A temperatura da fita isolante foi tomada definindo a função de medição de um ponto. Depois de anotada esta temperatura, deslocou-se o mesmo ponto para a superfície da amostra e, assim, acertou-se o valor da emissividade até que se chegasse à mesma temperatura da fita isolante, adotando-se, portanto, este último valor como o da emissividade real da amostra ( $\varepsilon = 0,90$ ).

#### b) Temperatura refletida

A temperatura refletida do local de medição também deve ser investigada previamente. O manual *do Infrared Training Center* (ITC) sugere que a temperatura ambiente refletida seja verificada, regulada e compensada corretamente para materiais de emissividade baixa e para longas distâncias, ou quando a temperatura do objeto esteja relativamente próxima a da temperatura ambiente.

A norma ASTM E1862/97 - Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers sugere dois métodos para a verificação da temperatura refletida: direto e refletor. No método refletor, adotado neste trabalho, uma folha de papel alumínio deve ser amarrutada e, após ser alisada, posicionada em frente à superfície investigada, conforme pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20 – Método refletor



Fonte: Manual FLIR.

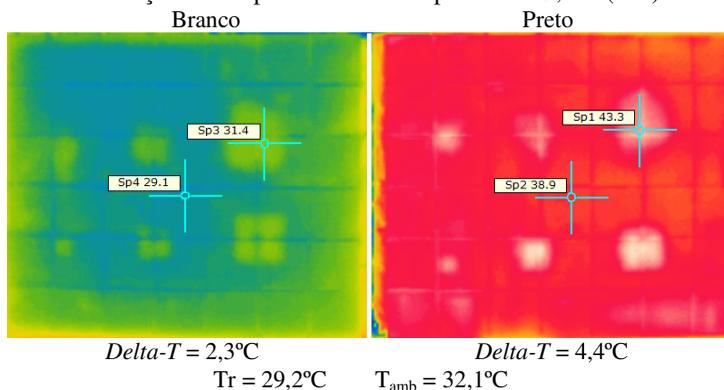
No entanto, considerando que o ensaio foi realizado em ambiente externo e tendo o sol como fonte de aquecimento, havia variação da sua posição ao longo do dia, dificultando a investigação desse parâmetro a cada 30 minutos. Além disso, quando o painel estava voltado para a orientação solar leste, por exemplo, a radiação solar incidia diretamente sobre a superfície investigada no período da manhã, porém a partir do meio dia, a imagem era obtida do lado oposto ao aquecimento. Ou seja, para obter a temperatura refletida durante todo o período do ensaio, o painel teria que ser mudado de posição constantemente ao longo do dia.

A fim de averiguar a influência desse parâmetro nos resultados obtidos, foi realizado um teste experimental simulando várias TRs (temperaturas refletidas) para uma mesma imagem, com o auxílio do software Flir QuickReport 1.2. Sendo assim, foram tomadas a temperatura ambiente e a umidade relativa de acordo com os dados fornecidos por um termo-higrômetro no dia e na hora do início do ensaio. Além disso, mediu-se a distância entre a lente da câmera e o objeto com a utilização de uma trena e, por fim, foi determinada a emissividade, conforme descrito anteriormente.

Para todos os casos, então, a temperatura ambiente era de  $32,1^{\circ}\text{C}$ , distância de  $3,50\text{m}$ , emissividade de  $0,90$  e umidade relativa do ar igual a  $65\%$ .

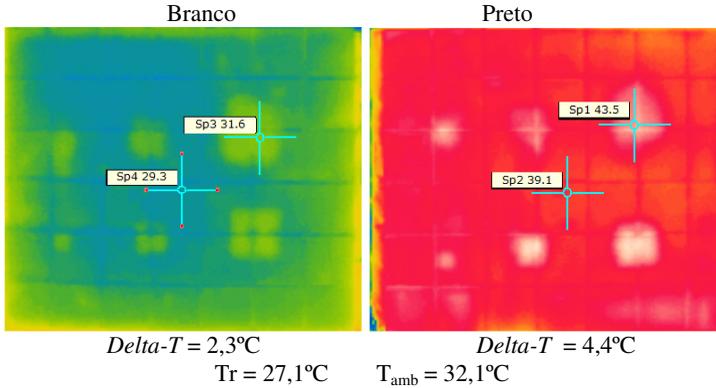
Na Figura 21, apresenta-se a imagem térmica obtida com a temperatura refletida real ( $29,2^{\circ}\text{C}$ ), que foi definida conforme procedimento sugerido pelo manual (método refletor). Observa-se que a diferença de temperatura entre a região com e sem defeito, no painel de cor branca, foi de  $2,3^{\circ}\text{C}$ , e no painel preto,  $4,4^{\circ}\text{C}$ .

Figura 21: Simulação de temperatura refletida para  $\text{TR}=29,2^{\circ}\text{C}$  (real)



Na Figura 22, foi inserida erroneamente a TR de 27,1°C, ou seja, 5°C abaixo da temperatura ambiente, e observa-se que o  $\Delta t$  se manteve constante.

Figura 22: Simulação de temperatura refletida para TR=27,1°C



Na Figura 23, inseriu-se a TR exatamente igual à temperatura ambiente, ou seja, 32,1°C, e o  $\Delta T$  encontrado foi exatamente o mesmo obtido com as TRs anteriores. No último teste (Figura 24), inseriu-se a TR de 37,1°C (5°C a mais que a temperatura ambiente) e, novamente, obteve-se exatamente as mesmas diferenças de temperaturas.

Figura 23: Simulação de temperatura refletida para TR=32,1°C

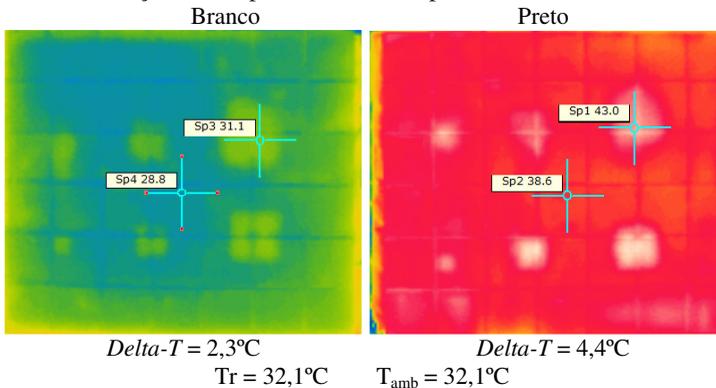
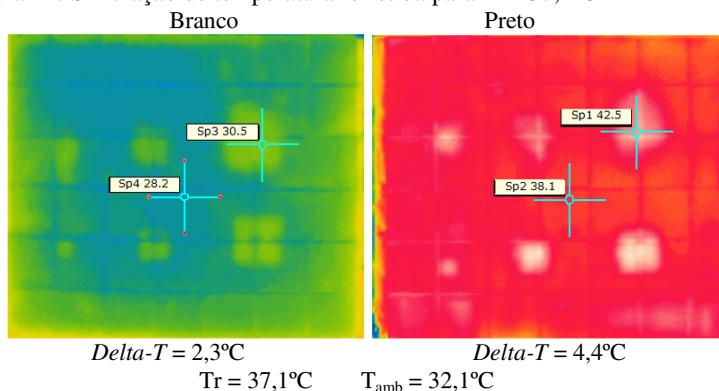


Figura 24: Simulação de temperatura refletida para TR=37,1°C



A Tabela 5 apresenta de forma resumida os valores de temperatura encontrados nas simulações realizadas, para o painel de cor preta. Observa-se que, comparando as temperaturas na superfície analisada, quando a TR inserida é maior do que a real, há uma discreta diminuição da temperatura superficial. Por exemplo, ao comparar as TRs 1 e 2, percebe-se que, para um erro de +2,9°C na TR, a temperatura superficial na região com defeito altera de 38,9°C para 38,6°C, ou seja, diminui apenas 0,3°C.

Tabela 5 - Temperaturas observadas no painel preto

Temperatura refletida	Temperatura região sã (°C)	Temperatura no defeito (°C)	$\Delta t$ (°C)
1 - TR real = 29,2°C	43,3	38,9	4,4
2 - TR = 32,1°C (ambiente)	43,0	38,6	4,4
3 - TR = 32,1 + 5°C = 37,1°C	42,5	38,1	4,4
4 - TR = 32,1 - 5°C = 27,1°C	43,5	39,1	4,4

O que se pode concluir com esta análise é que, nas condições desse estudo, independentemente da temperatura refletida adotada, a diferença de temperatura entre a região com e sem defeito ( $\Delta T$ ) se mantém constante.

Ressalta-se também que a identificação do dano não se dá apenas pela medição da temperatura no ponto com defeito, mas também pelo contraste térmico visual da imagem infravermelha, sendo importante observar a delineação da imagem quando alterado esse

parâmetro. Consta-se, porém, que as imagens não sofreram influências significativas com a variação deste parâmetro, uma vez que são muito semelhantes considerando o mesmo corpo de prova.

Com base nesses resultados, e considerando que as análises a seguir tomarão como referência a diferença de temperatura entre a região com e sem defeito (*Delta-T*), e ainda com o objetivo de viabilizar a realização do ensaio, optou-se por adotar em todos os registros termográficos a temperatura refletida igual à temperatura ambiente ( $TR = T_{amb}$ ).

Importante ressaltar que esses resultados foram obtidos, provavelmente, em razão da alta emissividade dos materiais estudados. Para outras condições de ensaio, todas as considerações que envolvem esse parâmetro devem ser analisadas com cautela.

### c) Cálculo da Absortância dos Revestimentos

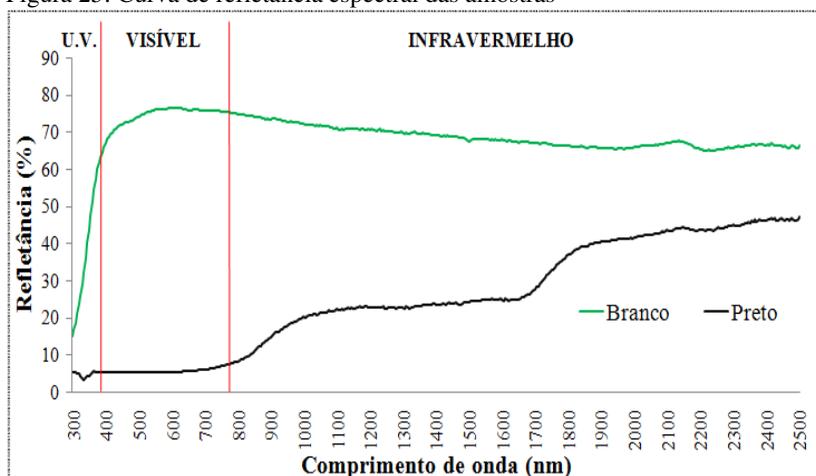
Nesta etapa do trabalho, foram realizadas as análises espectrofotométricas de refletância das cerâmicas branca e preta utilizadas para revestir os painéis.

A adoção de valores de absortância e refletância solar com base na percepção visual das cores é muito comum, porém, algumas pesquisas demonstraram que este tipo de informação não é exata. Apenas uma parcela da radiação solar é emitida como luz visível, que é a única capaz de sensibilizar o olho humano e é responsável pela definição das cores. O restante é emitido como radiação infravermelha e ultravioleta, e não se relaciona com a cor do material.

Considerando o Sol como principal fonte de radiação incidente nas edificações, é comum caracterizar as superfícies por sua absortância ou refletância solar. Essas propriedades são calculadas e integradas ao longo dos comprimentos de onda abrangidos pelo espectro solar, ou seja, para radiações de onda curta, consideradas entre 300 e 2500 nm, aproximadamente. Dessa forma, o melhor método para identificar a refletância de uma superfície é por meio da espectroscopia, ou seja, verificar a refletância da amostra ao longo do espectro solar.

O espectrofotômetro utilizado nesta pesquisa foi o Lambda 1050 – PerkinElmer, pertencente ao Labeee (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações) da Universidade Federal de Santa Catarina e os dados resultantes do ensaio possibilitaram a confecção do gráfico (Figura 25) como forma ilustrativa do comportamento das amostras utilizadas em cada espectro.

Figura 25: Curva de refletância espectral das amostras



O gráfico foi subdividido em três módulos, caracterizando as regiões do ultravioleta (300 a 380 nm), visível (380 a 780 nm) e infravermelho-próximo (780 a 2500 nm). É fato conhecido que, com relação ao infravermelho de onda longa, a refletância não depende da cor. Para o infravermelho-próximo, porém, observa-se uma forte dependência. A Tabela 6 expõe os valores de refletância obtidos para as pastilhas estudadas.

Tabela 6 - Refletância solar das amostras

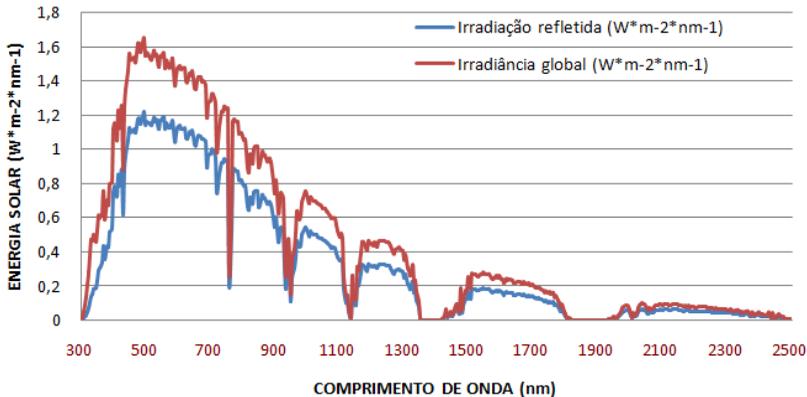
		Refletâncias (%)			
		Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média
<b>PASTILHA BRANCA</b>	Rf*-solar	71,9	72,3	72,0	<b>72,1</b>
	Rf-visível	75,5	75,8	75,6	<b>75,6</b>
<b>PASTILHA PRETA</b>	Rf-solar	12,0	12,1	12,0	<b>12,0</b>
	Rf-visível	5,2	5,4	5,3	<b>5,3</b>

\*Rf = Refletância

Verifica-se que a refletância solar total para radiação de onda curta (300 a 2500nm) para o branco é cerca de seis vezes maior que o

preto (72,1% branco; 12,0% preto). Esses valores foram obtidos pela relação entre a integral de toda a energia que é refletida e o total da energia incidente. O procedimento utilizado foi a multiplicação, em cada comprimento de onda, dos resultados do ensaio de reflexão pelo valor da energia solar do espectro padrão adotado. Desta maneira, obteve-se a energia solar que é refletida em cada comprimento de onda. A razão entre a integral da curva resultante destes valores e a integral da curva do espectro solar padrão resulta no percentual da energia total que é refletida. Pode-se considerar neste cálculo diferentes regiões espectrais, sendo neste trabalho dividido em ultravioleta, visível e infravermelho próximo, além do espectro total. O espectro padrão utilizado foi extraído da norma ASTM G173 (ASTM, 2012b) (Figura 26 - Espectro padrão).

Figura 26 - Espectro padrão (ASTM G173)



### 3.2.2. Aquisição das imagens termográficas

Tendo procedido a todos os testes preliminares, foram realizados os ensaios referentes à aquisição das imagens termográficas. Em um primeiro momento, garantiu-se o alinhamento adequado entre a amostra e a câmera, de forma a obter um ângulo de 90° entre ambas. Foi utilizado um nível de bolha para posicionar o painel, garantindo que este ficasse perpendicular à superfície frontal da câmara.

Com o painel alinhado, foram inseridos os parâmetros previamente determinados nos testes preliminares exigidos pela câmera para uma leitura de temperatura correta (emissividade, temperatura refletida e distância).

O período determinado para a realização dos testes foi entre 08h00min e 18h00min, ou seja, as imagens foram registradas por um período de 10 (dez) horas, onde os termogramas foram tomados sequencialmente a cada 30 minutos. Os painéis foram posicionados com as superfícies revestidas voltadas para quatro diferentes orientações solares (leste, oeste, norte e sul).

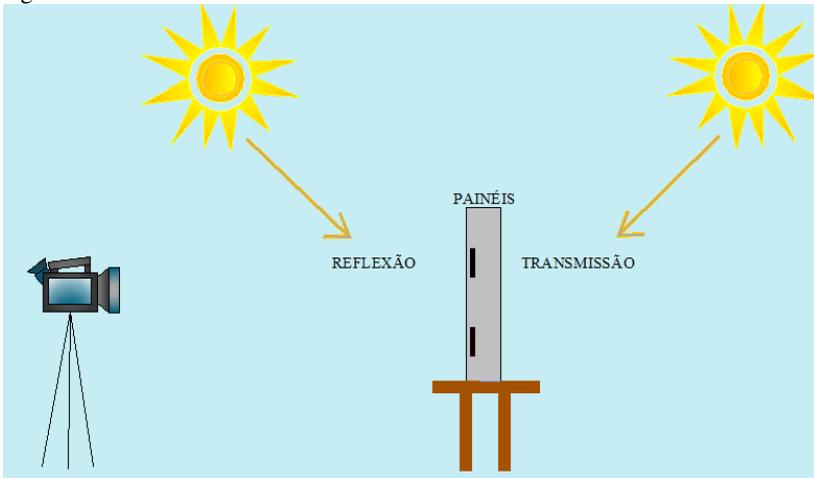
Nas orientações leste e oeste, foram realizados ensaios em três situações climáticas distintas: 1 - insolação plena (sem nuvens), verão; 2 - insolação plena, inverno; 3 - insolação parcial (nublado), outono. Nas orientações norte e sul, os ensaios ocorreram apenas em uma situação climática: insolação plena, outono. Considerando que foram tomadas 19 imagens por dia (entre 08h00min e 18h00min), foram analisadas, no total, 152 imagens.

Para a apresentação dos resultados, serão utilizados os seguintes códigos:

- Ensaio 1 – LPV (leste, plena, verão);
- Ensaio 2 – LPI (leste, plena, inverno);
- Ensaio 3 – LNO (leste, nublado, outono);
- Ensaio 4 – OPV (oeste, plena, verão);
- Ensaio 5 – OPI (oeste, plena, inverno);
- Ensaio 6 – ONO (oeste, nublado, outono);
- Ensaio 7 – NPO (norte, plena, outono);
- Ensaio 8 – SPO (sul, plena, outono).

Considerando a variação da posição do sol ao longo do dia, os ensaios foram obtidos pelos métodos de reflexão e transmissão (Figura 27). Na termografia por reflexão, a câmera observa a superfície do mesmo lado do aquecimento, contrário à transmissão, que a câmera observa o lado oposto ao aquecimento.

Figura 27 - Métodos de transmissão e reflexão

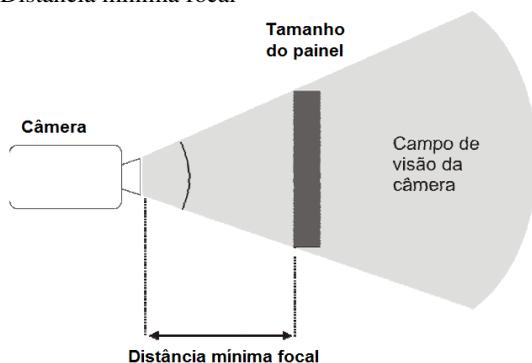


A nitidez com que um defeito pode ser percebido tem relação direta com o  $\Delta T$ , que é a diferença de temperatura entre a região com e sem defeito, uma vez que quanto maior for o contraste térmico na superfície analisada, melhor será a percepção do defeito. O intuito deste trabalho é investigar o quanto a diferença na absorvância dos revestimentos influencia nesse contraste ao longo do dia. Desta forma, todas as imagens térmicas foram analisadas levando em consideração esse parâmetro. Quanto mais próximo de zero for esse valor, pior será o contraste.

Em relação às variáveis envolvidas neste trabalho, classificam-se como variáveis independentes: temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar, altura e distância entre a câmera e a superfície investigada, emissividade e temperatura aparente refletida. A variável dependente é a temperatura registrada nos termogramas.

A distância estabelecida entre a câmera e o painel foi definida em função do Campo de Visão (FOV) do aparelho e do tamanho da amostra analisada. Para obter uma imagem rica em detalhes, resultando numa matriz de temperatura mais refinada, a amostra deve ficar o mais perto possível da câmera, dentro do plano de foco que o conjunto óptico permite, conforme ilustra a Figura 28.

Figura 28 - Distância mínima focal



Para o modelo de câmera utilizado, com resolução de 320 x 240 pixels, verificou-se que, a uma distância de 3,50 metros, ambos os painéis ficarão dentro do campo de visão da câmera. A calculadora usada para o cálculo da distância é disponibilizada no site do fornecedor da câmera, conforme Figura 29. Os valores de HFOV e VFOV representam o campo de visão horizontal e vertical, respectivamente.

Figura 29 – Calculadora do campo de visão

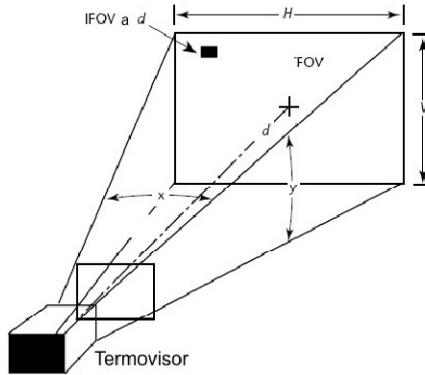
Distância focal: 18 mm			
Resolução: 320 × 240 pixels			
Campo de visão em graus: 25.06			
Foco mínimo: 0.4 m (1.31 ft.)			
Distância Hiperfocal: 5.40 m (17.70 ft.)			
Outras distâncias: <input type="text" value="3.5"/>			m ▼ <a href="#">Calcular</a>
Digite a distância (decimal com vírgula)			
<b>D</b>	<b>3.50</b>	<b>m</b>	
HFOV	1.56	m	
VFOV	1.17	m	
DOF near	2.12	m	
DOF far	9.98	m	
IFOV	4.86	mm	

Fonte: <http://flir-br.custhelp.com/>

Além disso, verificou-se que o IFOV (Instantaneous Field of View), que é o menor detalhe de imagem que pode ser percebido com

precisão e está representado na Figura 30, é de 4,86mm, inferior ao menor defeito que será simulado no painel, que é de 30mm.

Figura 30 - Campo de visão (FOV) e Campo de Visão Instantâneo (IFOV).



Fonte: Santos, 2006.

#### 4. RESULTADOS

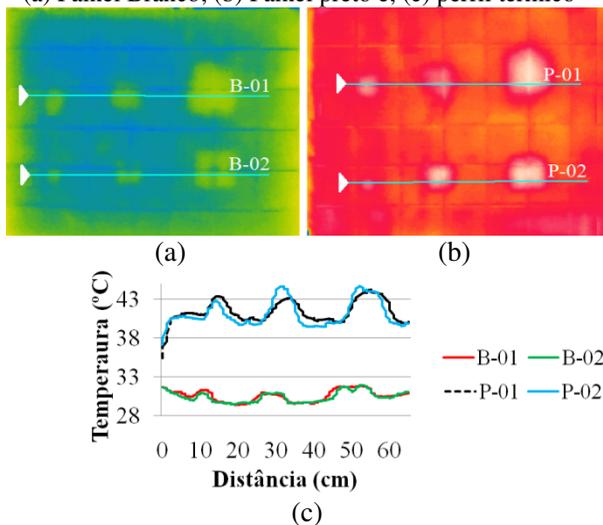
Neste capítulo, serão apresentados os estudos termográficos desenvolvidos em campo por meio da termografia passiva, procurando-se compreender as potencialidades e limitações desta técnica, recorrendo aos equipamentos descritos no capítulo anterior.

A escala de temperaturas utilizada foi definida manualmente para cada termograma, procurando utilizar a mais adequada para a situação em estudo. Todas as condições de ensaio foram registradas, como temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

Nos próximos itens serão apresentados os resultados obtidos, em termos de termogramas, para cada posição e condição climática, conforme definido no capítulo anterior. A partir das imagens infravermelhas apresentadas na sequência, foi traçado um perfil térmico de temperaturas, utilizando o programa *FLIR Quick Report*, onde foi possível calcular a temperatura ao longo de uma linha para cada pixel da imagem. Considerando que cada pixel representa uma medida real, com os dados do perfil de temperatura, foi possível produzir um gráfico de Temperatura x Posição, como mostra a Figura 31c.

A Figura 32 apresenta um exemplo de como serão apresentados os resultados. As Figuras 32a e 32b ilustram os termogramas obtidos para os painéis branco e preto, respectivamente. Já a Figura 32c ilustra o perfil térmico para cada linha de defeito.

Figura 31 - (a) Painel Branco; (b) Painel preto e; (c) perfil térmico



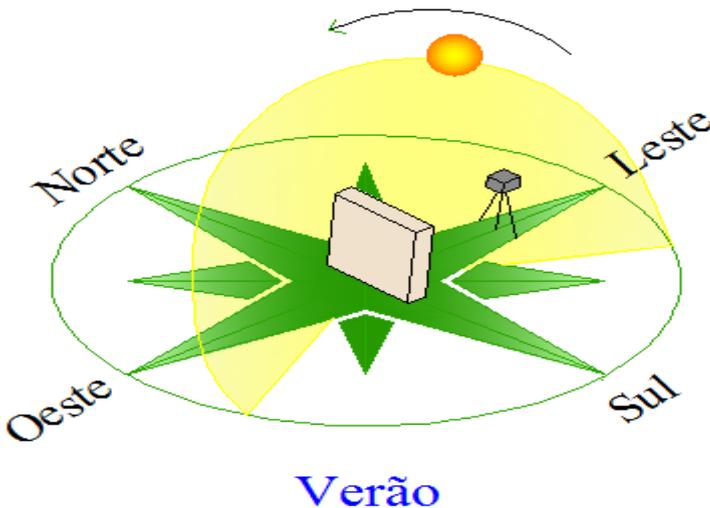
#### 4.1. Ensaio 01 – LPV (Leste, plena, verão)

##### 4.1.1. Considerações iniciais

O ensaio 01 ocorreu no dia 11 de março de 2016, entre 08h00min e 18h00min, céu predominantemente sem nuvens. O painel foi posicionado de modo que a superfície revestida com cerâmica ficasse voltada para o leste. Desta forma, durante o período matutino, a câmera termográfica observou a superfície do mesmo lado do aquecimento dos painéis (reflexão), e no período vespertino, a imagem foi obtida do lado oposto ao aquecimento (transmissão), conforme demonstrado no esquema de ensaio na Figura 32.

Considerando que o ensaio foi realizado na estação verão, é importante observar que o nascer e o pôr do sol ocorrem mais ao sul, irradiando a superfície investigada por um período maior de tempo (quando comparado às demais estações). Essa informação é importante porque pode influenciar nos resultados deste trabalho.

Figura 32 – Esquema de ensaio



A Tabela 7 apresenta as condições climáticas (temperatura ambiente, velocidade do vento, insolação e umidade relativa) registradas sequencialmente a cada trinta minutos, ou seja, a cada novo registro de

imagem. Observa-se que neste dia o calor foi intenso, com temperatura média de 35°C e umidade relativa em torno de 60%.

Tabela 7 - Condições climáticas em 11 de março de 2016

Horário	Insolação	Temperatura ambiente (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Umidade Relativa (%)
08h00min*	Plena	27,20	0,10	58,00
08h30min*	Plena	29,40	0,10	69,00
09h00min*	Plena	32,10	0,20	65,00
09h30min*	Plena	36,90	0,30	52,00
10h00min*	Plena	37,50	0,20	51,00
10h30min*	Plena	39,50	0,10	51,00
11h00min*	Plena	38,70	0,40	51,00
11h30min*	Plena	37,50	2,30	53,00
12h00min*	Plena	36,20	2,00	57,00
12h30min	Plena	36,50	2,40	59,00
13h00min	Plena	37,80	2,30	54,00
13h30min	Plena	35,80	4,50	59,00
14h00min	Plena	35,30	3,00	60,00
14h30min	Plena	35,20	2,50	61,00
15h00min	Plena	34,90	3,00	65,00
15h30min	Plena	34,20	2,50	66,00
16h00min	Plena	33,90	3,00	66,00
16h30min	Plena	33,60	2,50	68,00
17h00min	Plena	33,10	1,50	67,00
17h30min	Plena	33,00	0,80	69,00
18h00min	Plena	32,90	1,00	69,00

Melhores Delta-T's

\* Horários em que a radiação solar incidia diretamente sobre a superfície investigada

#### 4.1.2. Obtenção dos termogramas

As Figura 33 a Figura 46 mostram os termogramas obtidos para cada painel ao longo do dia. Ao iniciar o ensaio (Figura 33), percebe-se que, tanto a delineação da imagem quanto os perfis de temperaturas traçados ao longo dos painéis demonstram que a superfície de cor preta, cuja absorvância é sensivelmente maior, apresenta resultados mais evidentes no período de aquecimento das peças.

Nota-se ainda que, durante todo o período do ensaio, a região sã do painel branco manteve-se em temperatura inferior à temperatura ambiente. No revestimento preto, porém, ao retirar a lona que protegia os painéis, já foi registrada uma diferença de 1,4°C entre a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ : 27,2°C) e a temperatura do painel na região sã ( $T_{sã}$ :

28,60°C) e essa variação foi suficiente para detectar todos os defeitos, inclusive o de menor tamanho.

Figura 33: LPV, 08h00min: (a) painel branco; (b) painel preto e; (c) perfil de temperatura.

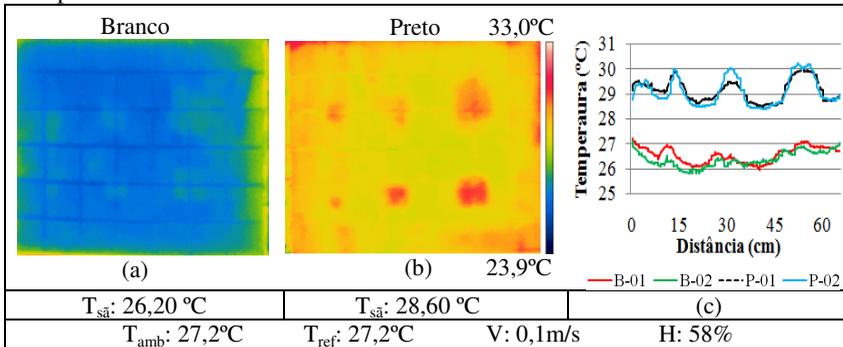
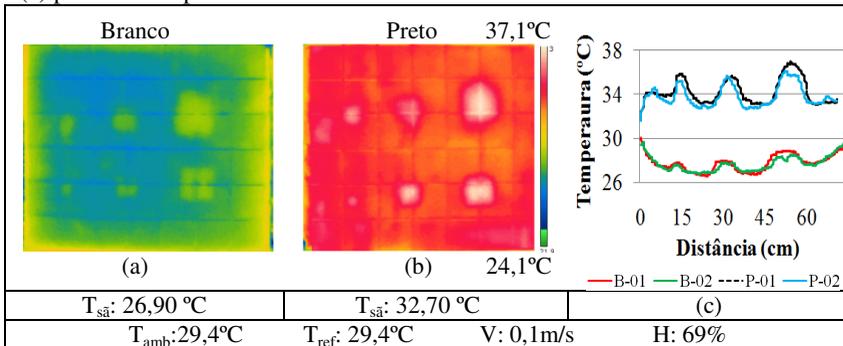


Figura 34: LPV, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.



Um período de 30 minutos de aquecimento foi suficiente para que os defeitos no painel branco fossem detectados pela câmara termográfica. Os perfis de temperatura (Figuras 34c e 35c), indicam que há uma elevação da curva dos gráficos, que representam um aumento na temperatura onde estão localizados os defeitos artificiais.

O *Delta-T*, ou seja, a diferença de temperatura entre a região sã e a região com defeito no painel de cor branca é, em média, +1,2°C nas primeiras horas do dia, enquanto no painel preto esse valor sobe para +3°C.

Figura 35: LPV, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.

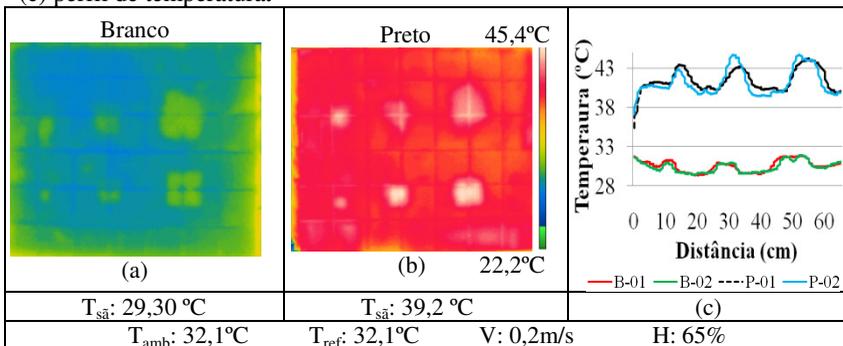


Figura 36: LPV, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura.

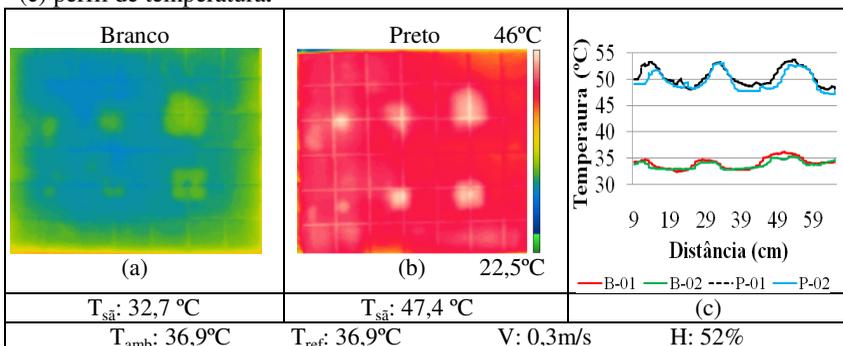


Figura 37: LPV, 10h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

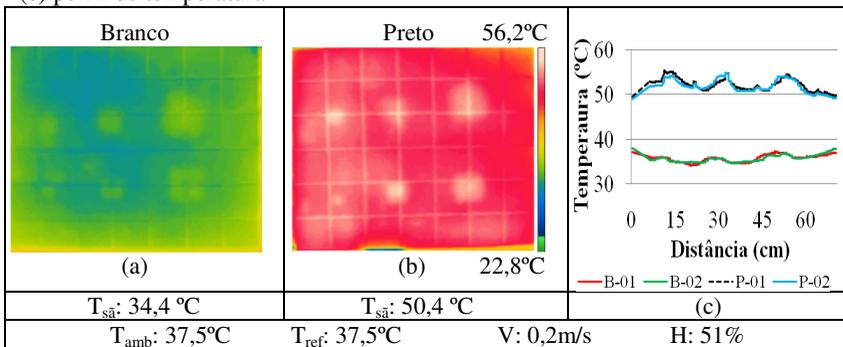
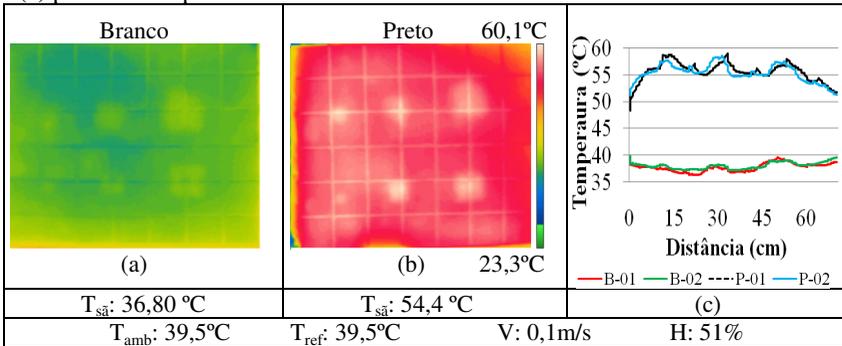


Figura 38: LPV, 10h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



A partir das 10h30min (Figura 38), a temperatura da região sã fica muito próxima à temperatura da região com defeito no painel branco, e as falhas já não são mais captadas com nitidez. Analisando os perfis P-01 e P-02, verifica-se que a temperatura do rejunte também é superior à temperatura da pastilha na região sã, criando picos de elevação no gráfico que não guardam relação com os defeitos.

Figura 39: LPV, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

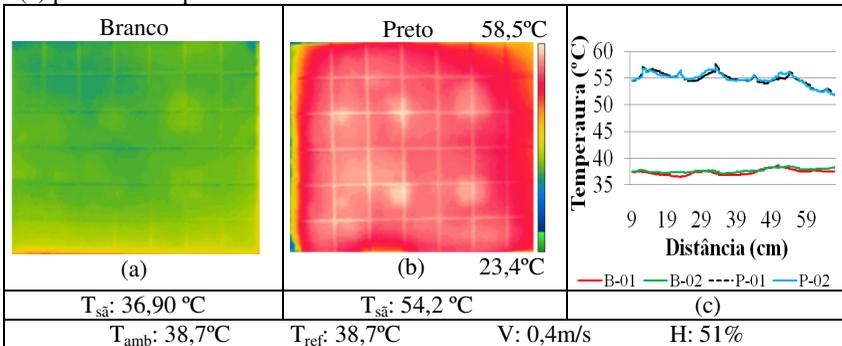


Figura 40: LPV, 11h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

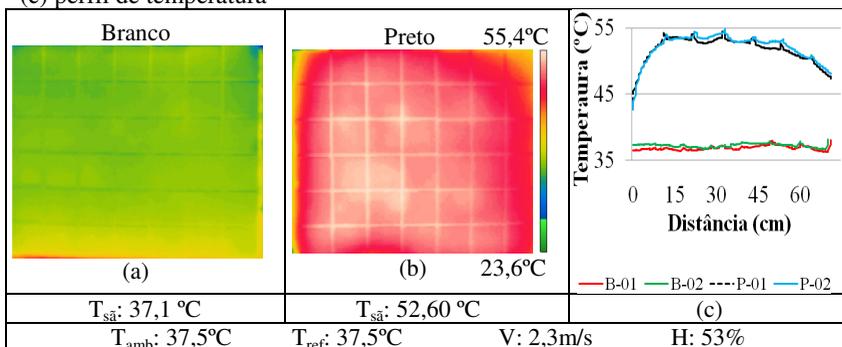
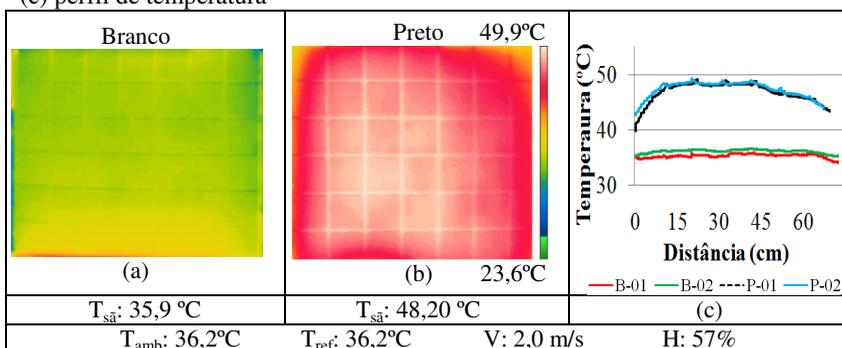


Figura 41: LPV, 12h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



Entre 12h00min e 16h00min os painéis entraram em equilíbrio térmico com o ambiente e as falhas não puderam mais ser visualizadas. Analisando a Tabela 7 (condições climáticas), verifica-se que a temperatura ambiente foi crescente até as 13h00min, e após esse horário, começou a cair gradativamente. No entanto, somente após as 16h00min é que esse resfriamento foi o suficiente para registrar algum defeito, ainda que de forma pouco nítida.

Figura 42: LPV, 16h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

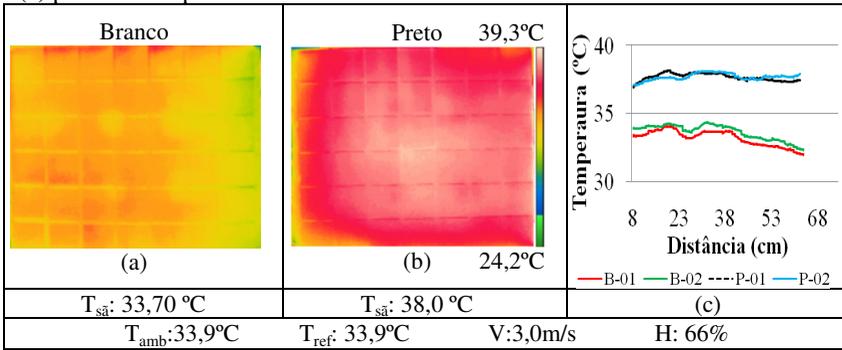
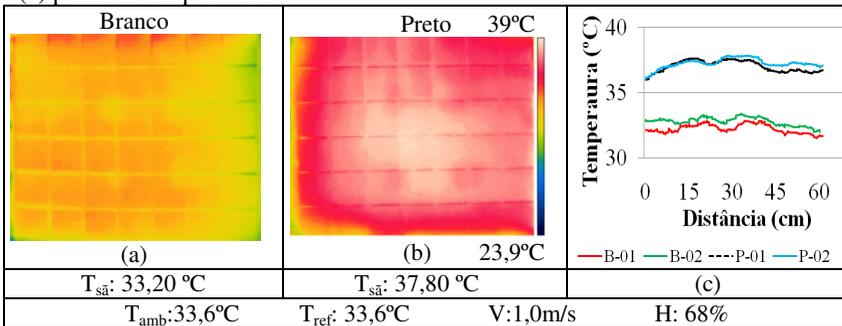


Figura 43: LPV, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



Na fase de decaimento da temperatura ambiente, nota-se que os defeitos perdem calor mais rapidamente que o restante do painel, sendo registrados como pontos mais frios nos gráficos. O  $\Delta T$  médio nesse período, no painel branco, foi de  $-0,6^{\circ}\text{C}$ , e no preto,  $-0,7^{\circ}\text{C}$ . É importante registrar que o resfriamento das peças ocorreu no sentido das bordas para o centro do painel, e isso prejudicou a visualização dos menores defeitos (3cm), uma vez que estão localizados nas extremidades.

Figura 44: LPV, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

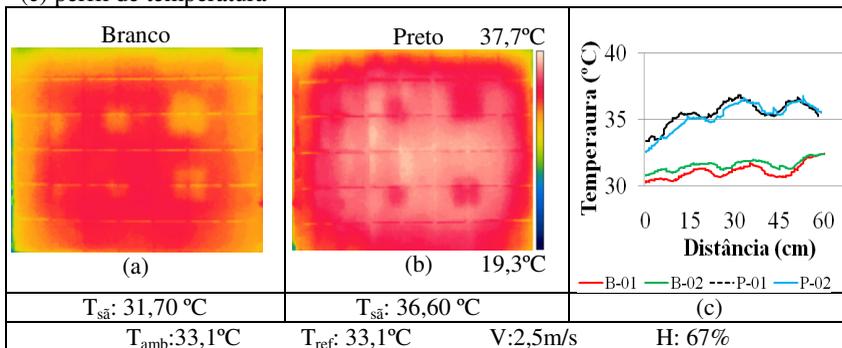


Figura 45: LPV, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

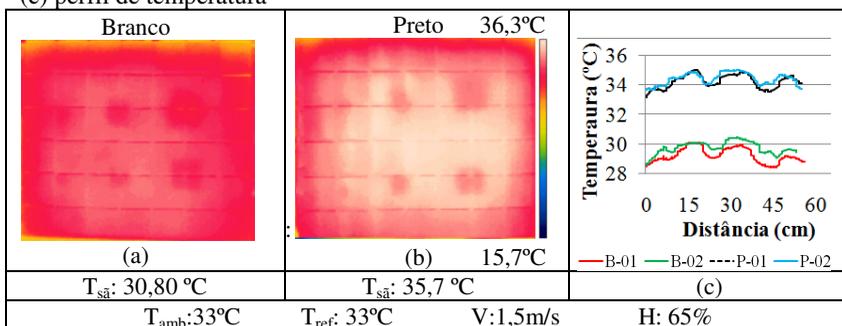
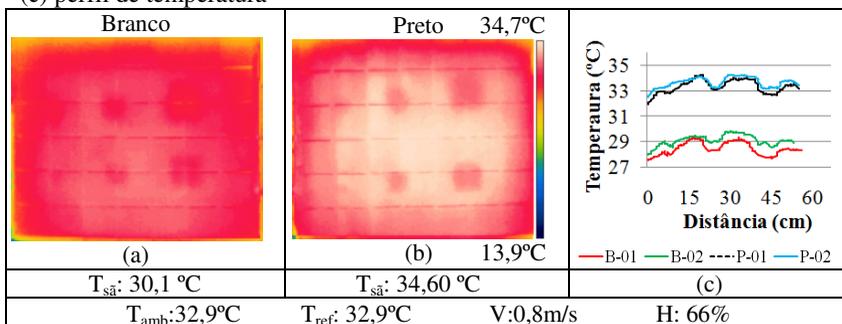


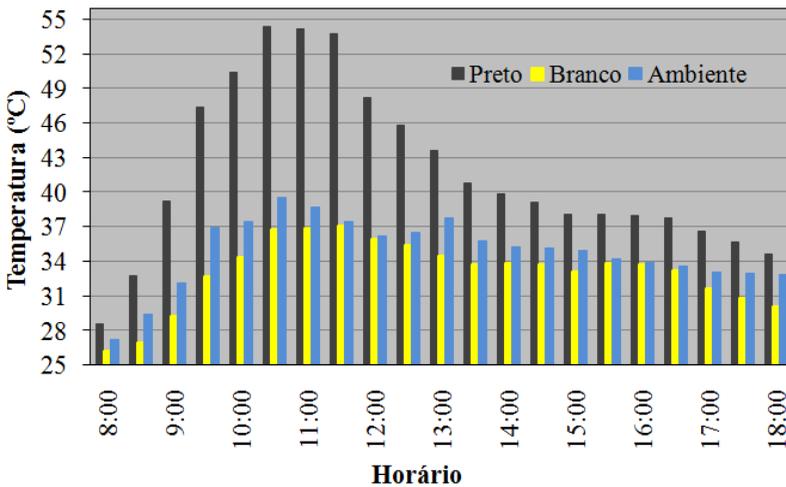
Figura 46: LPV, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



#### 4.1.3. Evolução do aquecimento dos painéis

A Figura 47 apresenta a evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia, ressaltando que as temperaturas foram tomadas na região sã de cada painel, bem ao centro. Percebe-se que, em ambos os casos, o pico de aquecimento ocorreu entre 10h00min e 11h30min, porém a diferença de temperatura entre os revestimentos chegou a aproximadamente 17°C nesse intervalo. Durante todo o período de ensaio, a temperatura na região sã do painel branco permaneceu ligeiramente inferior à do ambiente, o que pode ser justificado pela elevada refletância dessa cor.

Figura 47: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia



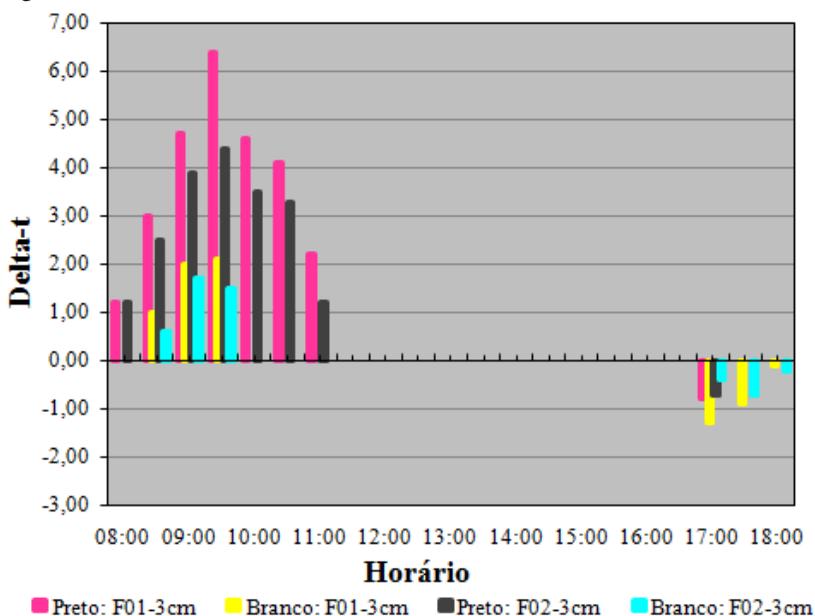
A detecção dos defeitos é avaliada a partir das Figura 48 e Figura 50, para os defeitos de 3, 6 e 9 cm respectivamente. A Figura 48 apresenta os defeitos de 3cm e o  $\Delta T$  representa a diferença de temperatura entre a região sã (centro do painel) e a região com defeito. Quanto mais próximo de zero for esse valor, pior será o contraste térmico. Valores positivos significam que o defeito foi percebido como um ponto mais quente que a região sã, e valores negativos, mais frios.

Analisando o painel de cor branca, verifica-se que os defeitos de 3cm foram visualizados após 30 minutos de aquecimento, entre 08h30min e 09h30min, independente de sua profundidade.

A temperatura dos defeitos nesse horário mostrou-se em média  $1,5^{\circ}\text{C}$  superior à temperatura da região sã, conforme mostram os gráficos. A partir deste horário até as 17h00min, as regiões adjacentes ao defeito ficaram com temperaturas muito próximas, não sendo captada nenhuma diferença pela câmera.

Em relação ao painel preto, os defeitos são visualizados com bastante nitidez no período matutino até as 11h00min, e com  $\Delta T$  médio de  $+3,3^{\circ}\text{C}$ . Após esse horário, em função do resfriamento da peça ocorrer no sentido das bordas para o centro, as falhas apareceram com o contorno pouco definido. Acredita-se que os defeitos teriam sido visualizados com nitidez se estivessem localizados mais ao centro do painel. Ou seja, o que prejudicou a visualização do defeito foi o sentido de resfriamento da peça, e não a sensibilidade da câmera.

Figura 48:  $\Delta T$  – defeitos de 3cm



As Figura 49 e Figura 50 apresentam a variação do  $\Delta T$  para os defeitos de 6cm e 9cm, respectivamente. Em ambos os casos, os defeitos foram observados com nitidez por mais tempo, quando comparados ao menor defeito. Em todos os casos, os defeitos no painel branco foram observados somente após 30 minutos de aquecimento.

A média do *Delta-T* para os defeitos de 6cm no revestimento branco foi de +1,2°C entre 08h30min e 10h00min e de -0,70°C a partir das 16h00min. No painel preto, a média foi de +3,0°C entre 08h00min e 11h00min e -0,9°C no final da tarde.

Os defeitos de 9cm foram visualizados com mais nitidez e por maior período de tempo, em ambas as cores. A média do *Delta-T* para o painel preto foi de +3,1°C entre 08h00min e 11h30min e de -0,80°C a partir das 16h00min. No painel branco, a média foi de +1,75°C entre 08h30min e 11h00min e -0,80°C no final da tarde.

Figura 49: *Delta-T* – defeitos de 6cm

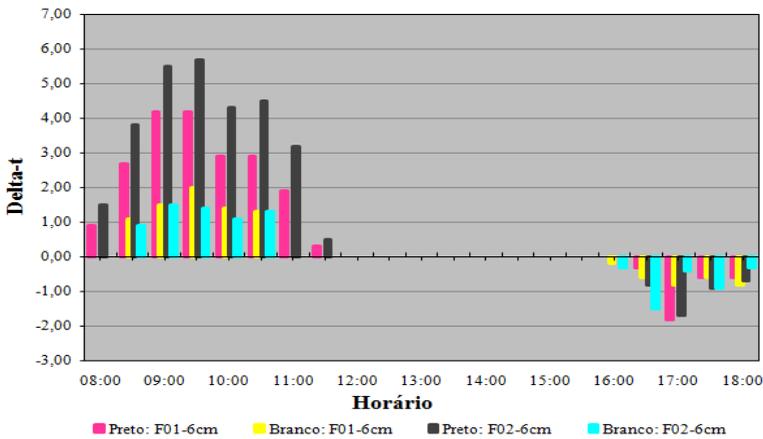
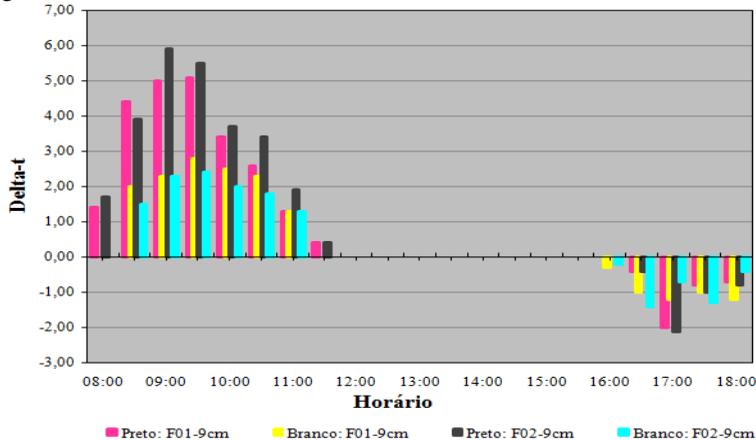


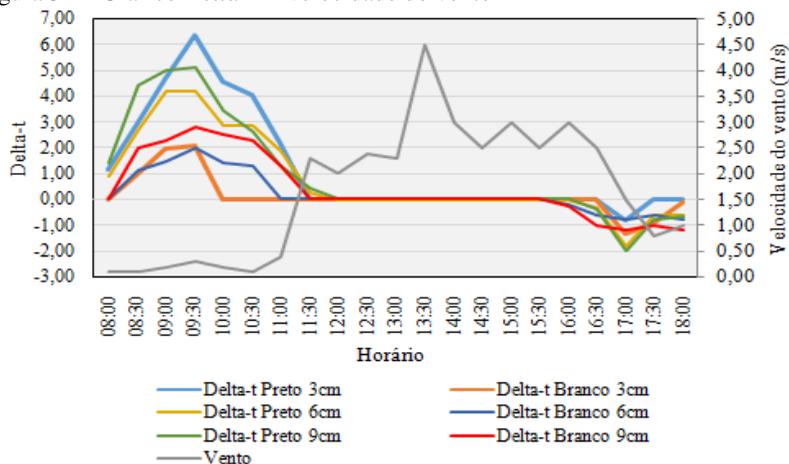
Figura 50: *Delta-T* – defeitos de 9cm



#### 4.1.4. Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos

A Figura 51 apresenta a relação entre a velocidade do vento e o contraste térmico obtido nos termogramas ao longo do ensaio. Nota-se que, nas primeiras horas do dia, entre 08h00min e 11h30min, a velocidade do vento é relativamente baixa, em torno de 0,2m/s. Na medida em que esse valor aumenta, os  $\Delta T$ 's diminuem, e os defeitos não são mais visíveis. A partir das 16h00min, quando a velocidade do vento diminui, os defeitos voltam a ser visualizados.

Figura 51 – Gráfico  $\Delta T$  x velocidade do vento



No que diz respeito à umidade relativa do ar, a tabela de condições climáticas (Tabela 7) apresenta algumas considerações importantes. Os horários destacados em azul são os que revelaram melhor contraste térmico (maior  $\Delta T$ ). Analisando isoladamente este parâmetro, é possível afirmar que, quanto maior a umidade relativa do ar, melhor é a percepção de defeitos. No entanto, todos os demais aspectos devem ser considerados, como a variação da temperatura ambiente no período, a incidência direta de radiação solar, velocidade do vento, entre outros.

#### 4.1.5. Conclusões gerais sobre o ensaio

Como citado no Capítulo 4, existe uma grande diferença na refletância solar dos revestimentos estudados (72,1% para o branco e 12% para o preto). Confrontando esses dados com o que foi percebido ao longo do Ensaio 1, percebe-se que, tanto a delineação da imagem quanto o perfil de temperatura traçado ao longo do painel demonstram que a superfície de cor preta, cuja absorvância é sensivelmente maior, apresenta resultados mais evidentes no período de aquecimento das peças. Porém, no momento em que inicia o resfriamento dos painéis (a partir das 16h30min), o revestimento escuro perde calor com rapidez, se aproximando do branco, tanto em temperatura quanto em delineação dos defeitos.

No período compreendido entre 10h30min e 16h30min, ambos os painéis entraram em equilíbrio térmico com o ambiente, e as temperaturas das falhas e das regiões sãs apresentaram-se muito semelhantes, não sendo captadas pela câmera termográfica.

No final do dia, ou seja, na fase de resfriamento das peças, voltou a ocorrer a troca de calor com o ambiente, e pode-se novamente perceber alguns defeitos, porém de forma muito menos nítida do que no período de aquecimento.

Percebe-se também que, na fase de aquecimento, as falhas apresentam temperaturas superiores à região sã do painel. Isto ocorre, pois o ar, por ter condutividade térmica mais baixa do que a cerâmica, funciona como um obstáculo para troca de calor. Assim, a região da simulação de descolamento ganha calor com mais facilidade do que a superfície que apresenta boa aderência.

Já na fase de resfriamento, o oposto foi percebido, ou seja, a partir do momento em que os painéis passaram a perder calor para o ambiente, os defeitos apareceram como regiões mais frias que a região sã. Neste caso, a resistência térmica do painel é muito maior do que a massa dos defeitos de ar, e uma vez interrompido o aquecimento solar, a região sã ainda retém o calor enquanto o defeito de ar não possui a mesma capacidade, resfriando mais rapidamente.

Respondendo aos objetivos da presente pesquisa, observou-se que a cor do revestimento e sua respectiva absorvância apresentaram influência na detecção dos defeitos na fase de aquecimento das peças, tanto em termos qualitativos (visualização do defeito) quanto quantitativos (*Delta-T*). Porém, a partir do momento em que as peças entram em equilíbrio térmico com o ambiente e também na fase de

resfriamento, a cor não demonstrou tanta influência, uma vez que os resultados foram semelhantes para ambas as cores.

Concluiu-se ainda que, para as condições de insolação e orientação solar analisada, o melhor horário para capturar defeitos subsuperficiais por meio da termografia infravermelha é no período matutino, entre 08h00min e 11h00min, por ser o intervalo com maior *Delta-T* registrado. No entanto, é importante ressaltar que o tamanho reduzido dos painéis pode ter contribuído para que houvesse um resfriamento mais rápido das peças, prejudicando a visualização dos defeitos na fase de resfriamento, principalmente em relação às falhas localizados nas bordas.

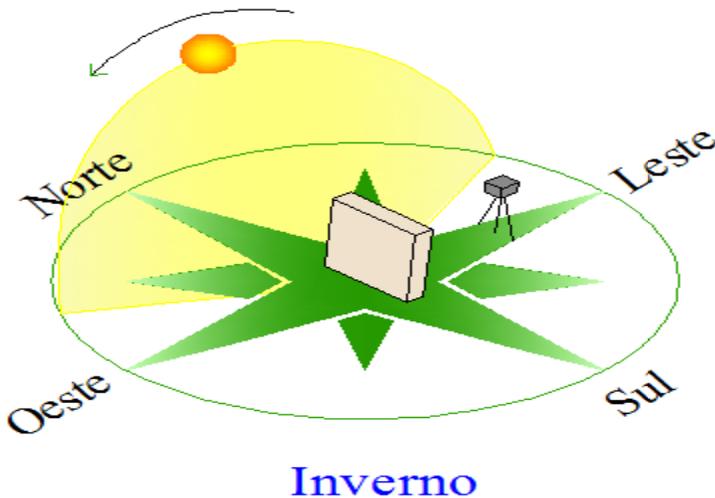
## 4.2. Ensaio 2 – LPI (leste, plena, inverno)

### 4.2.1. Considerações iniciais

O ensaio 02 ocorreu no dia 24 de junho de 2016, céu predominantemente sem nuvens, com temperatura média de 19°C. A umidade relativa do ar média foi de 65%, mas atingiu 91% no final do dia, como pode ser visto na Tabela 8.

Novamente, o painel foi posicionado de modo que a superfície revestida com cerâmica ficasse voltada para o leste. Desta forma, durante o período matutino, a câmera termográfica observou a superfície do mesmo lado do aquecimento (reflexão), e no período vespertino, a imagem foi obtida do lado oposto ao aquecimento (transmissão).

Figura 52 – Esquema de ensaio



Nota-se, pela Figura 52, que há uma variação grande da incidência solar nos painéis no inverno, quando comparado ao ensaio anterior, que ocorreu no verão.

Tabela 8 - Condições climáticas em 24 de junho de 2016

Horário	Insolação	Temperatura ambiente (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Umidade Relativa (%)
08h00min*	Plena	13,30	0,20	68,00
08h30min*	Plena	14,80	0,10	77,00
09h00min*	Plena	16,50	0,10	73,00
09h30min*	Plena	18,30	0,30	72,00
10h00min*	Plena	19,40	0,10	68,00
10h30min*	Plena	21,20	0,10	65,00
11h00min*	Plena	21,20	0,10	65,00
11h30min*	Plena	22,80	0,30	60,00
12h00min*	Plena	22,60	0,20	60,00
12h30min	Plena	22,30	0,10	62,00
13h00min	Plena	22,00	0,10	62,00
13h30min	Plena	23,10	0,00	56,00
14h00min	Plena	23,00	0,20	56,00
14h30min	Plena	22,90	0,30	59,00
15h00min	Plena	22,00	0,10	59,00
15h30min	Plena	19,70	0,20	66,00
16h00min	Plena	18,00	0,40	73,00
16h30min	Plena	16,40	0,60	77,00
17h00min	Plena	14,80	0,50	85,00
17h30min	Plena	13,00	0,60	90,00
18h00min	Plena	12,40	0,40	91,00

Melhores Delta-T's

\* Horários em que a radiação solar incidia diretamente sobre a superfície investigada

#### 4.2.2. Obtenção dos termogramas

Os termogramas obtidos ao longo do Ensaio 2 estão apresentados nas Figura 53 e Figura 67. Nota-se que, de uma maneira geral, a composição das imagens num clima mais frio é semelhante ao verificado no Ensaio 1, cuja temperatura ambiente era, em média, 15°C superior. A incidência solar direta sobre os painéis permitiu que os defeitos fossem visualizados logo nas primeiras imagens, em ambas as cores. Novamente, o painel branco requereu um aquecimento de 30 minutos para que o contraste térmico fosse mais evidenciado, no entanto, o perfil de temperatura apresentado na Figura 53c, as

08h00min, já apresenta um pico de elevação no gráfico, com *Delta-T* médio de +0,5°C.

Figura 53: LPI, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

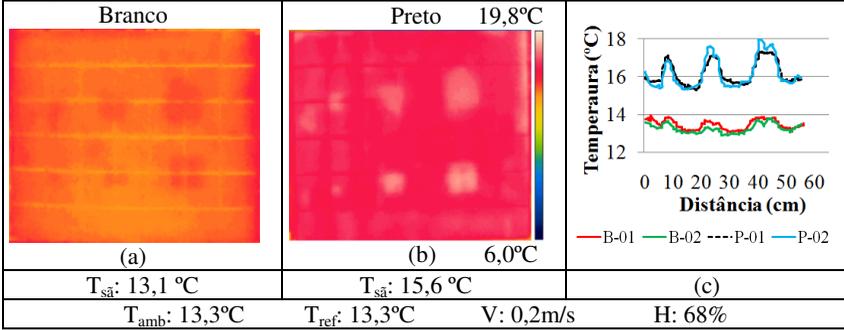


Figura 54: LPI, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

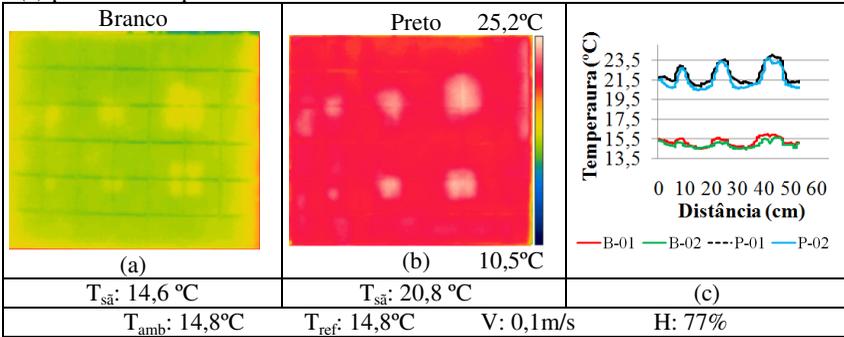


Figura 55: LPI, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

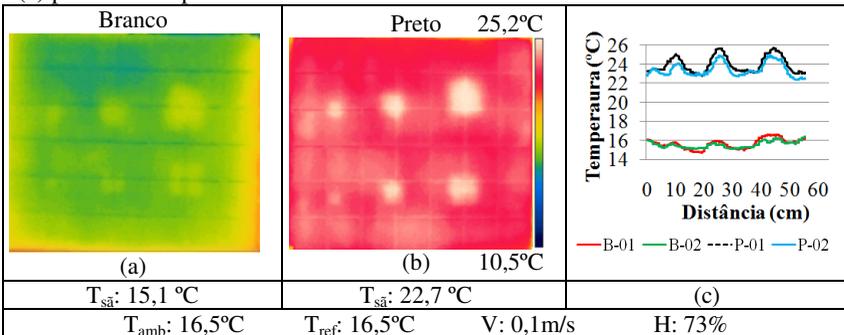


Figura 56: LPI, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

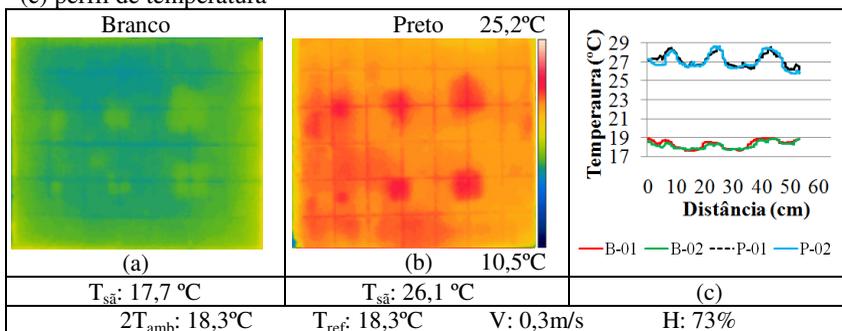


Figura 57: LPI, 10h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

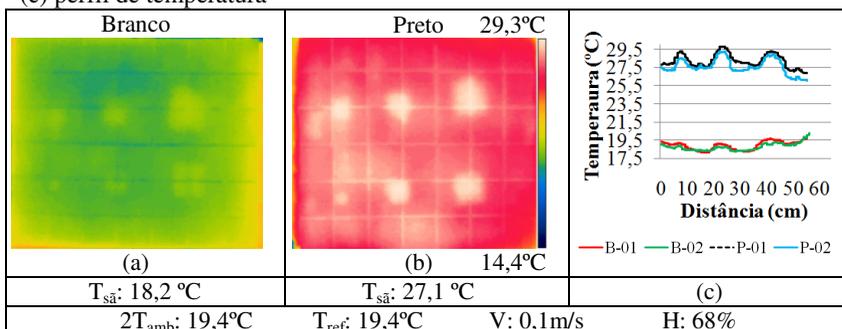


Figura 58: LPI, 10h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

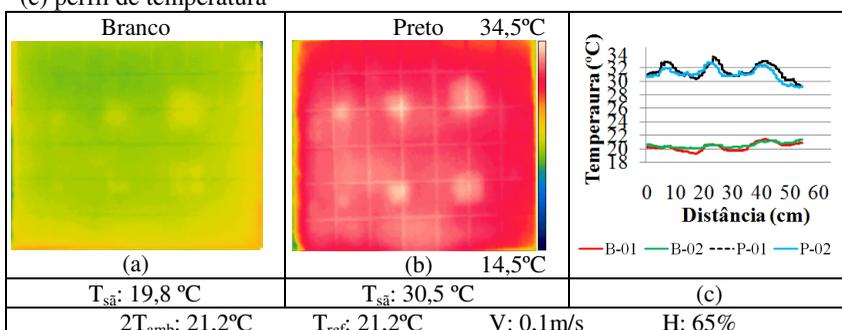


Figura 59: LPI, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

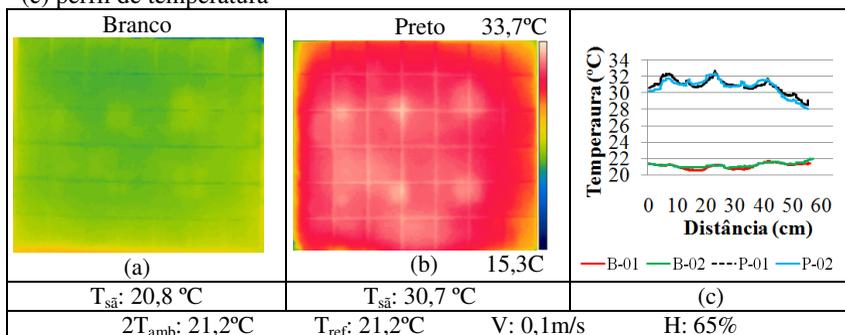


Figura 60: LPI, 11h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

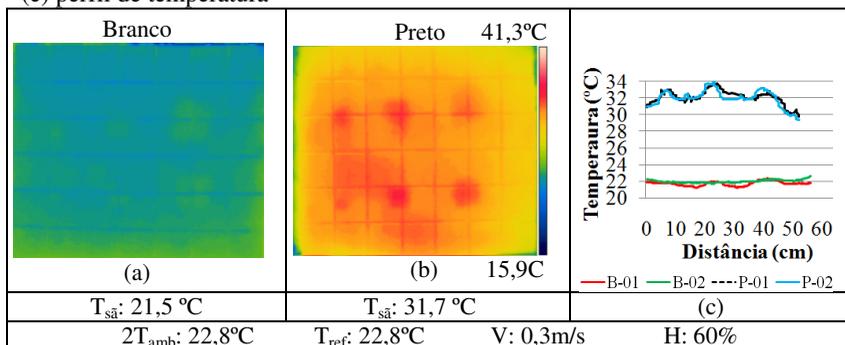


Figura 61: LPI, 12h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

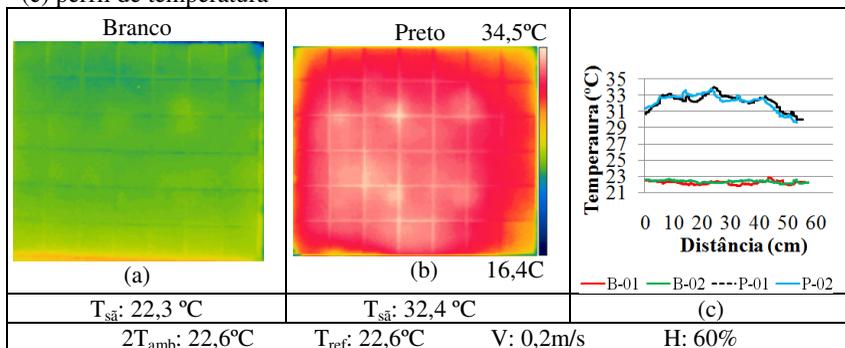
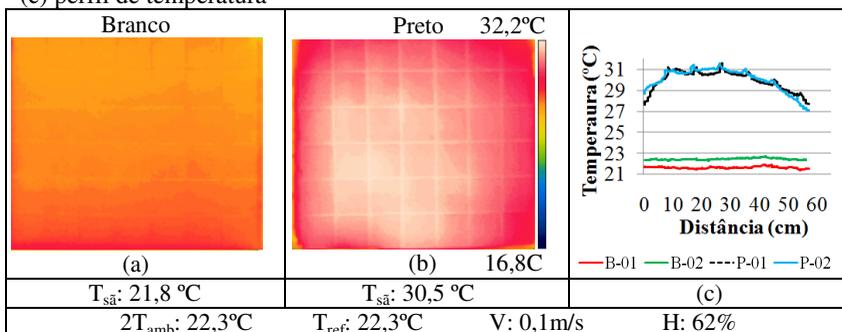


Figura 62: LPI, 12h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



Entre 11h30min e 16h00min os painéis entraram em equilíbrio térmico com o ambiente e as falhas não puderam mais ser visualizadas. Semelhantemente ao ocorrido no ensaio 1, verifica-se, por meio da Tabela 8, que a temperatura ambiente foi crescente até as 13h30min, e após esse horário, começou a cair gradativamente. No entanto, somente após as 16h00min é que esse resfriamento foi suficiente para que a câmera registrasse algum defeito.

Figura 63: LPI, 16h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

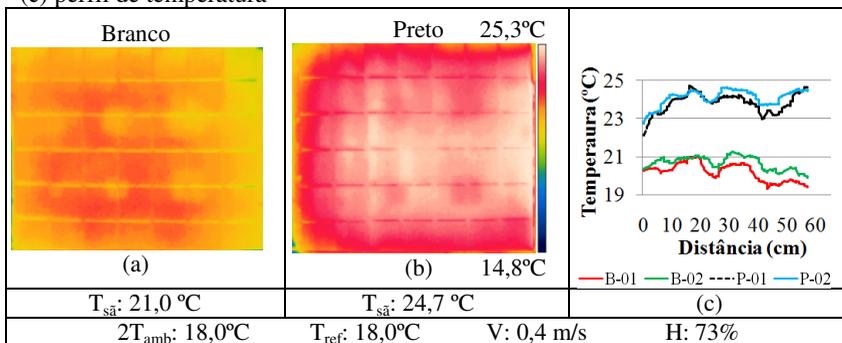


Figura 64: LPI, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

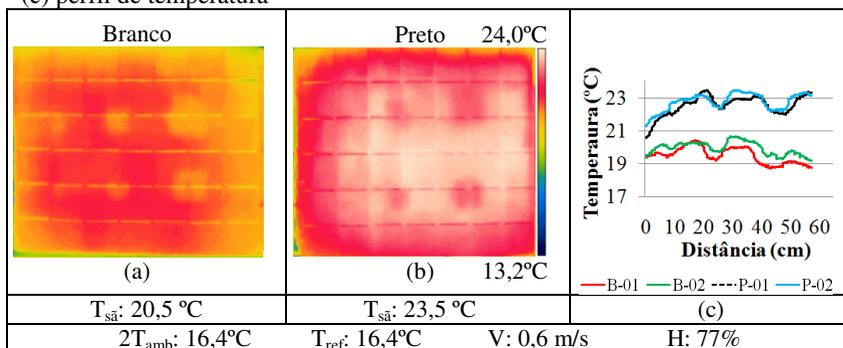


Figura 65: LPI, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

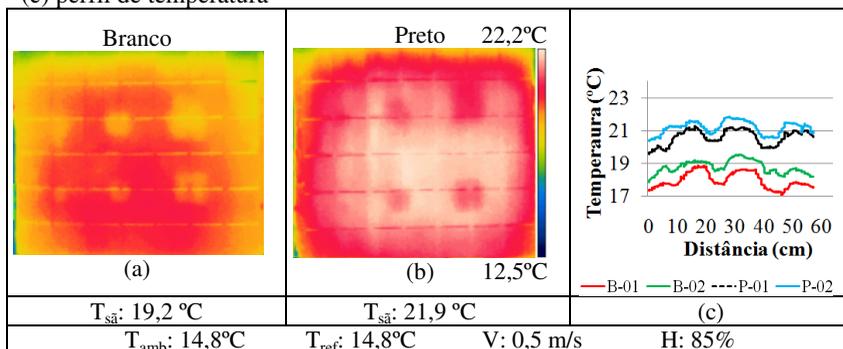


Figura 66: LPI, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

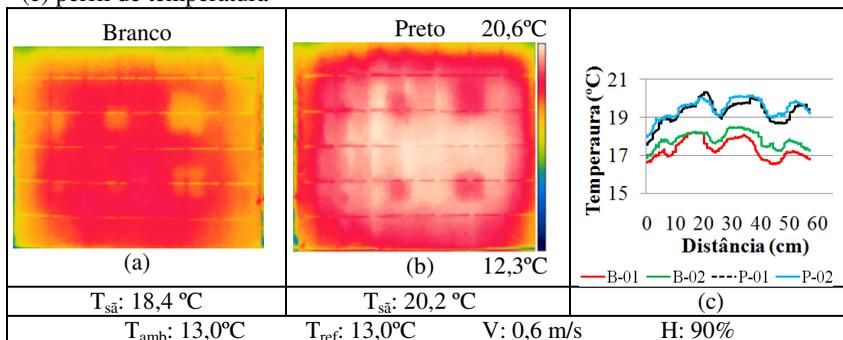
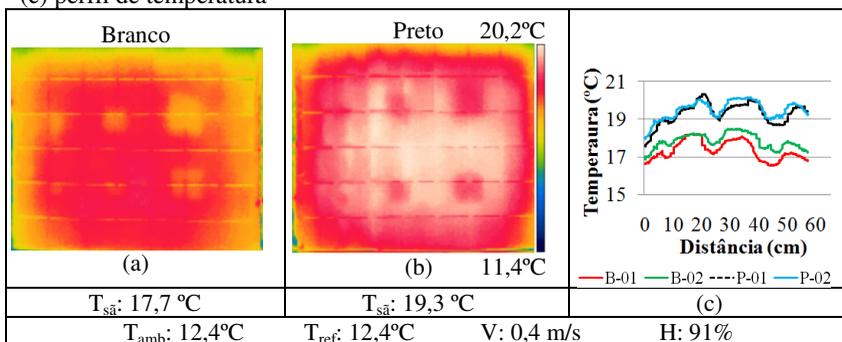


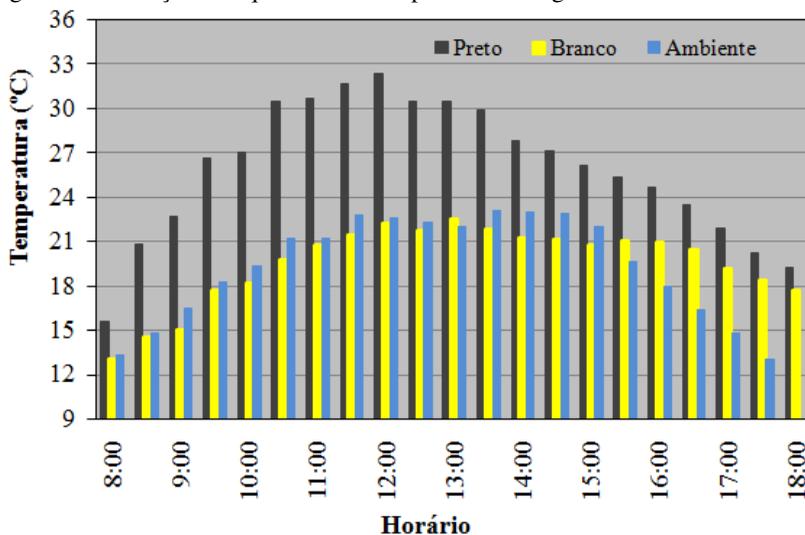
Figura 67: LPI, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



#### 4.2.3. Evolução do aquecimento dos painéis

A Figura 68 apresenta a evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia. Percebe-se que o painel preto absorve mais calor nas primeiras horas, mas no final do dia apresenta temperaturas semelhantes ao painel branco. As temperaturas do ambiente e da região são do painel branco apresentam um comportamento muito similar ao longo do dia.

Figura 68: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia

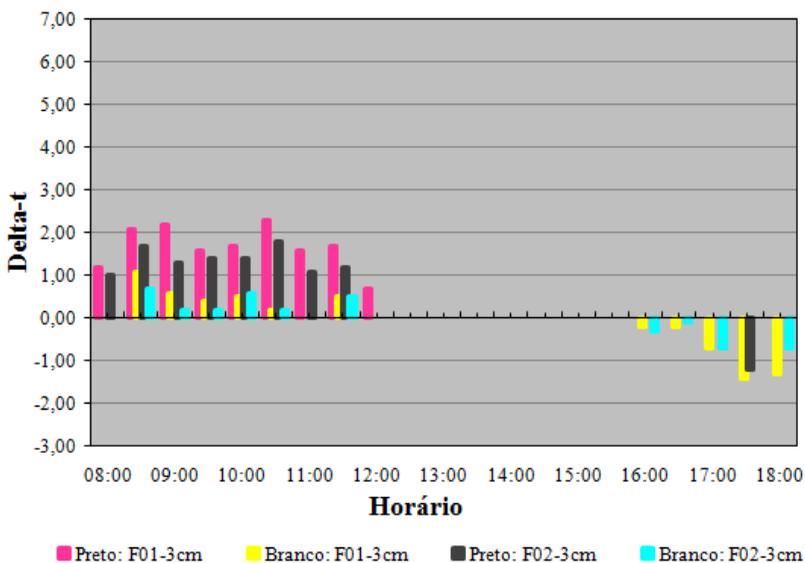


A detecção dos defeitos é avaliada nas Figura 69 e Figura 71, para os defeitos de 3, 6 e 9 cm respectivamente. A Figura 69 apresenta os defeitos de 3cm e o  $\Delta T$  representa a diferença de temperatura entre a região sã (centro do painel) e a região com defeito.

Comparando as primeiras imagens registradas (Figura 53 a Figura 67) com o gráfico da Figura 69, percebe-se que o contorno das falhas no painel preto é muito mais delineado do que no painel branco. De igual forma, a diferença de temperatura entre as regiões com e sem defeito também é bem mais pronunciada na cor escura.

Novamente, houve um intervalo de tempo em que o contraste não foi percebido, entre 12h00min e 16h00min, e após esse horário, nota-se que o resfriamento do painel das bordas para o centro prejudicou a análise, uma vez que os menores defeitos encontram-se nas laterais. Ainda que tenha sido possível registrar a diferença de temperatura entre a região com e sem defeito, principalmente no painel branco, percebe-se que isso ocorreu apenas porque já se sabia previamente onde estavam localizados os defeitos.

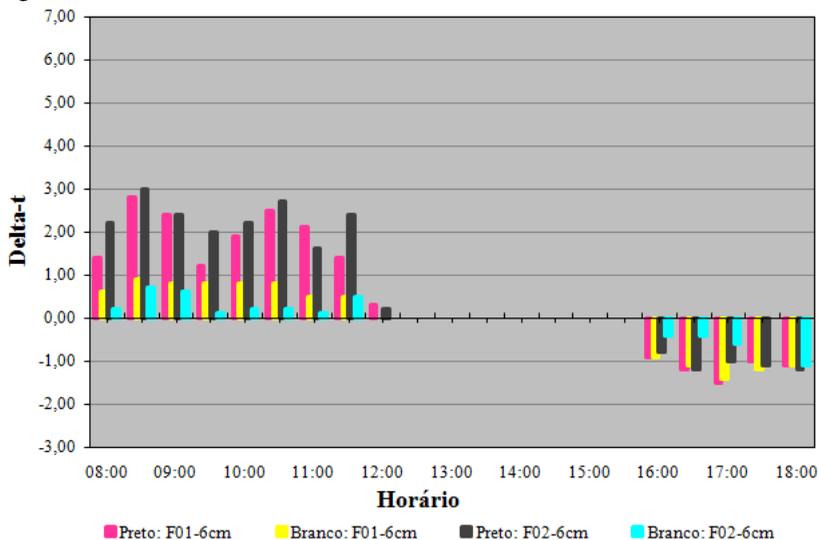
Figura 69:  $\Delta T$  – defeitos de 3cm



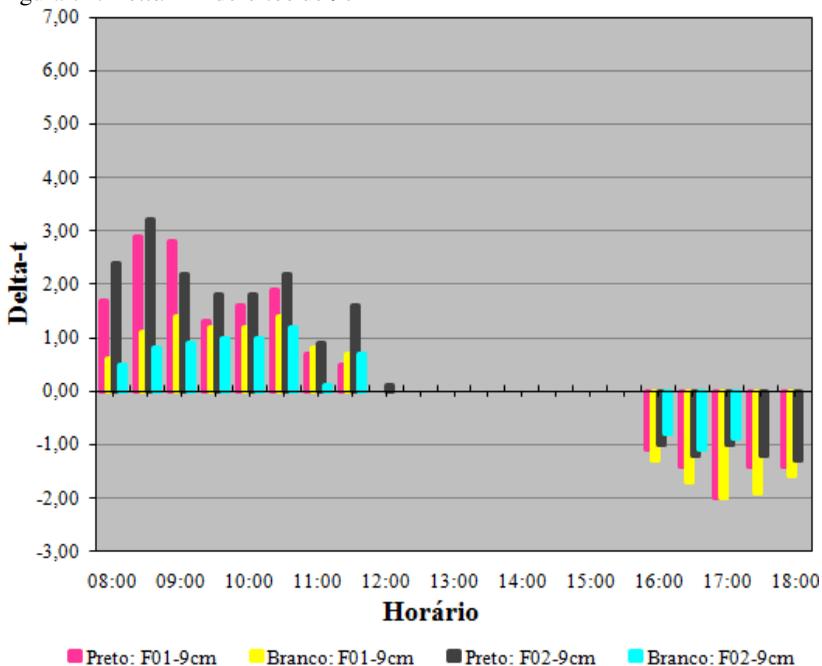
As Figura 70 e Figura 71 apresentam a variação do  $\Delta T$  para os defeitos de 6cm e 9cm, respectivamente. A média do  $\Delta T$  para os defeitos de 6cm no revestimento branco foi de +0,4°C entre 08h30min e

10h00min e de  $-0,80^{\circ}\text{C}$  a partir das 16h00min. No painel preto, a média foi de  $+2,0^{\circ}\text{C}$  entre 08h00min e 11h00min e  $-1,1^{\circ}\text{C}$  no final da tarde.

Figura 70: *Delta-T* – defeitos de 6cm

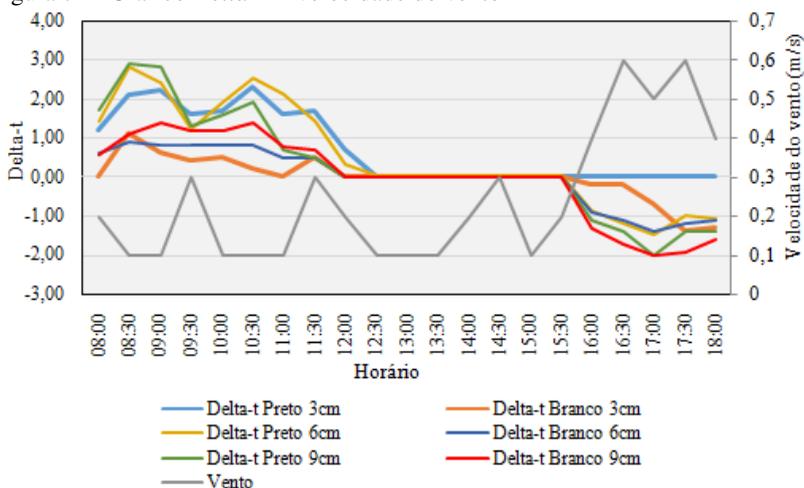


Os defeitos de 9cm apresentaram um *Delta-T* maior e, como já era esperado, foram visualizados com mais nitidez e por maior período de tempo, em ambas as cores. A média do *Delta-T* para os defeitos de 9cm no painel preto foi de  $+1,8^{\circ}\text{C}$  entre 08h00min e 11h30min e de  $-1,3^{\circ}\text{C}$  a partir das 16h00min. No painel branco, a média foi de  $+0,7^{\circ}\text{C}$  entre 08h30min e 11h00min e  $-1,1^{\circ}\text{C}$  no final da tarde.

Figura 71: *Delta-T* – defeitos de 9cm

#### 4.2.4. *Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos*

A Figura 72 apresenta a relação entre a velocidade do vento e o contraste térmico obtido nos termogramas ao longo do ensaio. Diferentemente do que foi observado no ensaio 1, não foi possível perceber uma relação entre a velocidade do vento e os contrastes registrados. Isso pode ser justificado pela pouca variação desse parâmetro ao longo do ensaio, e/ou também pelas baixas velocidades registradas (menores que 0,6m/s).

Figura 72 - Gráfico  $\Delta T$  x velocidade do vento

Sobre a umidade relativa do ar, a observação neste ensaio é semelhante ao ensaio 01. Os horários destacados em azul (Tabela 8) são os que apresentaram melhor contraste térmico (maior  $\Delta T$ ) e, novamente, se observa uma relação entre essas variáveis. Ou seja, quando a umidade relativa diminui, os contrastes ficam menos evidentes. Quando a umidade volta a aumentar, os defeitos voltam a ser detectados pela câmera.

#### 4.2.5. Conclusões gerais sobre o ensaio

As conclusões para o Ensaio 2 são muito semelhantes ao Ensaio 1. Observou-se que a absorvância solar dos revestimentos demonstra ter influência na fase de aquecimento das peças, quando a radiação incide diretamente sobre as superfícies investigadas. A cor preta absorve mais calor e apresenta um contraste térmico mais delineado.

A partir do momento em que as peças entram em equilíbrio térmico com o ambiente e também na fase de resfriamento, a cor não demonstrou tanta influência, uma vez que, tanto em termos qualitativos (visualização do defeito) quanto quantitativos ( $\Delta T$ ) os resultados foram semelhantes ao branco.

Em relação ao clima, percebe-se que mesmo sob temperaturas mais baixas, a câmera utilizada registrou diferenças de temperaturas que revelaram os defeitos de forma eficiente.

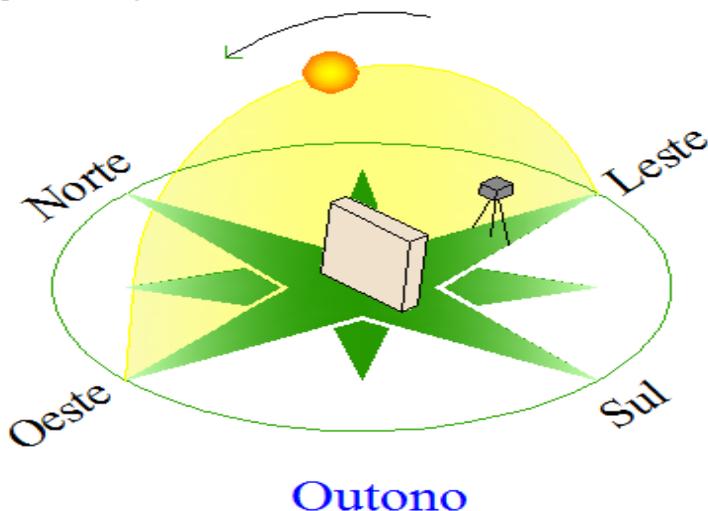
### 4.3. Ensaio 3 – LNO (leste, nublado, outono)

#### 4.3.1. Considerações iniciais

O ensaio 3 ocorreu no dia 19 de abril de 2016, entre 08h00min e 16h30min. Conforme pode ser observado na Tabela 9, entre 12h30min e 13h00min e após as 16h30min, o ensaio teve que ser interrompido por conta da chuva. Para que os painéis não molhassem, eles eram protegidos por uma lona, até que o ensaio pudesse ser retomado.

Nota-se que tanto a temperatura ambiente quanto a umidade relativa do ar estavam relativamente altas nesse dia.

Figura 73 – Esquema de ensaio



Ainda na posição leste, durante o período matutino, a câmera termográfica observou a superfície do mesmo lado do aquecimento (reflexão), e no período vespertino, a imagem foi obtida do lado oposto ao aquecimento (transmissão). Na estação outono, o sol nasce mais ao leste e se põe mais a oeste, conforme Figura 73.

Tabela 9 - Condições climáticas em 19 de abril de 2016

Horário	Insolação	Temperatura ambiente (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Umidade Relativa (%)
08h00min*	Plena	26,70	0,50	63,00
08h30min*	Plena	34,80	0,70	63,00
09h00min*	Nublado	30,40	0,50	60,00
09h30min*	Nublado	30,10	0,90	59,00
10h00min*	Nublado	34,10	0,70	51,00
10h30min*	Nublado	32,70	1,20	53,00
11h00min*	Nublado	33,70	1,70	51,00
11h30min*	Nublado	32,80	0,50	54,00
12h00min*	Nublado	34,10	1,30	48,00
12h30min	Chuva	33,80	1,10	75,00
13h00min	Chuva	28,90	1,50	75,00
13h30min	Nublado	25,10	1,70	71,00
14h00min	Nublado	26,90	1,40	46,00
14h30min	Nublado	27,30	2,50	47,00
15h00min	Nublado	26,40	1,00	52,00
15h30min	Nublado	26,40	2,10	53,00
16h00min	Nublado	26,20	3,10	61,00
16h30min	Nublado	25,80	2,80	65,00
17h00min	Chuva	25,50	2,50	72,00
17h30min	Chuva	25,00	2,00	70,00
18h00min	Chuva	24,80	1,50	72,00

Melhores Delta-T's

\* Horários em que a radiação solar incide diretamente sobre a superfície investigada

#### 4.3.2. Obtenção dos termogramas

As primeiras imagens térmicas devem ser analisadas com atenção, uma vez que não representam a condição de insolação nublada. No início da manhã, entre 08h00min e 08h30min, a radiação incide diretamente sobre os painéis, sem a presença de nuvens (Figura 74/Figura 75). Observa-se então que, nesses horários, o contraste térmico entre as regiões com e sem defeito permitiu visualizar as falhas com nitidez, principalmente no painel preto.

A partir das 09h00min o céu ficou completamente nublado, atendendo as condições propostas para este ensaio. Percebe-se, então, que não houve troca de calor suficiente para detectar qualquer defeito no

painel revestido de branco. No painel preto, até as 11h00min, apenas as falhas de 6cm e 9cm foram captadas, porém, nota-se um delineamento bem menos definido, em razão do pequeno  $\Delta T$ .

Figura 74: LNO, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

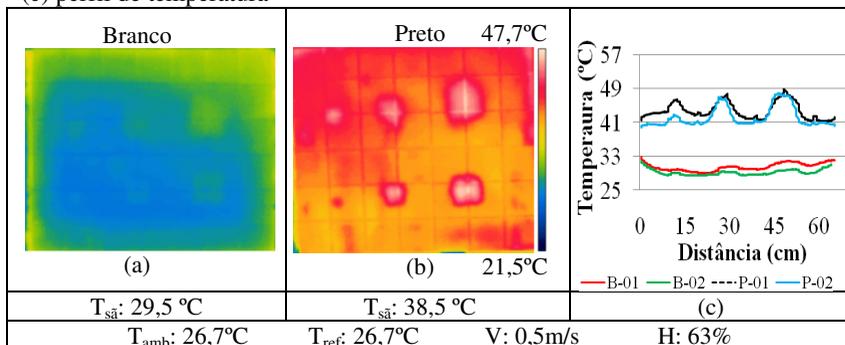


Figura 75: LNO, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

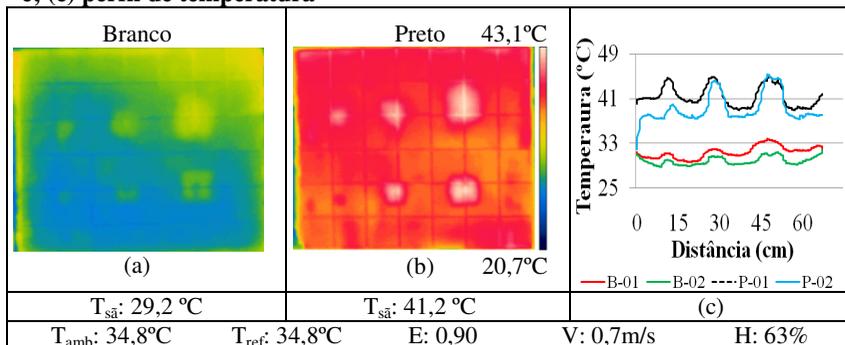


Figura 76: LNO, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

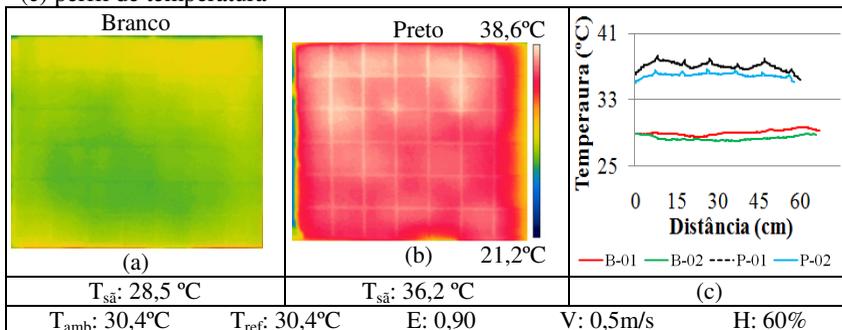


Figura 77: LNO, 09h30min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

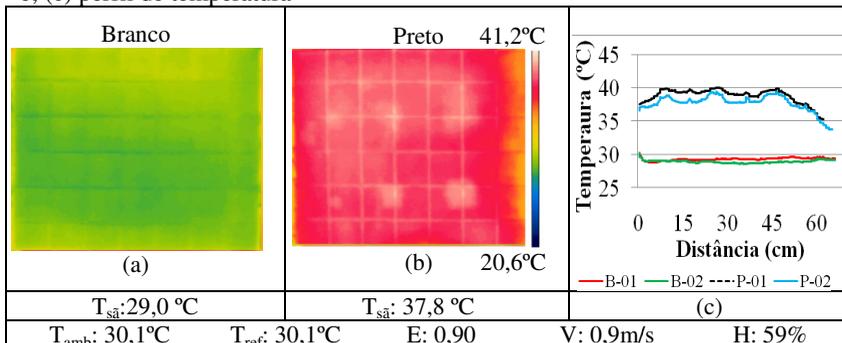


Figura 78: LNO, 10h00min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

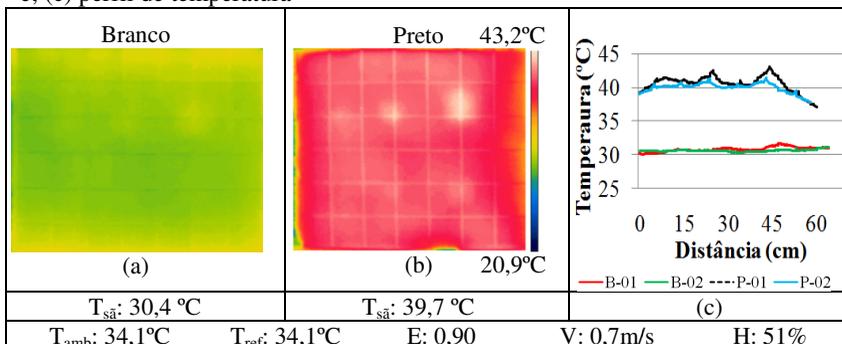


Figura 79: LNO, 10h30min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

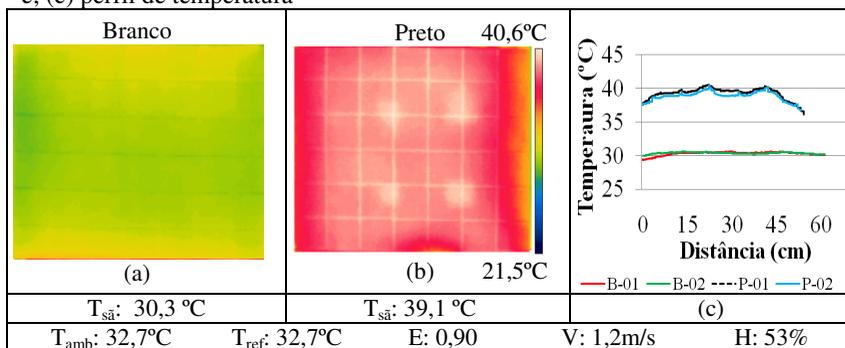


Figura 80: LNO, 11h00min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

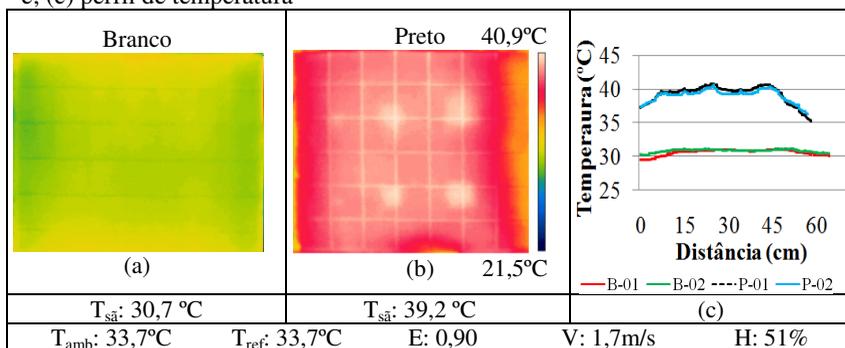
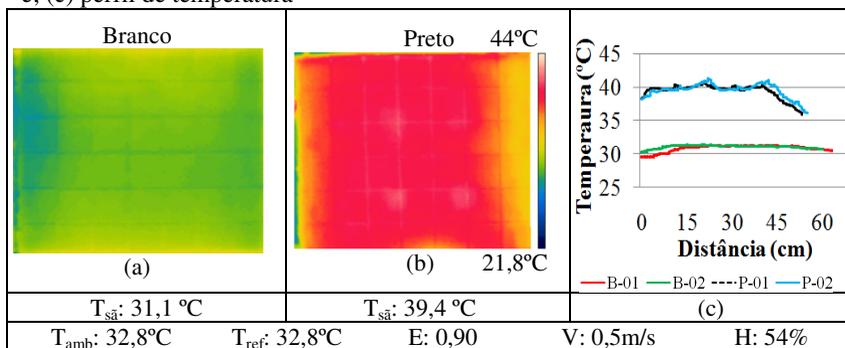


Figura 81: LNO, 11h30min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



Entre 11h30min e 15h30min as imagens apresentaram o mesmo comportamento da Figura 81. A partir das 16h00min, percebeu-se que o resfriamento dos painéis começou a ocorrer no sentido das bordas para o centro, o que dificultou a visualização do defeito de 3cm. Os defeitos maiores, de 6cm e 9cm, foram registrados em temperatura inferior à região sã.

Figura 82: LNO, 15h30min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

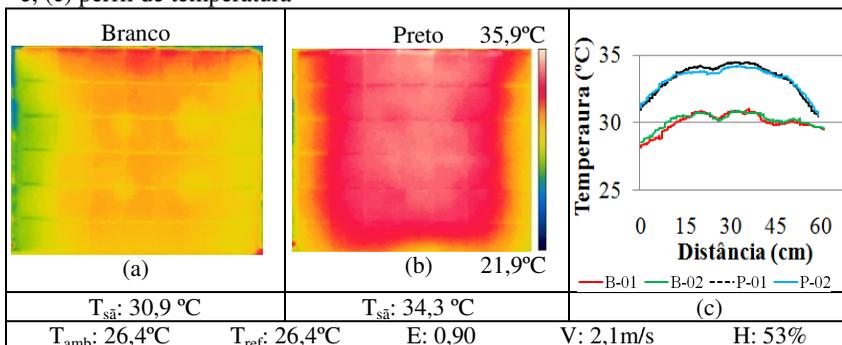


Figura 83: LNO, 16h00min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

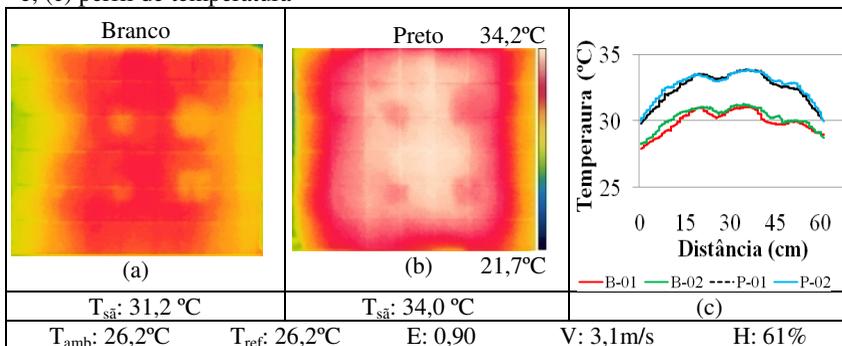
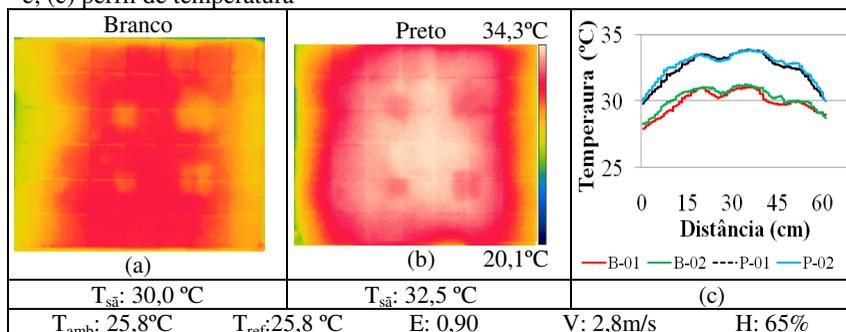


Figura 84: LNO, 16h30min h: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

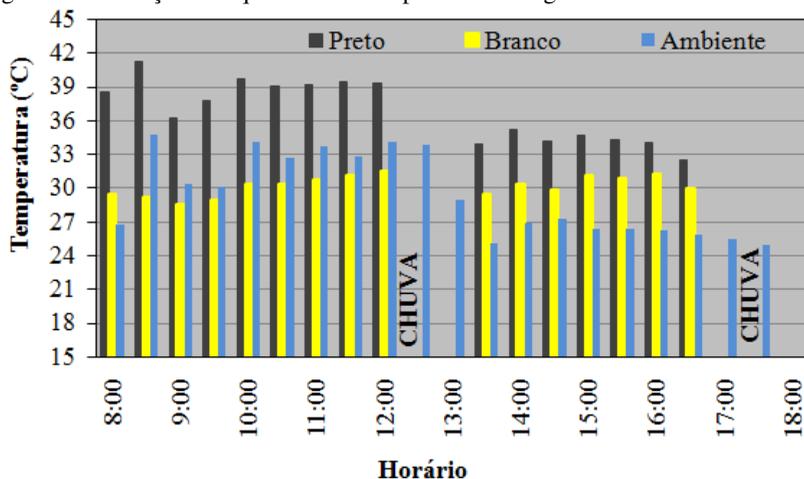


Conforme relatado, a partir das 16h30min o ensaio foi encerrado devido às condições meteorológicas desfavoráveis.

#### 4.3.3. Evolução do aquecimento dos painéis

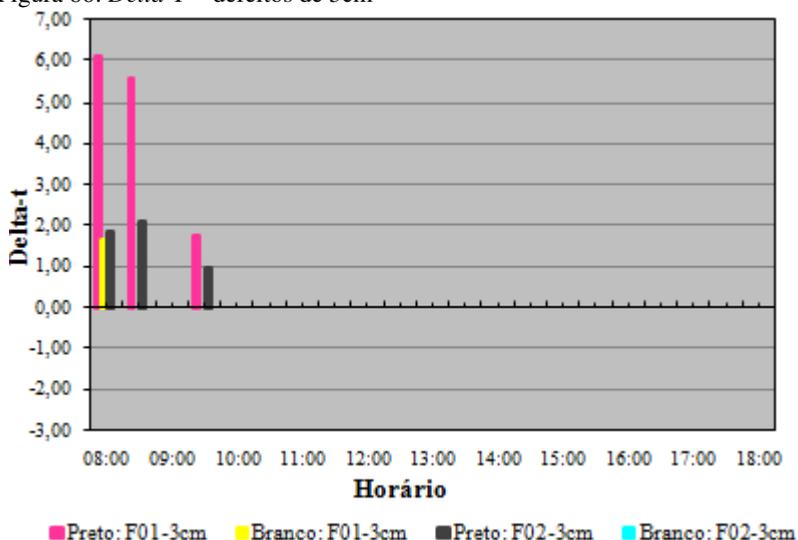
A Figura 85 apresenta a evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia. Percebe-se que, mesmo em um dia nublado, o aquecimento do revestimento preto ocorre de forma mais intensa que o branco, principalmente no período matutino.

Figura 85: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia



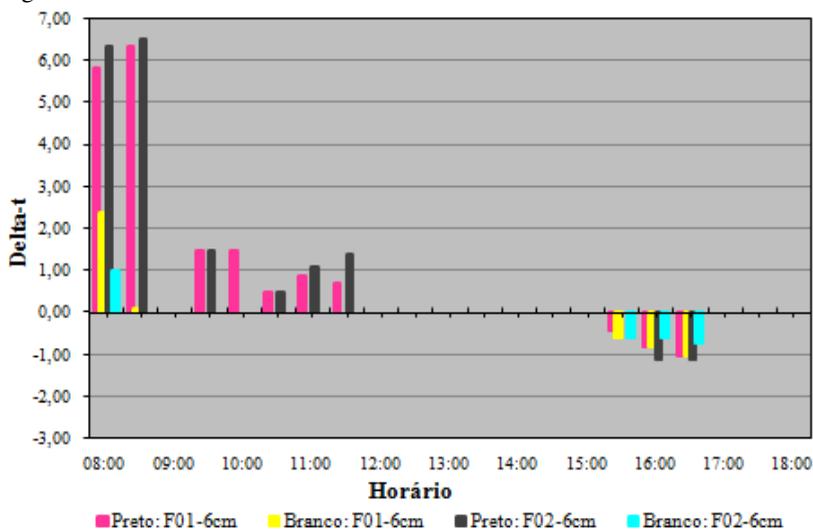
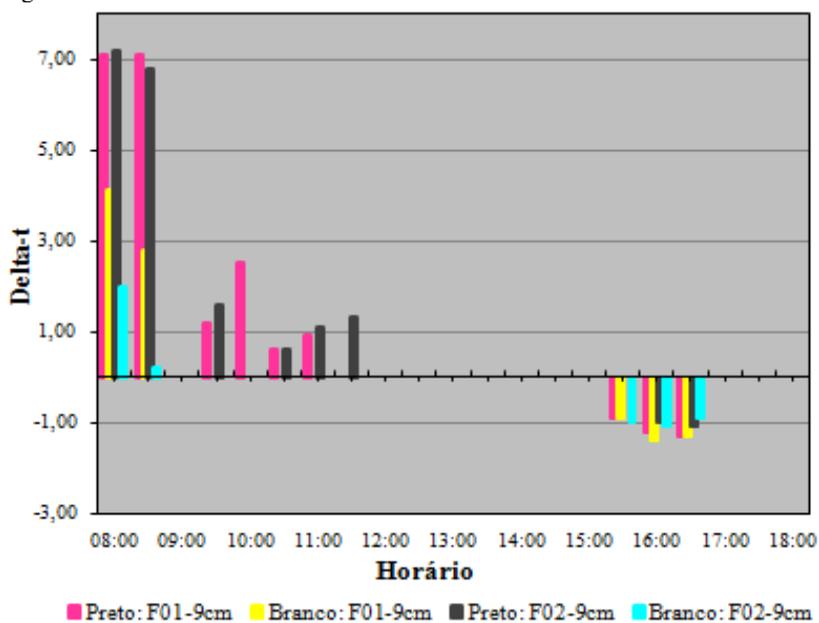
Analisando a Figura 86, que apresenta o  $\Delta T$  para os defeitos de 3cm, percebe-se que o menor defeito é percebido pela câmara apenas no início do ensaio, horário em que o céu estava aberto, sem nuvens, e com maior nitidez apenas no painel preto. A partir do momento em que o céu ficou nublado, não houve diferença de temperatura entre as regiões com e sem defeito. É importante ressaltar, novamente, que a dificuldade em registrar essa falha em outros horários pode ter ocorrido devido ao resfriamento das bordas do painel, e não pela falta de sensibilidade da câmara.

Figura 86:  $\Delta T$  – defeitos de 3cm



Em relação aos defeitos de 6 e 9cm, nota-se nas Figura 87 e Figura 88 que houve um contraste térmico muito menor entre as regiões com e sem defeito a partir do momento em que o céu ficou nublado, e apenas no painel preto.

O  $\Delta T$  médio no período compreendido entre 09h00min e 11h30min (após ficar nublado) foi de +1,1°C. O resfriamento das peças foi bastante intenso a partir das 15h30min e, embora tenha sido detectada uma pequena diferença de temperatura entre as regiões com e sem defeito a partir desse horário, os defeitos foram visualizados com contorno pouco definido.

Figura 87: *Delta-T* – defeitos de 6cmFigura 88: *Delta-T* – defeitos de 9cm

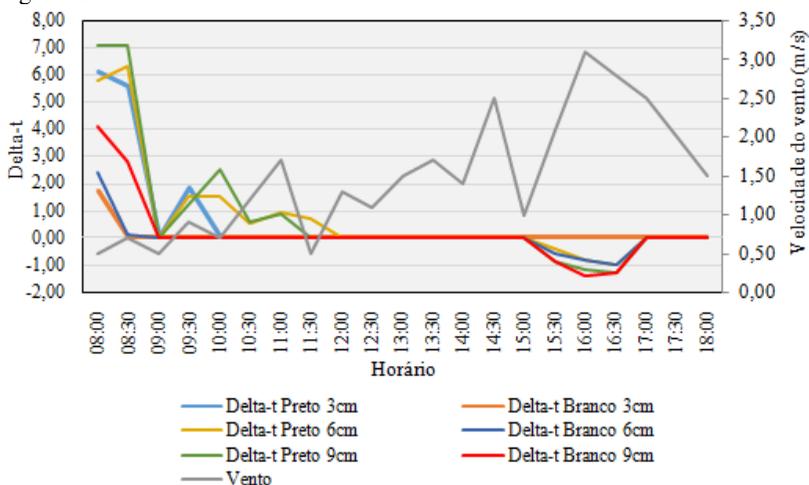
Para os defeitos de 6cm, o  $\Delta T$  médio a partir das 15h30min para os painéis branco e preto foram  $-0,8$  e  $-0,9^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Para os defeitos de 9cm, esse valor é de  $-1,1^{\circ}\text{C}$  para ambas as cores.

#### 4.3.4. *Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos*

A Figura 89 apresenta os valores de velocidade do vento e contraste térmico obtido nos termogramas ao longo do ensaio.

Considerando que o ensaio foi realizado em campo e, dessa forma, sujeito a muitas variáveis que não podem ser controladas, percebe-se o quão complicado pode ser querer avaliar um único parâmetro isoladamente. Tanto nesse ensaio, quanto nos demais que estão apresentados a seguir, não foi possível estabelecer uma relação entre os  $\Delta T$  e a velocidade do vento. Com isso, optou-se por não apresentar mais este gráfico.

Figura 89 – Gráfico  $\Delta T$  x velocidade do vento



Sobre a umidade relativa do ar, as considerações são as mesmas descritas nos ensaios 1 e 2.

#### 4.3.5. *Conclusões gerais sobre o ensaio*

De uma maneira geral, percebe-se uma dificuldade maior em utilizar o recurso da termografia infravermelha para diagnosticar

descolamentos em revestimentos quando o céu está nublado. Embora tenha sido possível detectar diferenças de temperatura entre as regiões com e sem defeito, percebe-se que isso ocorre com menos intensidade, em função do menor aquecimento das peças.

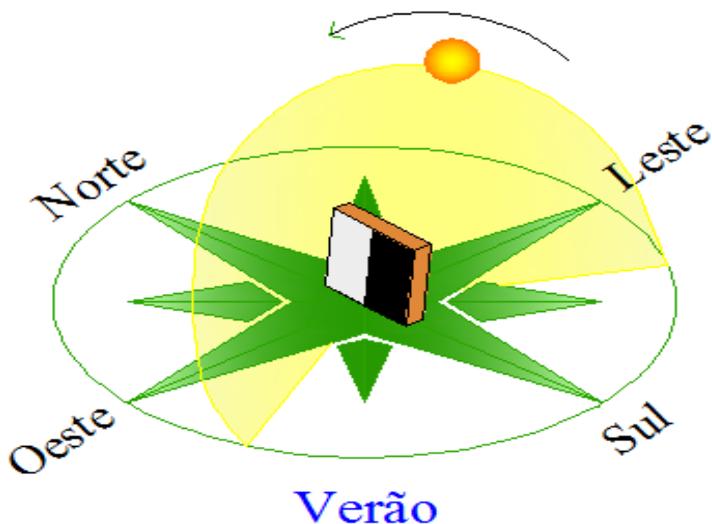
A pouca absorção de calor do painel branco mascarou a existência dos defeitos até as 16h00min. Isso significa que foram necessárias 8 horas de exposição do revestimento para que houvesse uma troca de calor significativa que permitisse a detecção da falha. No entanto, no final do dia, percebe-se que os *Delta-Ts* são praticamente iguais para ambas as cores.

#### 4.4. Ensaio 4 - OPV (oeste, plena, verão)

##### 4.4.1. Considerações iniciais

O ensaio ocorreu no dia 06 de março de 2016, céu predominantemente sem nuvens, com temperatura ambiente em torno de 37°C e umidade relativa do ar média de 45%. Os painéis foram posicionados com a superfície revestida voltada para o oeste, conforme Figura 90. Desta forma, durante o período matutino, a câmera termográfica observou a superfície do lado oposto ao aquecimento (transmissão) e à tarde, a imagem foi obtida do mesmo lado do aquecimento (reflexão).

Figura 90 – Esquema de ensaio



A Tabela 10 apresenta as condições climáticas registradas no dia do ensaio.

Tabela 10 - Condições climáticas em 06 de março de 2016

Horário	Insoleção	Temperatura ambiente (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Umidade Relativa (%)
08h00min	Plena	24,00	0,50	72,00
08h30min	Plena	24,70	0,50	71,00
09h00min	Plena	26,20	0,10	62,00
09h30min	Plena	27,30	0,50	53,00
10h00min	Plena	27,30	0,70	47,00
10h30min	Plena	27,60	0,70	49,00
11h00min	Plena	37,60	1,00	39,00
11h30min	Plena	39,40	1,60	43,00
12h00min*	Plena	37,70	1,00	45,00
12h30min*	Plena	41,30	1,00	39,00
13h00min*	Plena	41,30	1,60	43,00
13h30min*	Plena	36,00	1,00	50,00
14h00min*	Plena	38,10	1,10	47,00
14h30min*	Plena	39,60	0,70	40,00
15h00min*	Plena	36,90	0,80	44,00
15h30min*	Plena	40,20	1,00	37,00
16h00min*	Plena	40,00	0,70	37,00
16h30min*	Plena	35,50	0,80	44,00
17h00min*	Plena	34,80	1,60	46,00
17h30min*	Plena	30,50	1,00	56,00
18h00min*	Plena	28,10	2,00	68,00

Melhores Delta-T's

\* Horários em que a radiação solar incidia diretamente sobre a superfície investigada

#### 4.4.2. Obtenção dos termogramas

As imagens térmicas foram obtidas entre 08h00min e 18h00min, porém, por um problema técnico ocorrido com a câmera neste dia, somente foi possível reproduzir àquelas registradas a partir das 11h00min. No entanto, embora tenha ocorrido esse contratempo ao transferir as fotos para o computador, foi possível observar na tela da câmera que os primeiros termogramas apresentaram o seguinte comportamento: a) não houve contraste térmico entre as regiões com e sem defeito no painel de cor branca; b) os defeitos de 6 e 9cm foram detectados no painel preto entre 08h00min e 09h30min.

A partir das 10h00min, as imagens foram semelhantes à Figura 91, ou seja, ambos os painéis entraram em equilíbrio térmico, inviabilizando a detecção das falhas. Isso se repetiu até as 14h00min (Figura 92), onde os defeitos voltaram a ser visualizados, porém com um contorno pouco delineado em ambas as cores.

Figura 91: OPV, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

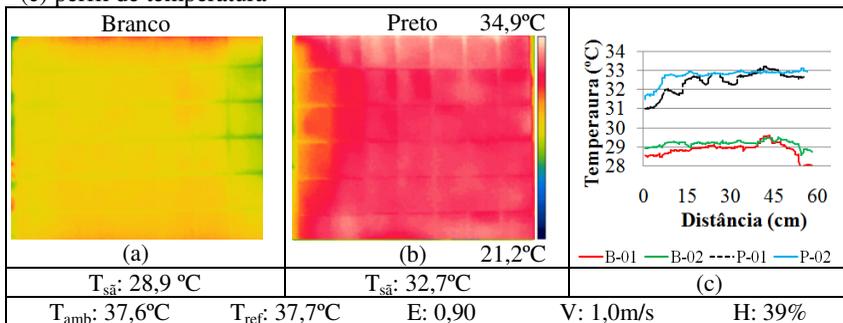


Figura 92: OPV, 14h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

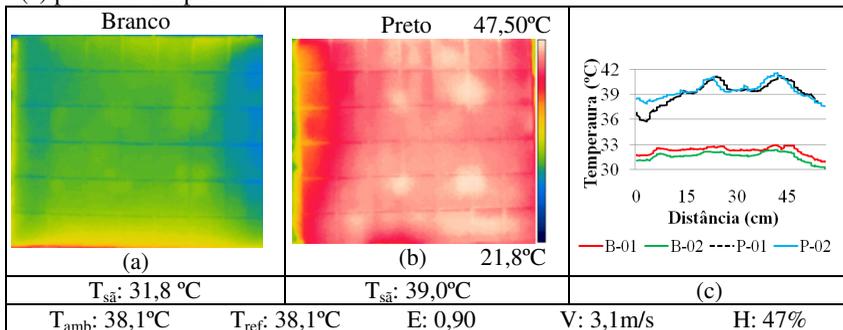
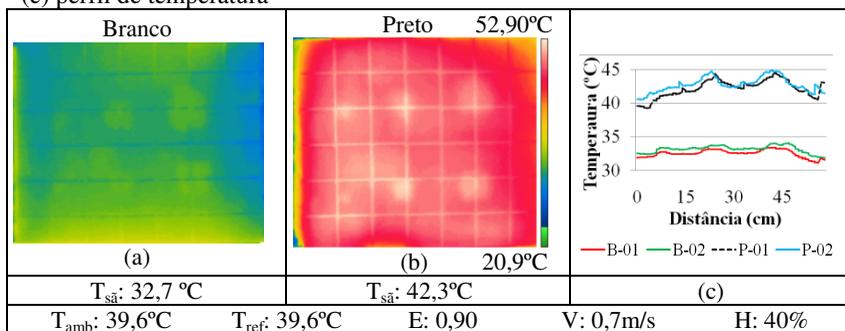


Figura 93: OPV, 14h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



As imagens permaneceram com o comportamento da Figura 93 até as 17h00min. Ou seja, pouco contraste térmico entre as regiões com e sem defeito no painel branco, e um  $\Delta T$  maior no preto. Os defeitos de 3cm não foram visualizados durante todo o ensaio. A temperatura nos painéis foi crescente até as 17h00min, tanto na região sã quanto na região com falha.

Figura 94: OPV, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

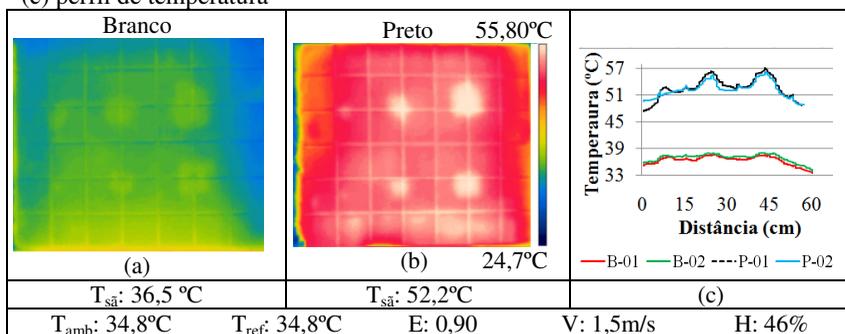


Figura 95: OPV, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

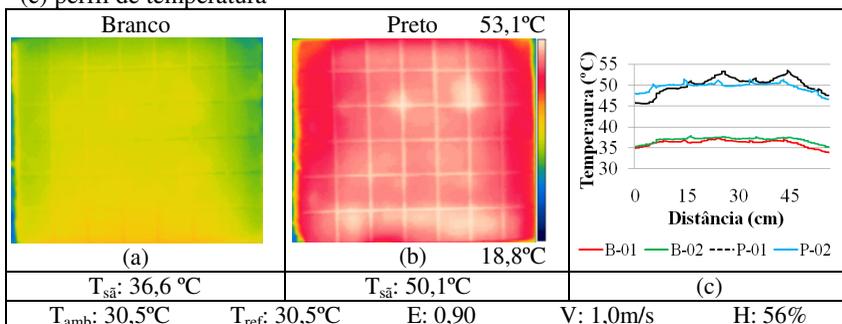
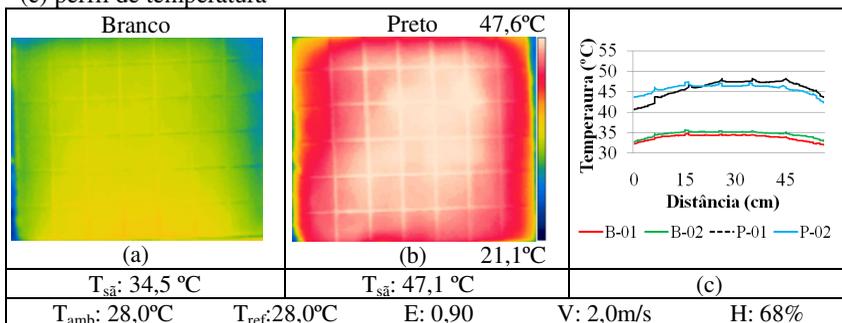


Figura 96: OPV, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



#### 4.4.3. Evolução do aquecimento dos painéis

A Figura 97 apresenta a evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia. Percebe-se que foi um dia com temperaturas muito altas, principalmente entre 11h00min e 16h00min. Mesmo assim, nota-se que o painel branco permaneceu em temperatura inferior a do ambiente até as 16h00min, enquanto o preto atingiu picos de 55°C.

Os  $\Delta T_s$  de 3cm não serão apresentados pois não foram detectados praticamente durante todo o ensaio. As regiões com defeito apresentaram temperaturas mais altas que as zonas sãs até as 17h30min, para as duas cores. O  $\Delta T$  médio para o defeito de 6cm no preto foi +2°C e, no branco, em média +0,4°C. Para o defeito de 9cm, esse valor sobe para +2,5°C no preto e +0,8°C no branco.

Figura 97 - Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia

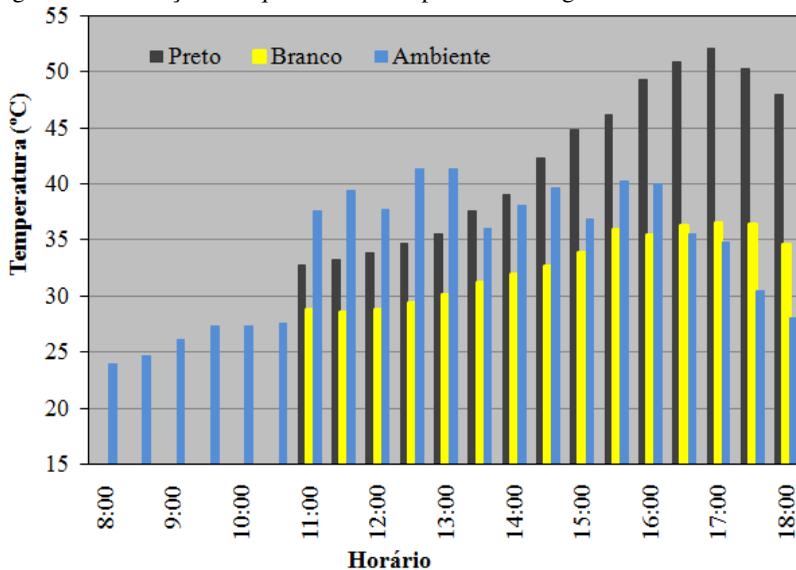


Figura 98:  $\Delta T$  – defeitos de 6cm

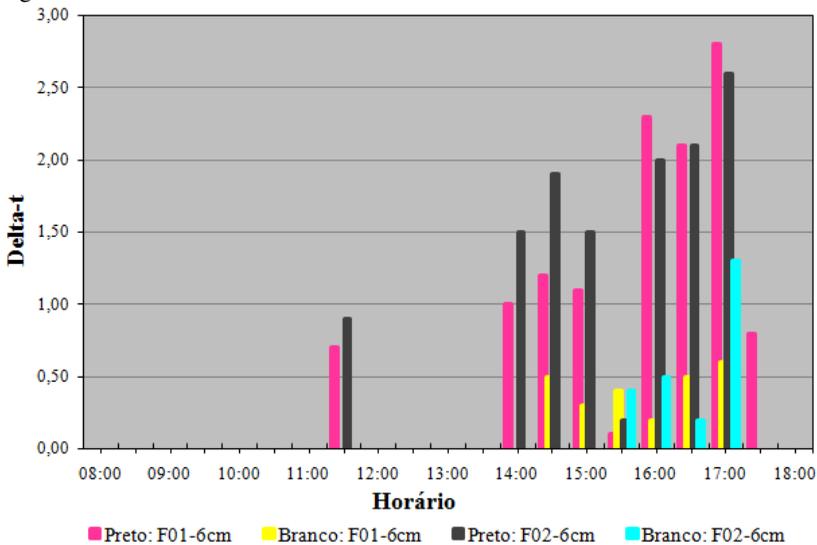
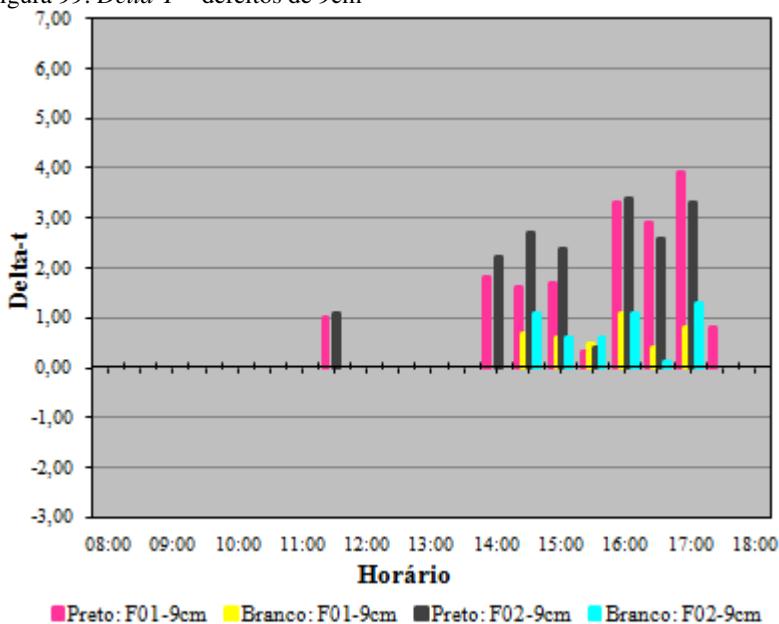


Figura 99: *Delta-T* – defeitos de 9cm

#### 4.4.4. *Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos*

Conforme já descrito no ensaio anterior, não foi possível estabelecer uma relação entre os *Delta-T*'s e a velocidade do vento.

Sobre a umidade relativa do ar, as conclusões para este ensaio foram diferentes dos ensaios anteriores, uma vez que os *Delta-T*'s foram percebidos em horários cuja umidade relativa registrada estava abaixo de 50%. Este fato reforça a análise anterior sobre o quanto pode ser complicado conseguir explicar a relação de apenas uma variável com o *Delta-T*, já que vários outros aspectos também podem influenciar nos resultados.

#### 4.4.5. *Conclusões gerais sobre o ensaio*

No geral, quando a temperatura começa a diminuir, os painéis começam a perder calor, e em função da resistência térmica, os defeitos aparecem como pontos mais frios nos gráficos. Para o ensaio em questão, percebeu-se que, como a temperatura ambiente começou a cair

apenas a partir das 16h00min, esse fenômeno não chegou a ser observado.

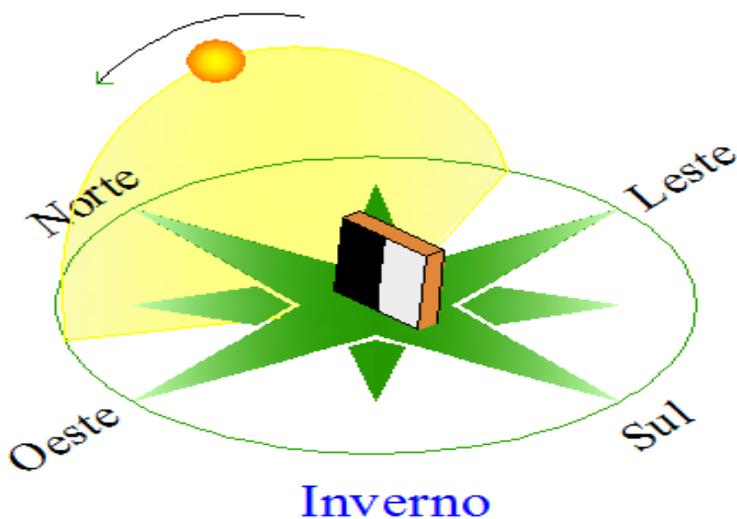
O aquecimento no painel branco foi bem desuniforme, apresentando um contraste térmico bem menos definido do que no preto. Na maioria dos casos, foi possível registrar o *Delta-T* porque já se sabia previamente onde estavam localizadas as falhas, e não pela nitidez ou contorno da falha.

#### 4.5. Ensaio 5 – OPI (Oeste, plena, inverno)

##### 4.5.1. Considerações iniciais

Para a execução deste ensaio, os painéis foram posicionados com a superfície revestida voltada para o oeste. Sendo assim, durante o período matutino, a imagem foi obtida do lado oposto ao aquecimento (transmissão), e no período vespertino, a câmera observou a superfície do mesmo lado do aquecimento (reflexão). O ensaio 5 ocorreu no dia 21 de junho de 2016, céu predominantemente sem nuvens, com temperatura média de 18°C.

Figura 100 – Esquema de ensaio



Observa-se na Figura 100 que, no inverno, além de o sol estar mais longe da superfície da terra nessa época do ano, ele também irradia por menos tempo, pois nasce e se põe mais ao norte. Aliado a isso, as temperaturas no dia do ensaio estavam muito baixas, bem como a umidade relativa do ar, conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Condições climáticas em 21 de junho de 2016

Horário	Insolação	Temperatura ambiente (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Umidade Relativa (%)
08h00min	Plena	8,60	0,4	67,0
08h30min	Plena	9,30	0,2	65,0
09h00min	Plena	13,6	0,5	65,0
09h30min	Plena	15,9	0,5	50,0
10h00min	Plena	19,5	0,4	41,0
10h30min	Plena	23,1	0,1	38,0
11h00min	Plena	23,4	0,4	34,0
11h30min	Plena	23,8	0,1	34,0
12h00min*	Plena	24,1	0,2	31,0
12h30min*	Plena	24,8	0,1	32,0
13h00min*	Plena	25,1	0,0	28,0
13h30min*	Plena	25,1	0,3	27,0
14h00min*	Plena	24,7	0,4	29,0
14h30min*	Plena	23,5	0,5	34,0
15h00min*	Plena	21,5	0,4	36,0
15h30min*	Plena	19,8	0,2	40,0
16h00min*	Plena	17,3	0,4	45,0
16h30min*	Plena	12,8	0,1	52,0
17h00min*	Plena	9,50	0,2	61,0
17h30min*	Plena	6,60	0,2	72,0
18h00min*	Plena	5,50	0,4	75,0

Melhores Delta-T's

\* Horários em que a radiação solar incidia diretamente sobre a superfície investigada

#### 4.5.2. Obtenção dos termogramas

Os termogramas obtidos ao longo do Ensaio 5 estão apresentados nas Figura 101 Figura 111. Observa-se que houve muita dificuldade em registrar algum defeito nesse dia, mesmo no painel preto. Embora a temperatura tenha sido crescente até as 13h30min, a câmera não conseguiu captar nenhum contraste térmico entre as regiões com e sem defeito. As imagens permaneceram semelhantes à Figura 107 até as 16h30min e, portanto, não foram apresentadas.

Figura 101: OPI, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

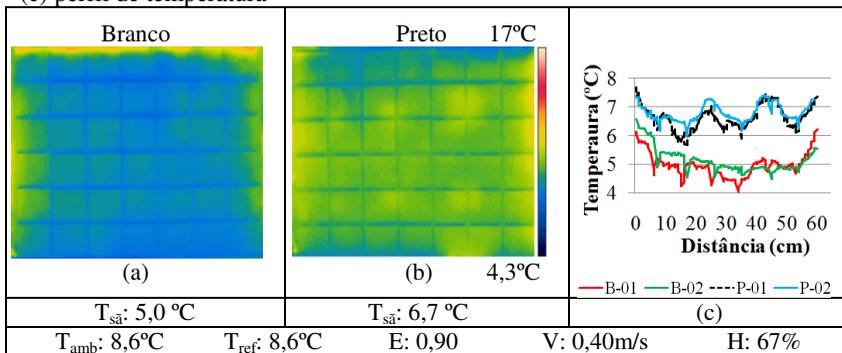


Figura 102: OPI, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

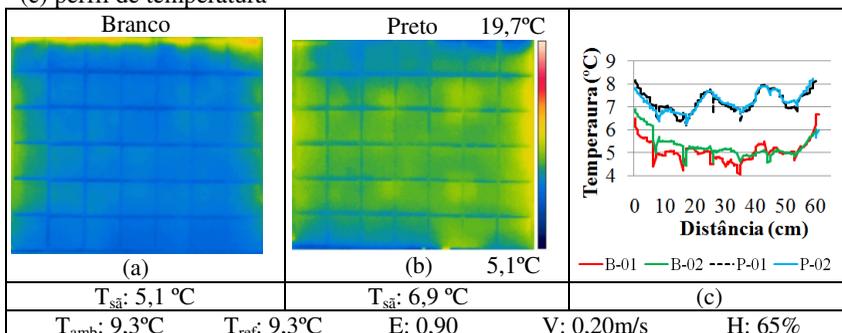


Figura 103: OPI, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

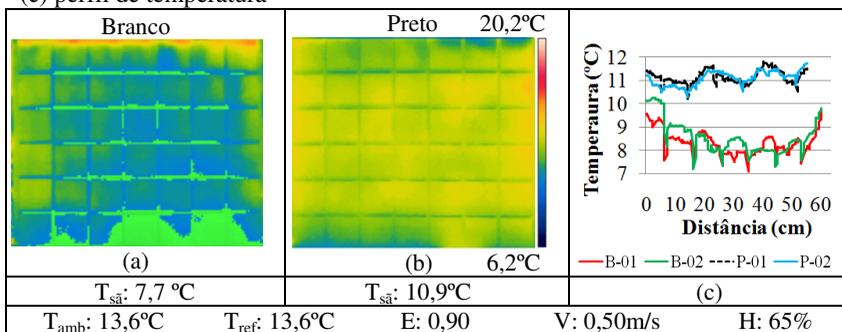


Figura 104: OPI, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

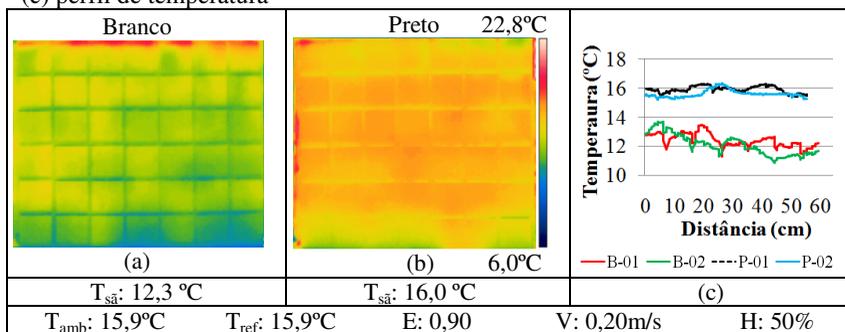


Figura 105: OPI, 10h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

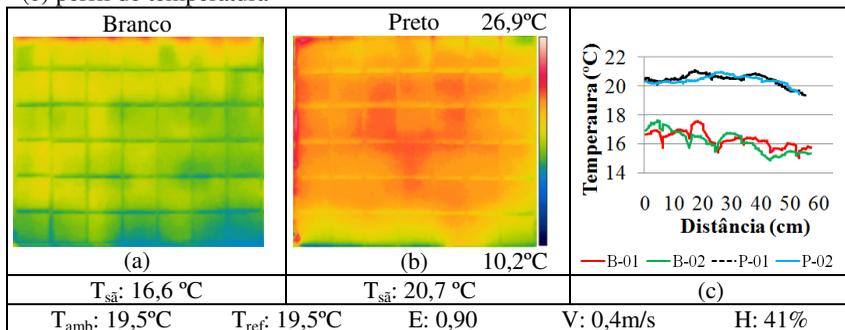


Figura 106: OPI, 10h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

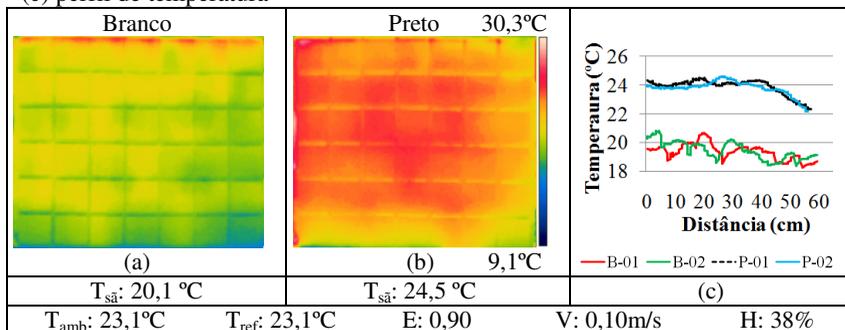
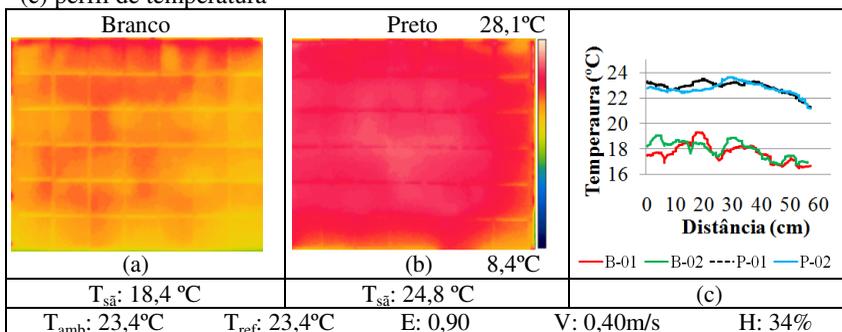


Figura 107: OPI, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



As imagens permaneceram semelhantes à Figura 107 até as 16h30min.

Figura 108: OPI, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

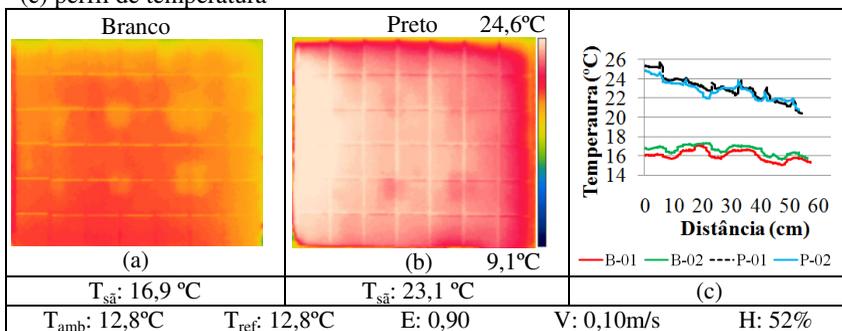


Figura 109: OPI, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

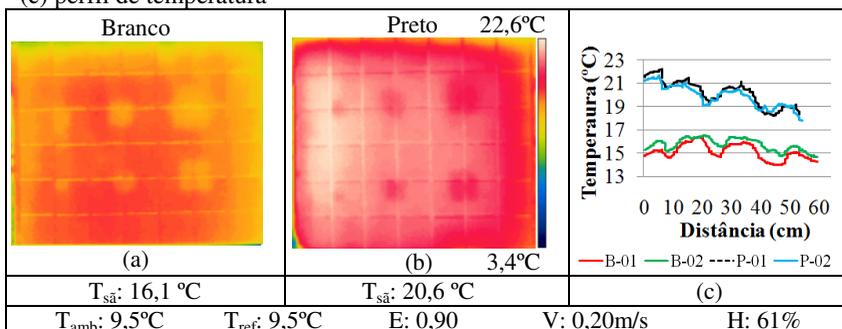


Figura 110: OPI, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

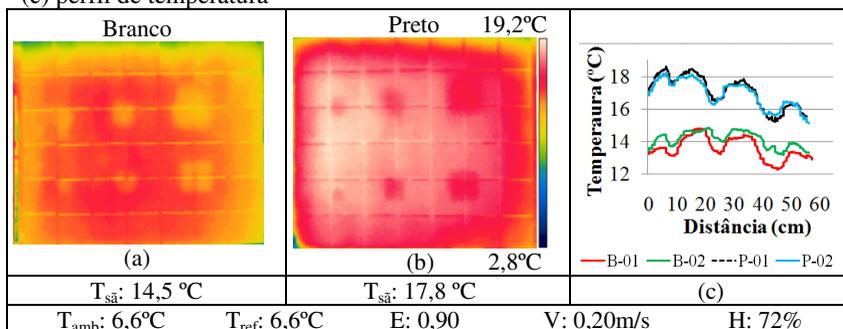
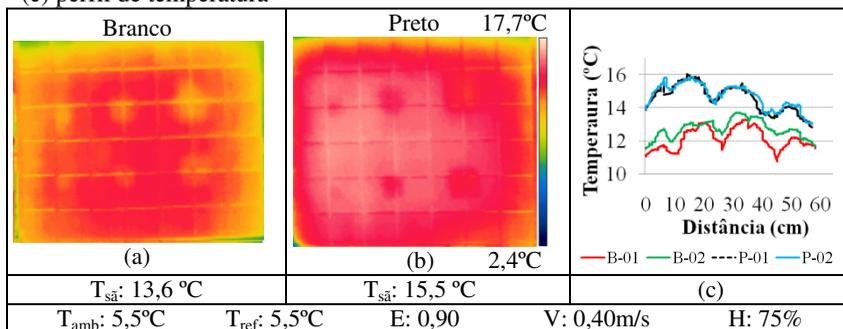


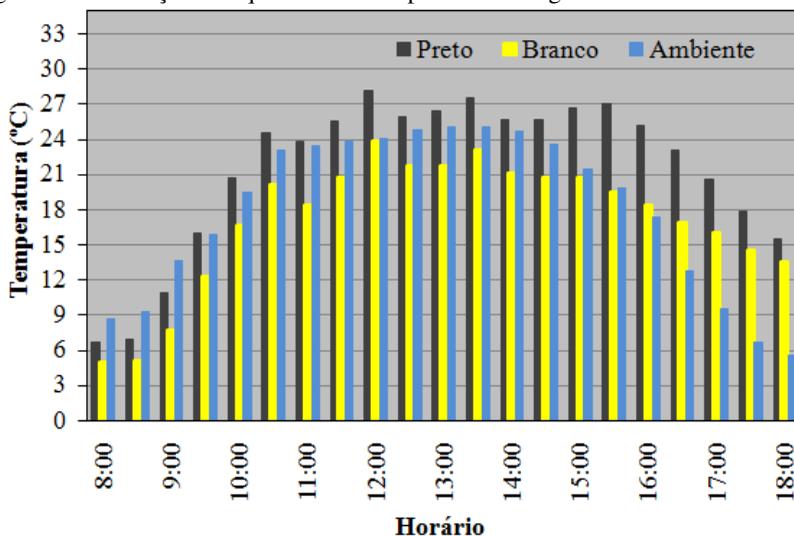
Figura 111: OPI, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



#### 4.5.3. Evolução do aquecimento dos painéis

A Figura 112 apresenta a evolução do aquecimento dos painéis e da temperatura ambiente do longo do ensaio. Percebe-se que, diferente do que foi observado nos ensaios anteriores, o painel preto foi ganhando calor em velocidade muito menor, levando cerca de 2 horas para atingir temperatura superior a do ambiente. No entanto, esse ganho de calor não foi suficiente para que a câmara termográfica identificasse algum defeito.

Figura 112: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia



Observando as Figura 113 e Figura 115, onde estão apresentados os *Delta-Ts* dos defeitos de 3, 6 e 9cm, percebe-se que apenas no final do dia a câmera termográfica conseguiu captar as falhas, que se apresentaram com temperatura inferior à região sã.

Comparando os *Delta-Ts* das cores, percebe-se que o defeito de 3cm foi mais delineado no painel branco. No entanto, isso parece ter ocorrido em função do mesmo estar localizado mais à esquerda, recebendo maior insolação que o preto (Figura 100).

Em relação aos defeitos de 6 e 9cm, os contrastes foram semelhantes para ambas as cores:  $-0,95^{\circ}\text{C}$  no branco e  $-1,18^{\circ}\text{C}$  no preto (6cm) e  $-1,60^{\circ}\text{C}$  no branco e  $-1,90^{\circ}\text{C}$  no preto (9cm).

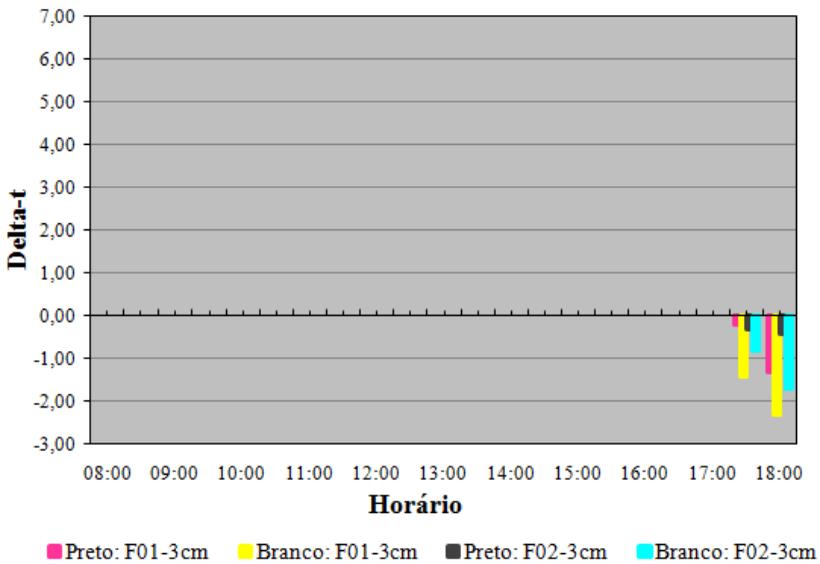
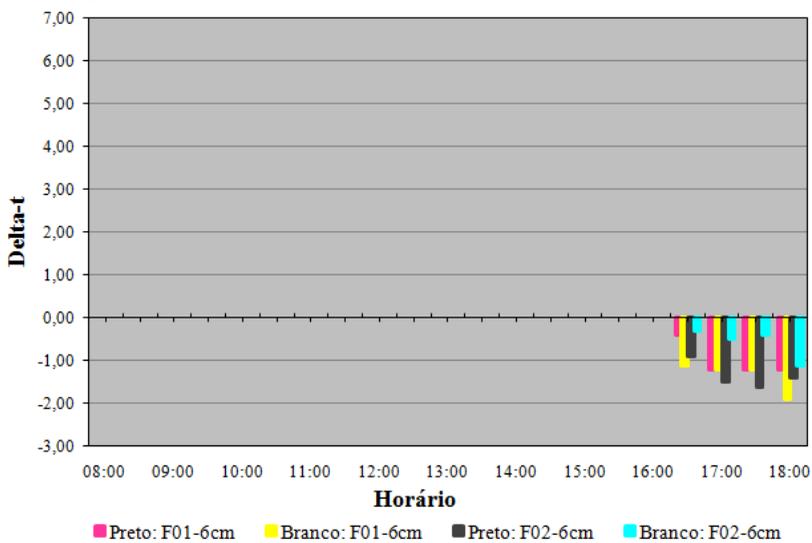
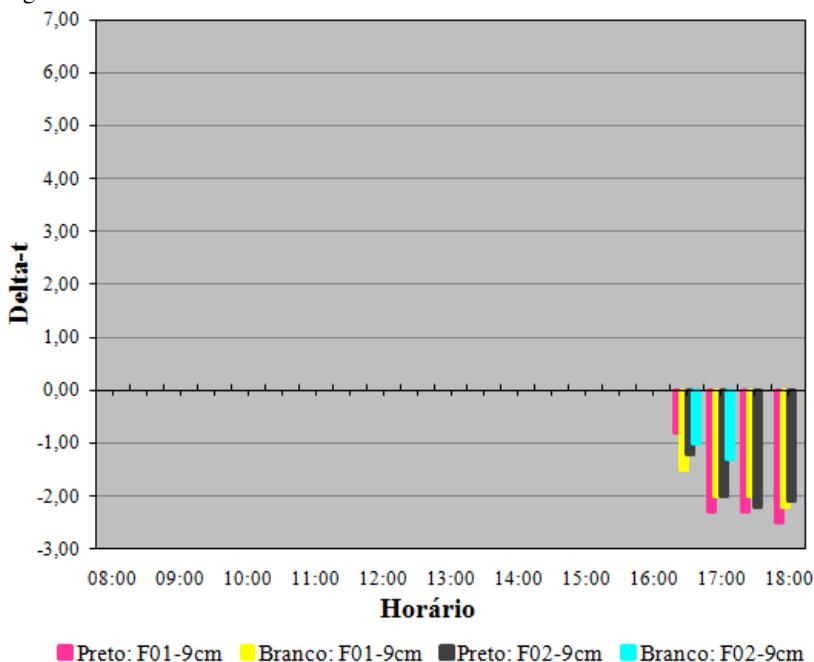
Figura 113: *Delta-T* – defeitos de 3cmFigura 114: *Delta-T* – defeitos de 6cm

Figura 115 – Delta-T – defeitos de 9cm



#### 4.5.4. *Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos*

Conforme já descrito no ensaio anterior, não foi possível estabelecer uma relação entre os Delta-T's e a velocidade do vento.

Em relação à umidade relativa do ar, verifica-se novamente que esse parâmetro analisado isoladamente não serve como diretriz, uma vez que a umidade encontra-se mais alta nas primeiras horas do dia, e mesmo assim não foi possível identificar algum defeito nesse intervalo.

#### 4.5.5. *Conclusões gerais sobre o ensaio*

Alguns fatores podem ter contribuído para que houvesse maior dificuldade em visualizar as falhas no período matutino. Primeiramente, como pode ser verificado na Figura 100, o sol nasce mais ao norte no inverno, e a incidência de radiação solar sobre os painéis pela manhã é menor. A imagem térmica também foi obtida do lado oposto ao

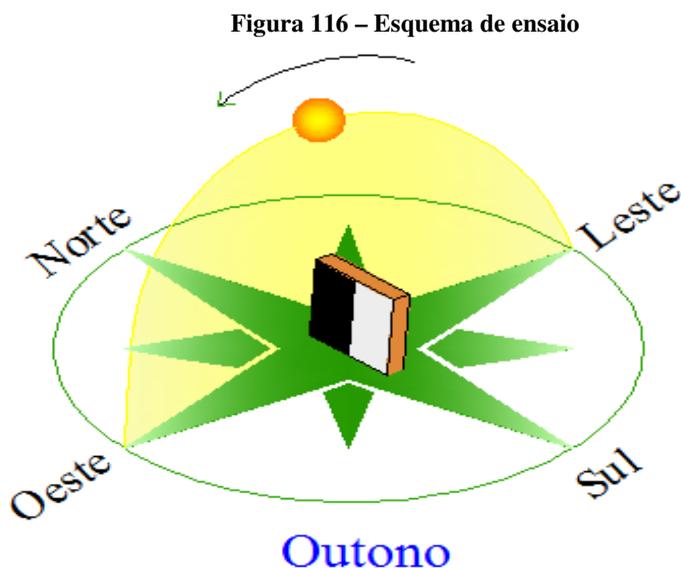
aquecimento (transmissão) e, aliado a isso, as temperaturas estavam muito baixas neste dia.

As falhas foram detectadas como pontos mais frios na fase de resfriamento, e não foi possível perceber influência da absorvância do revestimento na detecção dos defeitos.

#### 4.6. Ensaio 6 – ONO (Oeste, nublado, outono)

##### 4.6.1. Considerações iniciais

O ensaio ocorreu no dia 03 de maio de 2016, entre 08h00min e 16h30min. Conforme pode ser observado na Tabela 12, após as 16h30min o ensaio teve que ser interrompido por conta das condições climáticas desfavoráveis.



Para a execução deste ensaio, os painéis foram posicionados com a superfície revestida voltada para o oeste. Sendo assim, durante o período matutino, a imagem foi obtida do lado oposto ao aquecimento (transmissão), e no período vespertino, a câmera observou a superfície do mesmo lado do aquecimento (reflexão).

Tabela 12 – Condições climáticas em 03 de maio de 2016

Horário	Insolação	Temperatura ambiente (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Umidade Relativa (%)
08h00min	Nublado	18,8	0,5	66,0
08h30min	Nublado	17,6	0,2	74,0
09h00min	Nublado	20,0	0,6	74,0
09h30min	Nublado	21,9	0,8	70,0
10h00min	Nublado	23,5	0,5	65,0
10h30min	Nublado	25,5	0,3	60,0
11h00min	Nublado	25,1	0,7	60,0
11h30min	Nublado	26,8	0,5	56,0
12h00min*	Nublado	24,5	0,3	58,0
12h30min*	Nublado	24,9	0,4	58,0
13h00min*	Nublado	26,2	0,6	52,0
13h30min*	Nublado	29,5	0,8	44,0
14h00min*	Nublado	29,1	0,6	46,0
14h30min*	Nublado	29,3	0,7	47,0
15h00min*	Nublado	27,1	0,5	50,0
15h30min*	Nublado	27,3	0,7	52,0
16h00min*	Nublado	25,7	1,2	55,0
16h30min*	Nublado	21,8	1,1	65,0
17h00min*	Chuva	20,4	-	-
17h30min*	Chuva	19,4	-	-
18h00min*	Chuva	19,0	-	-

Melhores Delta-T's

\* Horários em que a radiação solar incidia diretamente sobre a superfície investigada

#### 4.6.2. Obtenção dos termogramas

Os termogramas obtidos neste ensaio estão dispostos nas Figura 117 a Figura 134. Semelhante ao que foi observado no Ensaio 3 (Leste, Nublado, Outono), as baixas trocas de calor entre o painel branco e o entorno mascararam a existência dos defeitos, sendo necessário um período de exposição muito maior para detectar as falhas existentes.

Em relação ao painel preto, observou-se um *Delta-T* significativo em praticamente todo o período do ensaio. Analisando a Tabela 12, nota-se que a temperatura ambiente foi crescente até as 11h30min, tendo uma pequena queda entre 12h00min e 12h30min. Nesse intervalo, observa-se por meio das Figuras 126b e 127b, que houve o resfriamento

da peça, prejudicando a detecção da falha. Após as 13h00min, o aquecimento voltou a ocorrer, revelando novamente os danos. Vale ressaltar ainda, que no período entre 08h00min e 13h30min, fase de aquecimento, as falhas apresentaram temperatura superior à região sem defeito, conforme pode ser visto nos perfis de temperatura abaixo.

Figura 117: ONO, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

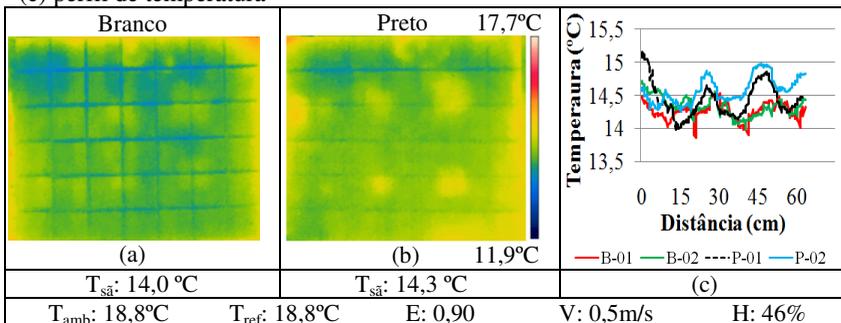


Figura 118: ONO, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

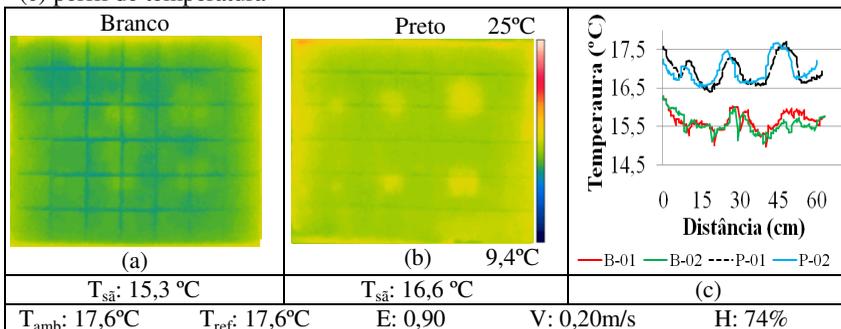


Figura 119: ONO, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

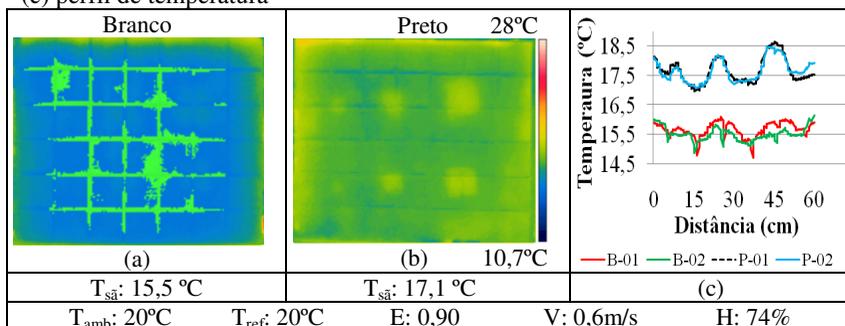


Figura 120: ONO, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

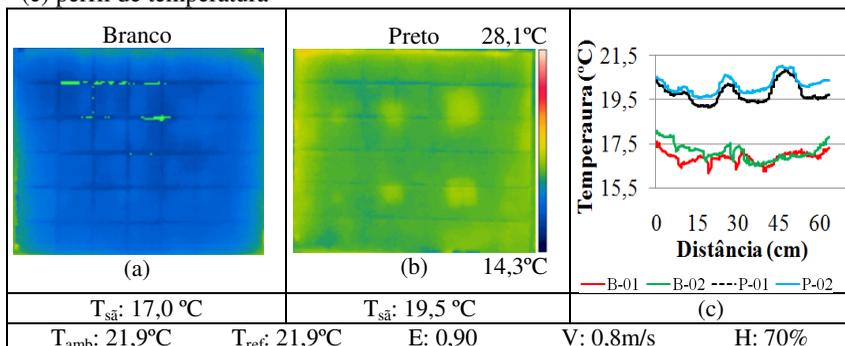


Figura 121: ONO, 10h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

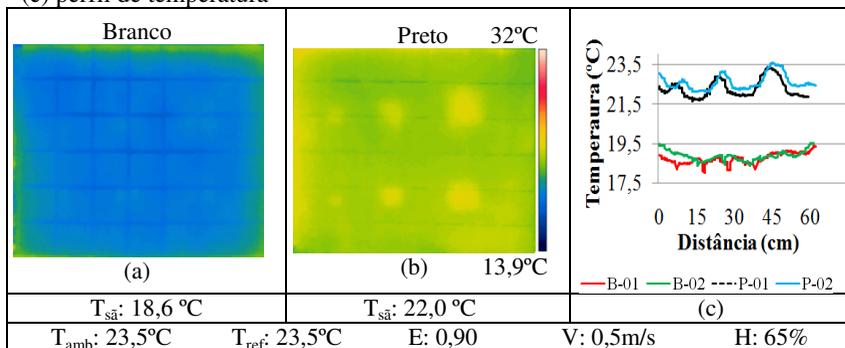


Figura 122: ONO, 10h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

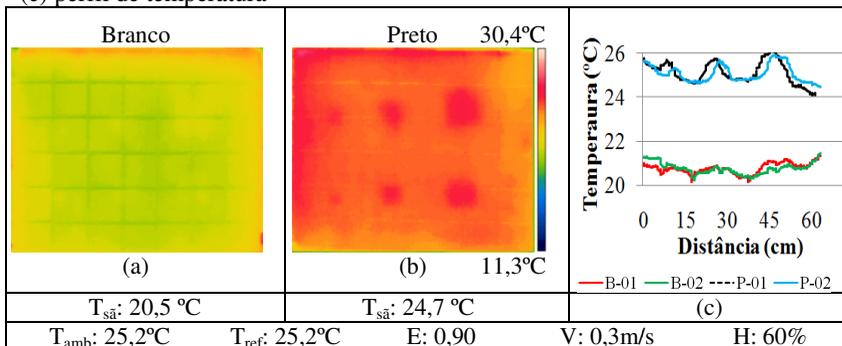


Figura 123: ONO, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

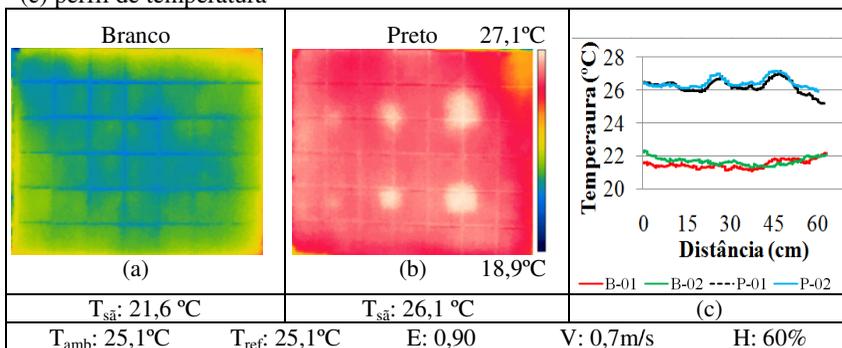


Figura 124: ONO, 11h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

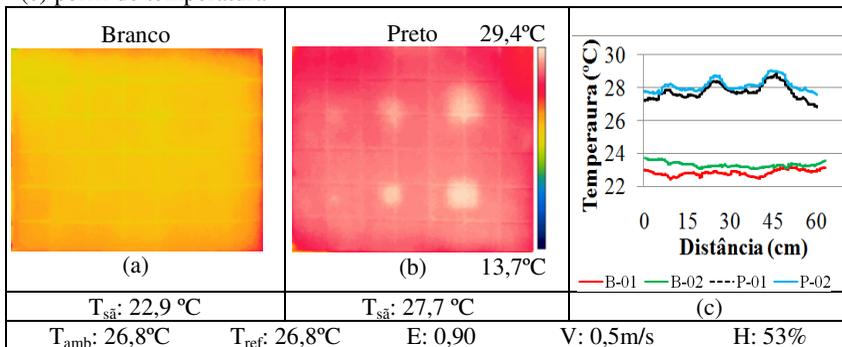


Figura 125: ONO, 12h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

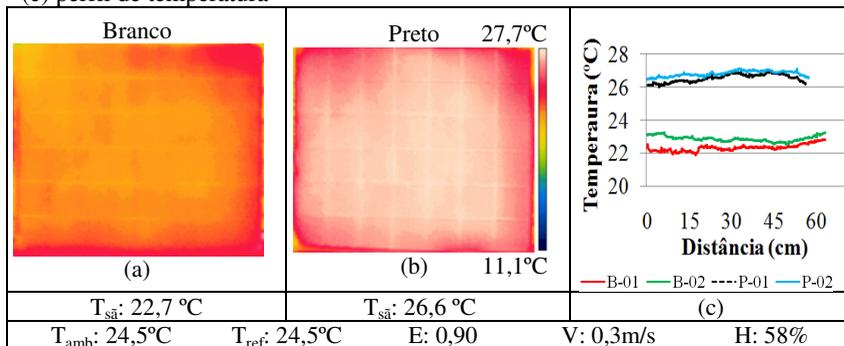


Figura 126: ONO, 12h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

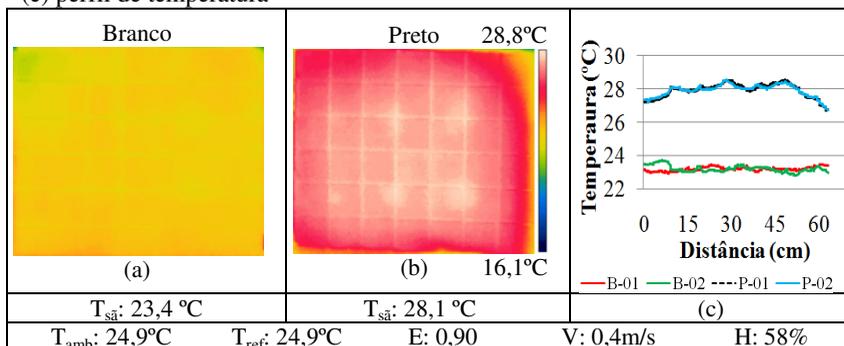


Figura 127: ONO, 13h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

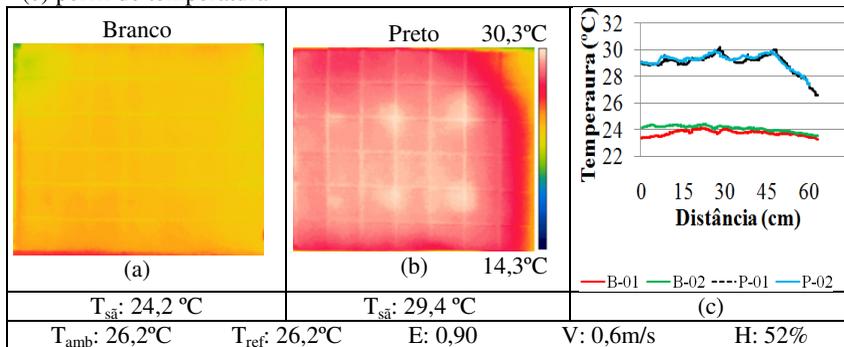


Figura 128: ONO, 13h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

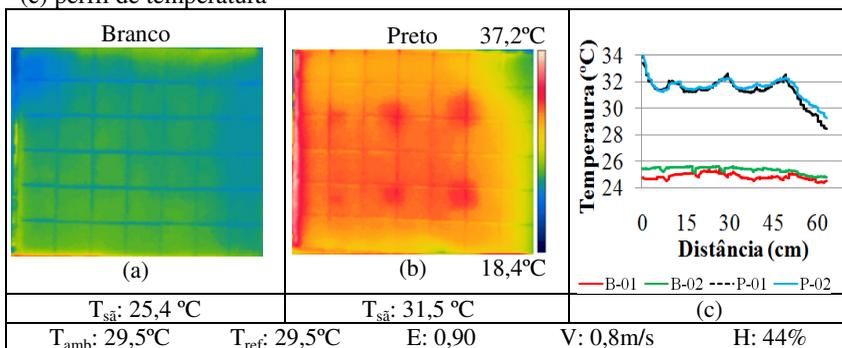


Figura 129: ONO, 14h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

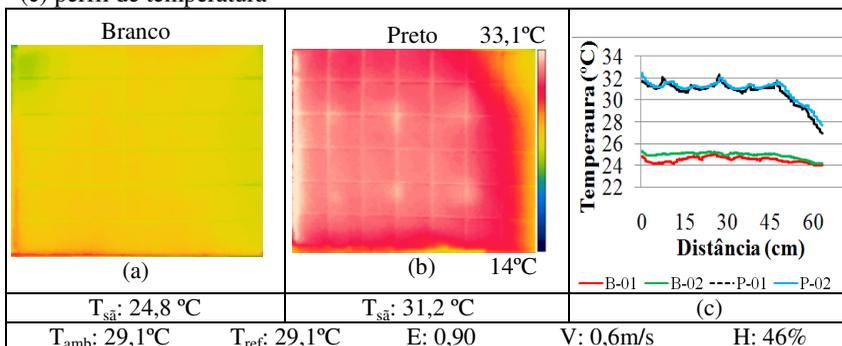


Figura 130: ONO, 14h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

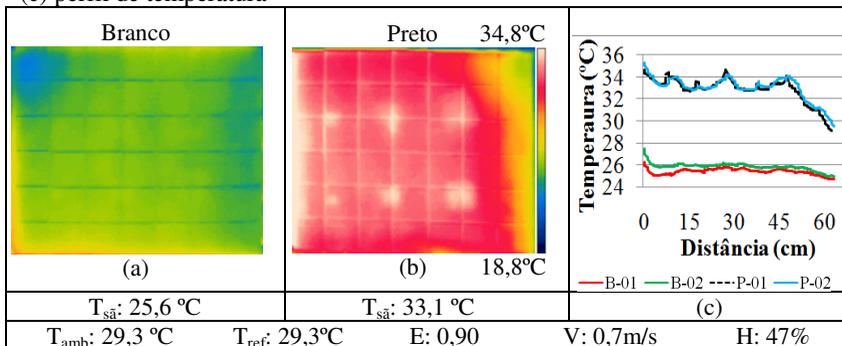


Figura 131: ONO, 15h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

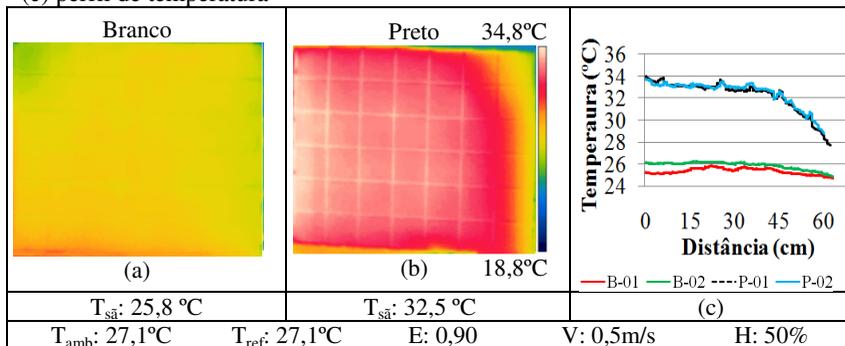


Figura 132: ONO, 15h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

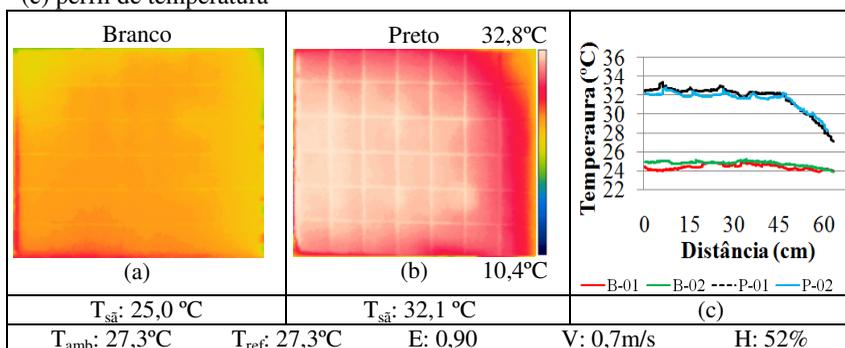


Figura 133: ONO, 16h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

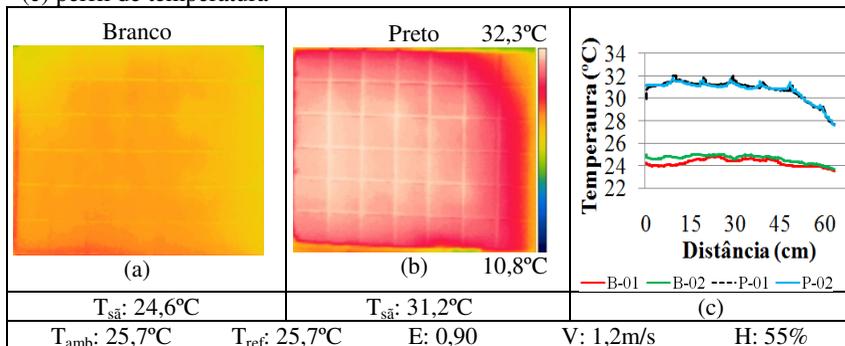
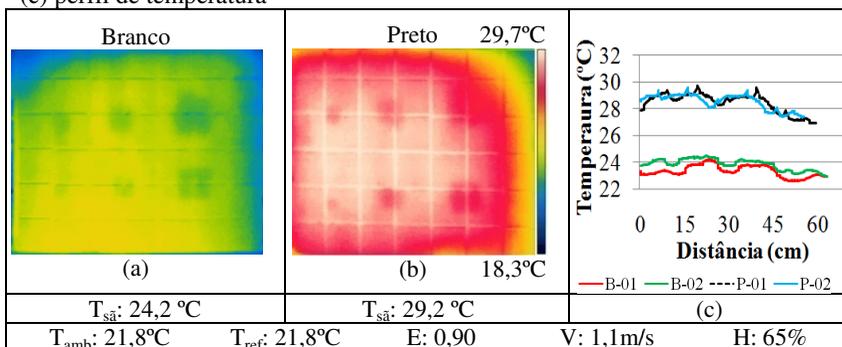


Figura 134: ONO, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

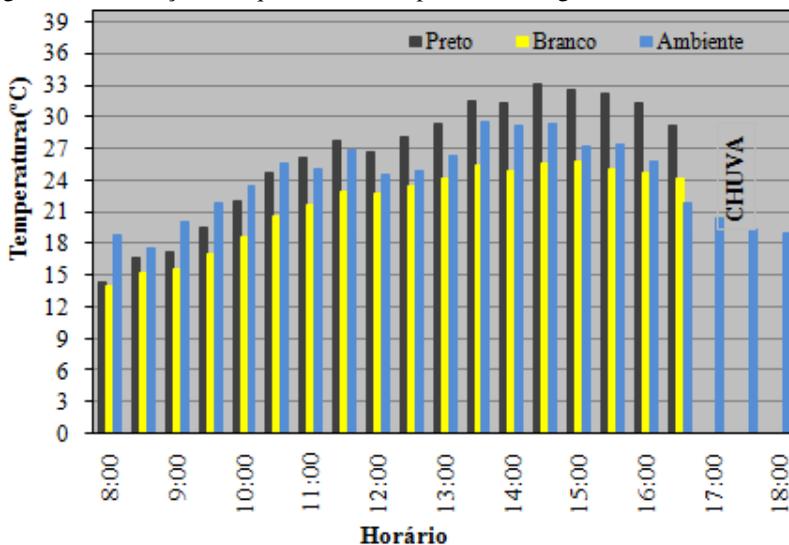


Conforme explicado anteriormente, após esse horário o ensaio foi suspenso em função da chuva.

#### 4.6.3. Evolução do aquecimento dos painéis

A Figura 135 apresenta a evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia.

Figura 135: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia



As Figura 136 a Figura 138 apresentam a diferença de temperatura entre as regiões com e sem defeito para os defeitos de 3, 6 e 9cm, respectivamente. Observa-se novamente o quanto a absorvância do material parece influenciar na detecção dos defeitos.

As falhas simuladas no painel preto foram facilmente detectadas pela câmara infravermelha, inclusive àquelas de 3cm de largura, por um longo período de tempo. Já no painel branco, nota-se que apenas a partir das 16h00min, fase de resfriamento da peça, houve troca de radiação suficiente para que fosse possível perceber as falhas. Ou seja, os defeitos ficaram mascarados durante quase todo o dia.

Figura 136: *Delta-T* – defeitos de 3cm

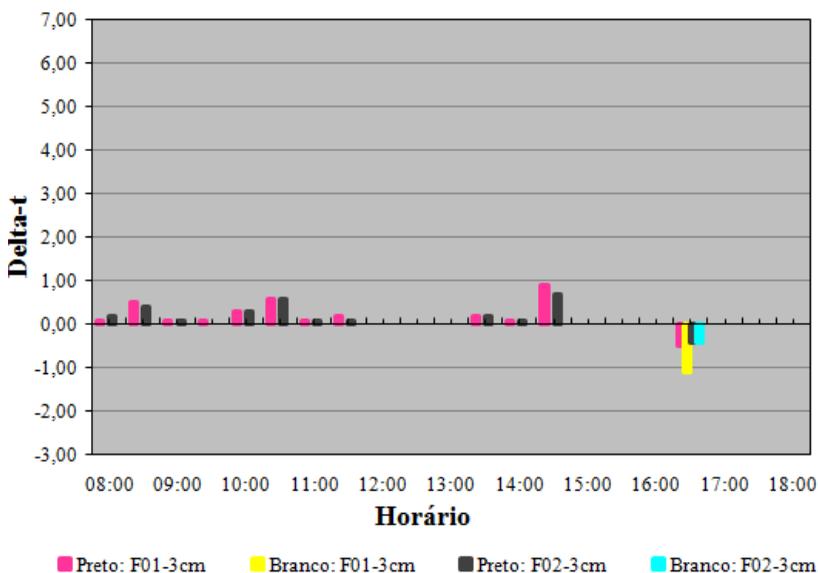
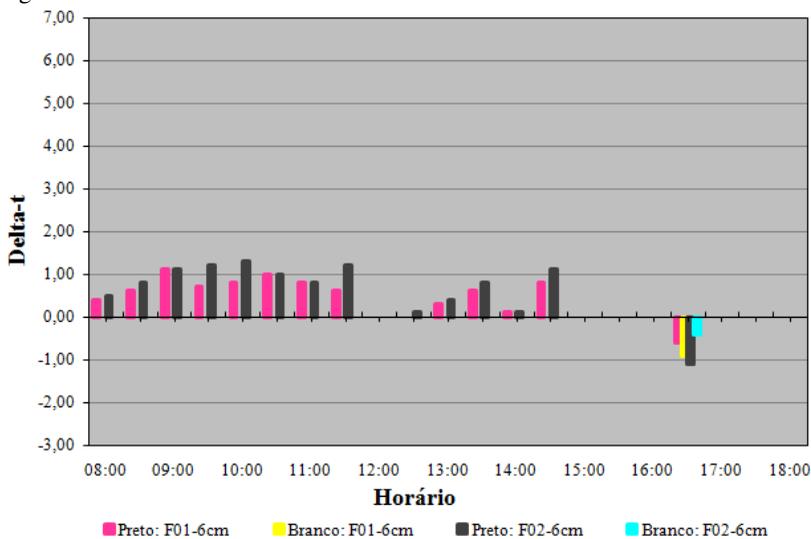
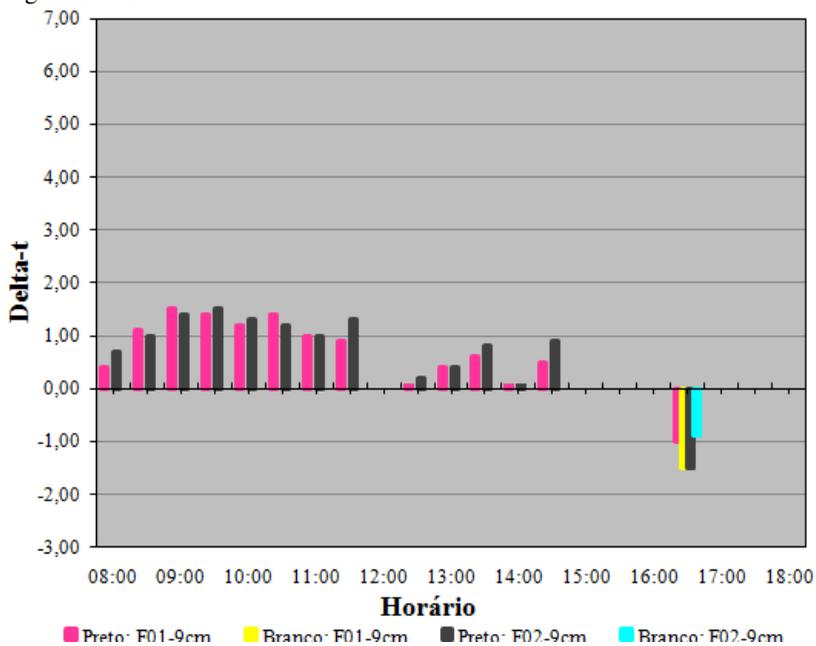


Figura 137: *Delta-T* – defeitos de 6cmFigura 138: *Delta-T* – defeitos de 9cm

#### 4.6.4. *Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos*

Sobre a umidade relativa do ar, as conclusões para este ensaio foram semelhantes aos ensaios 4 e 5, uma vez que os *Delta-T*'s foram percebidos com nitidez em determinados horários, mesmo com a umidade relativa abaixo de 50%. Novamente, este fato reforça a análise anterior sobre o quanto pode ser complicado conseguir explicar a relação de apenas uma variável com o *Delta-T*, sendo que vários outros aspectos influenciam nos resultados.

#### 4.6.5. *Conclusões gerais sobre o ensaio*

A hipótese de que a diferença na absorvância dos revestimentos influencia na detecção dos defeitos ficou bem evidente quando o ensaio foi realizado sob insolação parcial (céu nublado).

Assim como ocorreu no Ensaio 3, quando os painéis foram posicionados para a leste, a pouca absorção de calor do painel branco mascarou a existência dos defeitos até as 16h00min. Isso significa que foram necessárias 8 horas de exposição do revestimento para que houvesse uma troca de calor significativa que permitisse a detecção da falha.

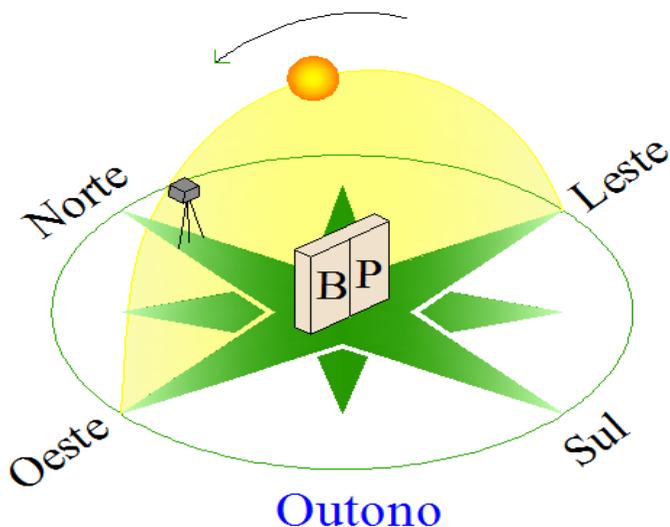
No entanto, no final do dia, percebe-se que os *Delta-T*'s são praticamente iguais para ambas as cores. Ou seja, conforme visto no ensaio 2, a partir do momento em que as peças entram em equilíbrio térmico com ao ambiente e também na fase de resfriamento, a cor não demonstrou tanta influência, uma vez que, tanto em termos qualitativos (visualização do defeito) quanto quantitativos (*Delta-T*) os resultados foram semelhantes no preto e no branco.

#### 4.7. Ensaio 7 – NPO (norte, plena, outono)

##### 4.7.1. Considerações iniciais

A Tabela 13 apresenta as condições climáticas registradas no dia do ensaio, que ocorreu em 30 de março de 2016. Observa-se que, no período compreendido entre 11h30min e 14h30min, houve uma variação na incidência de radiação solar, que refletiu diretamente nos resultados, apresentados a seguir.

Figura 139 – Esquema de ensaio



A Figura 139 representa o esquema de ensaio realizado, onde os painéis foram posicionados com a face revestida para o norte.

Tabela 13 - Condições climáticas em 30 de março de 2016

Horário	Insoleção	Temperatura ambiente (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Umidade Relativa (%)
08h00min	Plena	25,80	0,40	61,00
08h30min	Plena	26,30	0,40	64,00
09h00min	Plena	27,10	0,50	54,00
09h30min	Plena	27,20	0,70	56,00
10h00min	Plena	30,80	1,10	39,00
10h30min	Plena	30,90	0,80	36,00
11h00min*	Plena	30,90	1,10	40,00
11h30min*	Nublado	33,30	0,70	61,00
12h00min*	Plena	38,00	1,20	51,00
12h30min*	Nublado	37,30	1,10	54,00
13h00min*	Nublado	33,30	1,20	63,00
13h30min*	Nublado	31,80	0,50	68,00
14h00min*	Nublado	34,50	0,80	63,00
14h30min*	Plena	36,40	0,40	57,00
15h00min*	Plena	36,20	0,90	57,00
15h30min	Plena	34,60	1,90	60,00
16h00min	Plena	30,90	1,40	67,00
16h30min	Plena	28,90	1,80	63,00
17h00min	Plena	28,90	1,50	64,00
17h30min	Plena	27,30	1,00	69,00
18h00min	Plena	26,40	0,50	67,00

Melhores Delta-T's

\* Horários em que a radiação solar incidia diretamente sobre a superfície investigada

#### 4.7.2. Obtenção dos termogramas

Observando a forma de aquecimento dos painéis, nota-se que o painel preto teve um aquecimento maior do lado esquerdo nas primeiras imagens. Este fato ocorreu porque, embora ambos estivessem posicionados para o norte, o painel preto estava de lado esquerdo, recebendo mais radiação solar nesses primeiros horários do que o branco, conforme Figura 139.

Figura 140: NPO, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

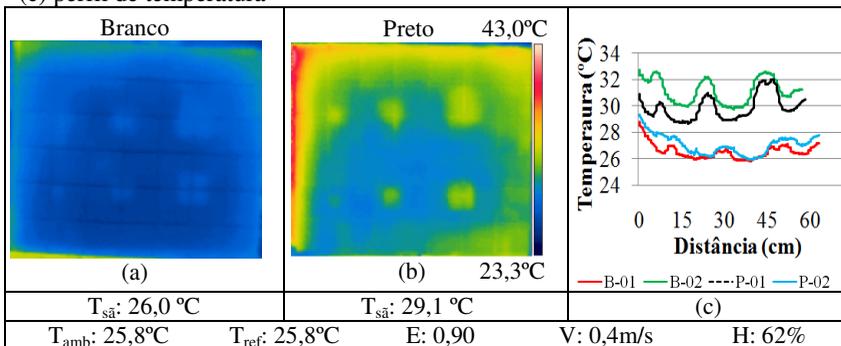


Figura 141: NPO, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

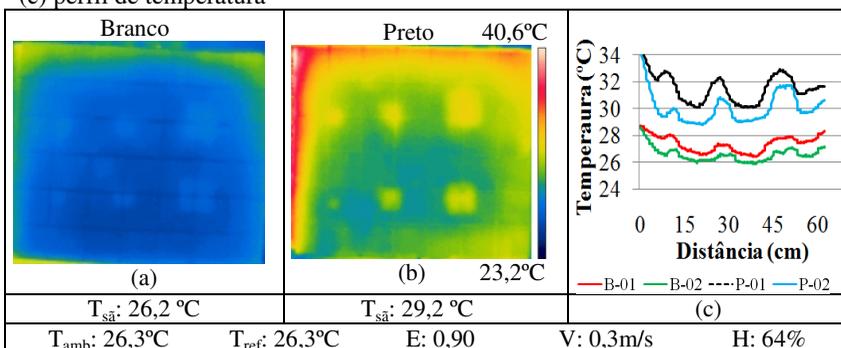


Figura 142: NPO, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

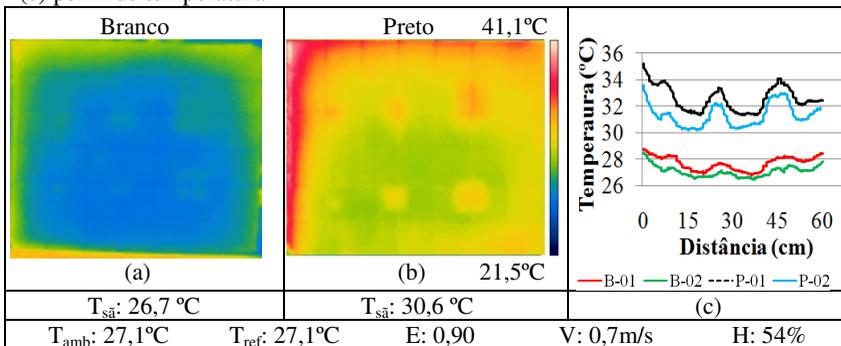


Figura 143: NPO, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

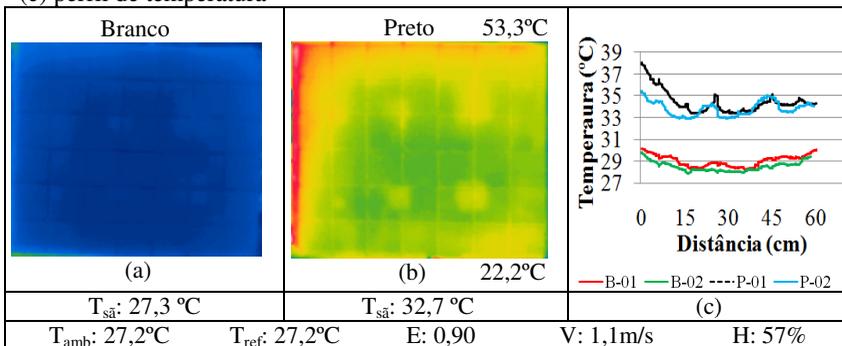


Figura 144: NPO, 10h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

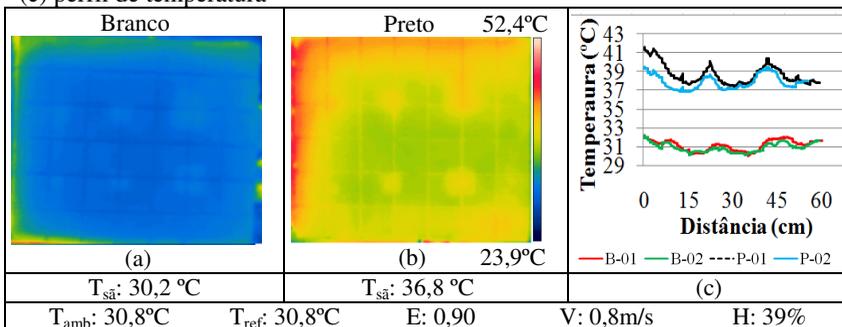


Figura 145: NPO, 10h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

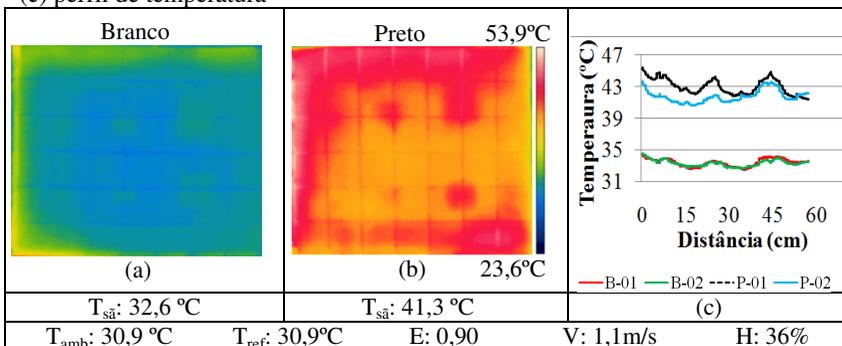


Figura 146: NPO, 11h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

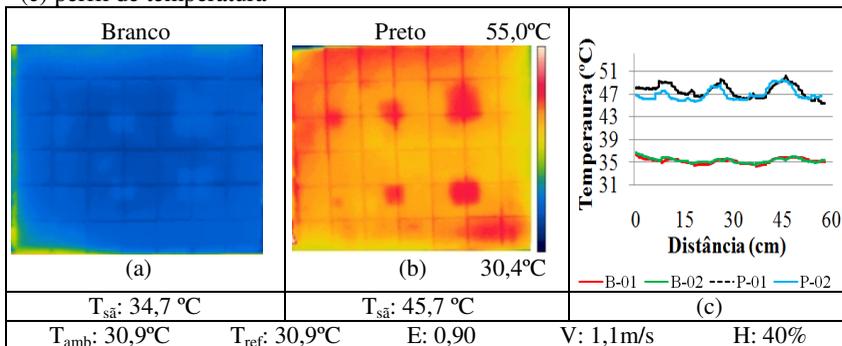


Figura 147: NPO, 11h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

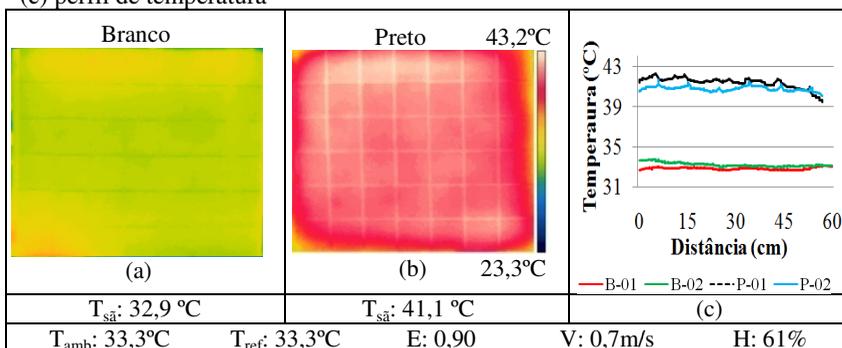


Figura 148: NPO, 12h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

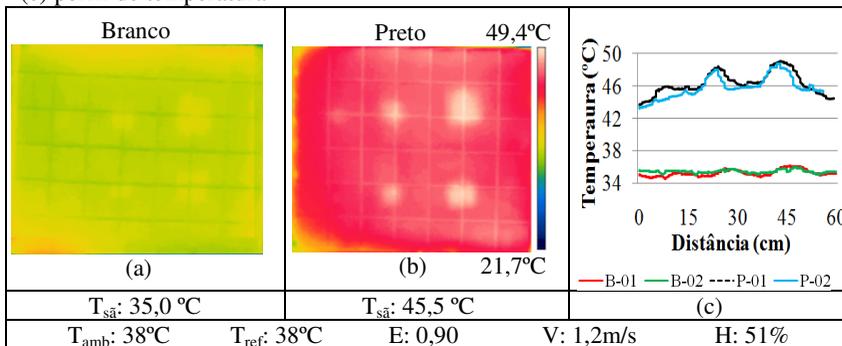


Figura 149: NPO, 12h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

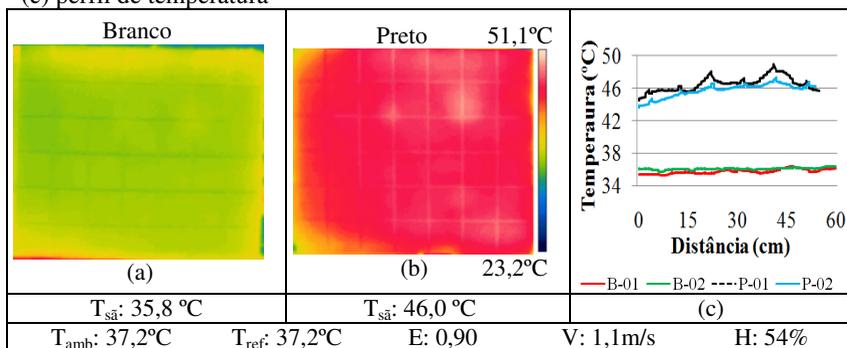


Figura 150: NPO, 13h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

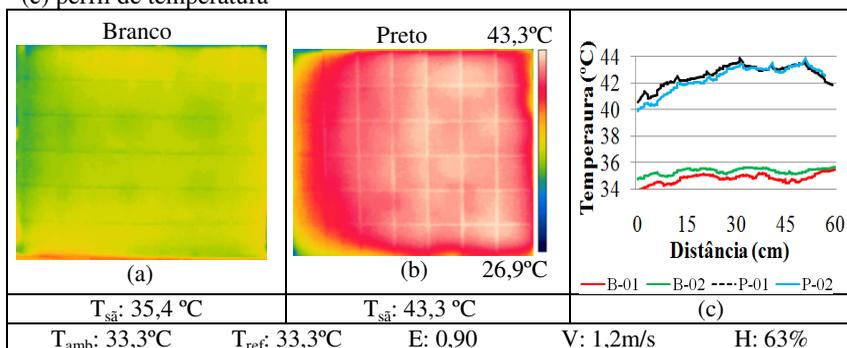


Figura 151: NPO, 13h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

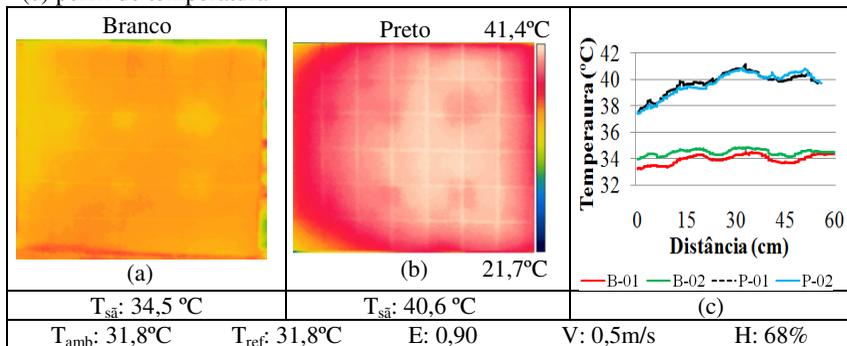


Figura 152: NPO, 14h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

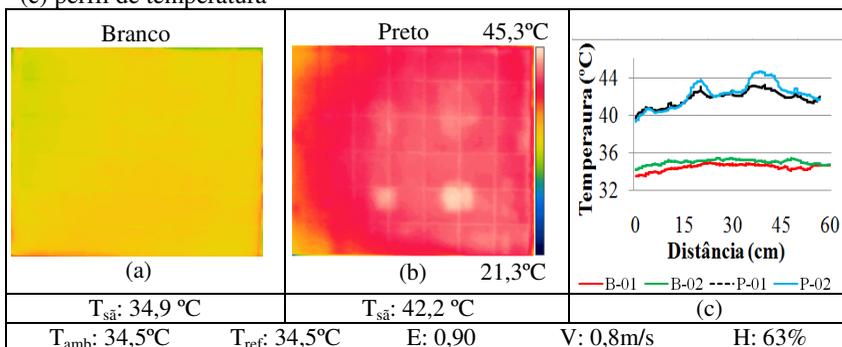


Figura 153: NPO, 14h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

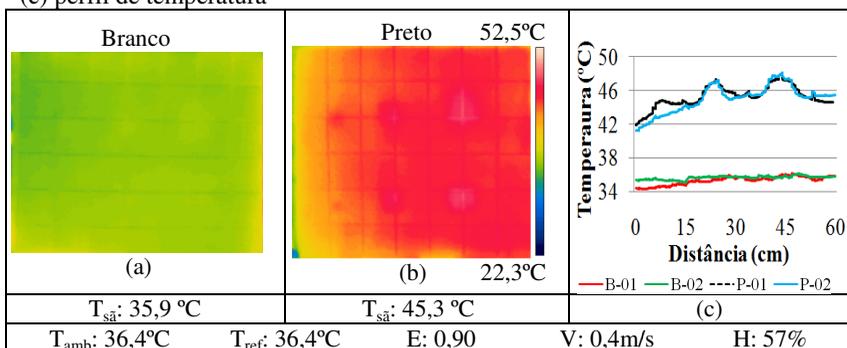


Figura 154: NPO, 15h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

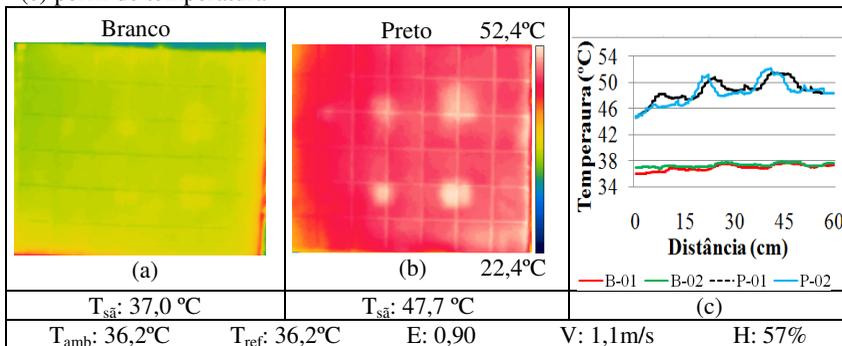


Figura 155: NPO, 15h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

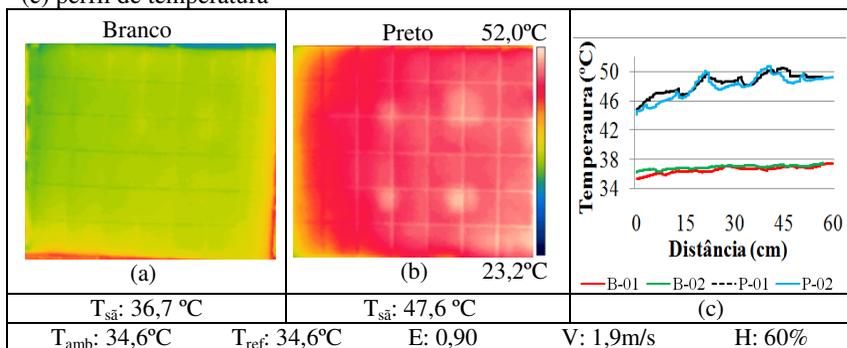


Figura 156: NPO, 16h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

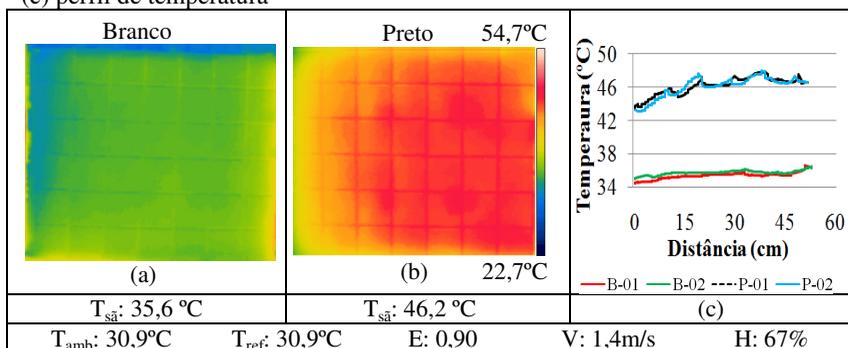


Figura 157: NPO, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

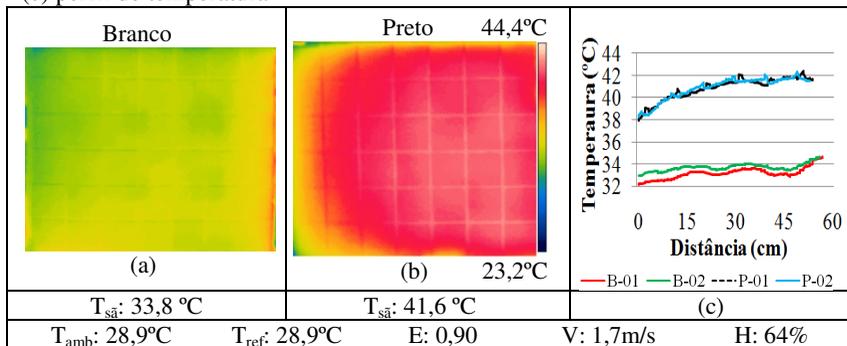


Figura 158: NPO, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

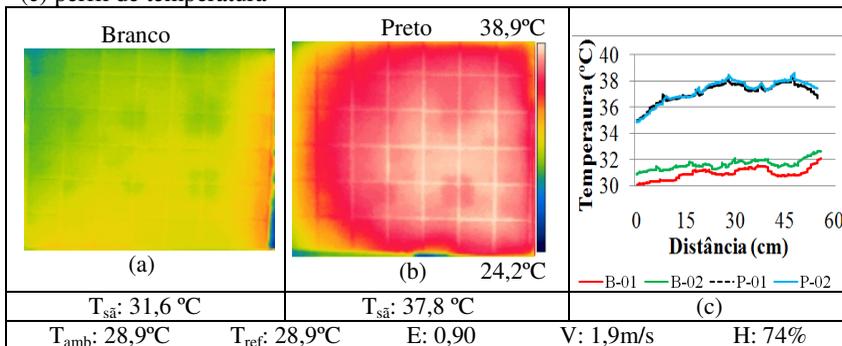


Figura 159: NPO, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

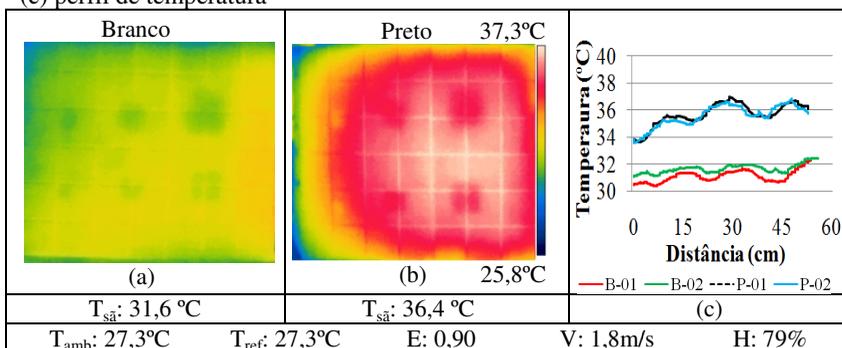
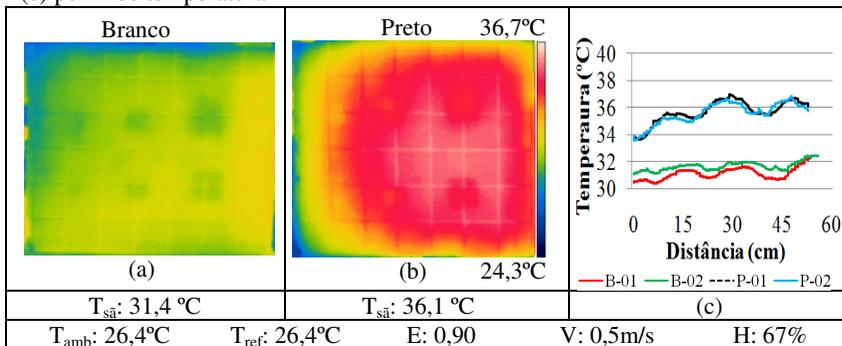


Figura 160: NPO, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



### 4.7.3. Evolução do aquecimento dos painéis

As condições do entorno sofreram variações importantes durante o ensaio, dificultando a interpretação de algumas imagens e mascarando defeitos. As Figura 161 e Figura 164 apresentam as condições de insolação entre as 11h00min e 12h30min. De uma maneira geral, nota-se que, sempre que há uma variação das condições do entorno, seja a temperatura ambiente ou a intensidade da radiação, a visualização do defeito sofre influência. Embora tenha havido um acréscimo da temperatura ambiente no intervalo entre 11h00min e 11h30min, percebe-se que o painel resfriou de 45,7°C para 41,1°C, apenas pela variação da insolação, que era plena e passou a ser nublado.

Figura 161 - 11h00min: Insolação plena

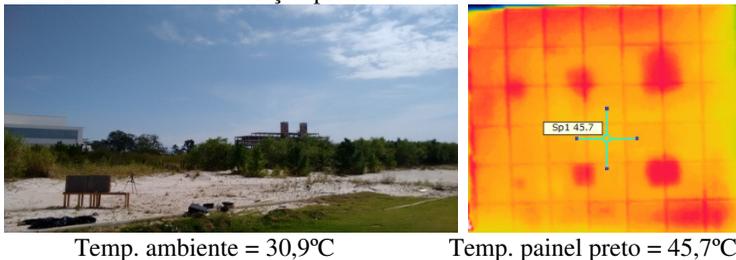


Figura 162 - 11h30min: Insolação parcial

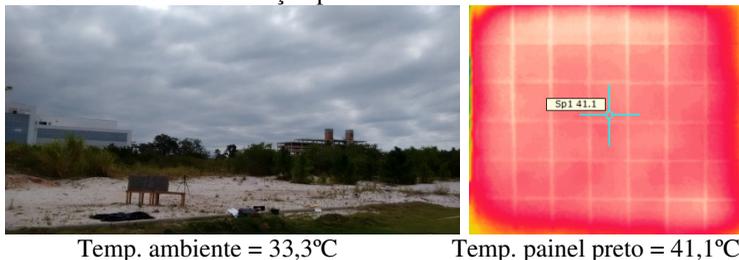


Figura 163 - 12h00min: Insolação plena

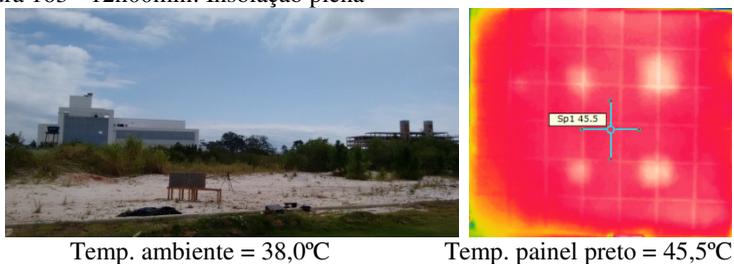
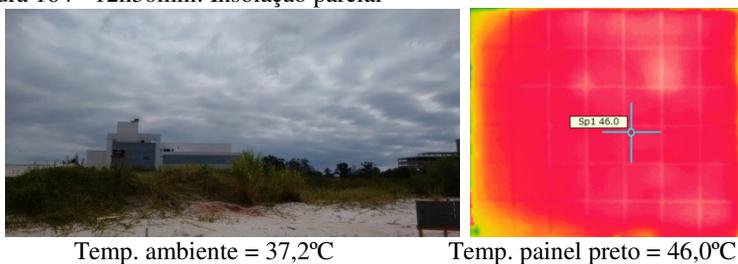
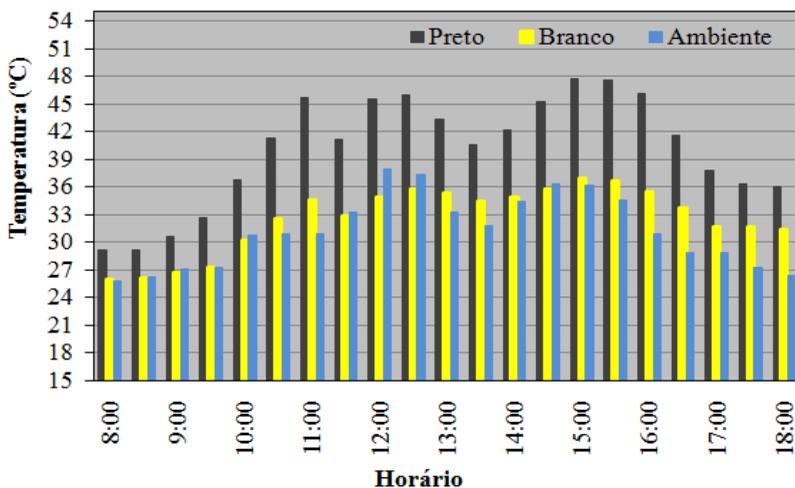


Figura 164 - 12h30min: Insolação parcial



Essas constatações revelam o quanto as condições do entorno influenciam no resultado das análises, podendo levar a diagnósticos totalmente errados. As Figura 165 e Figura 168 apresentam a evolução do aquecimento dos painéis e visualização dos defeitos durante o ensaio.

Figura 165: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia



O comportamento das temperaturas nos defeitos também mostrou variações importantes ao longo do ensaio. Analisando as Figura 167 e Figura 168, percebe-se que entre 13h00min e 13h30min, os defeitos apresentaram temperaturas inferiores à região sã dos painéis, isso pode ser justificado em função da queda de temperatura que houve nesse período. A partir do momento em que a temperatura voltou a subir, os defeitos apareceram como regiões quentes.

Figura 166:  $\Delta T$  – defeitos de 3cm

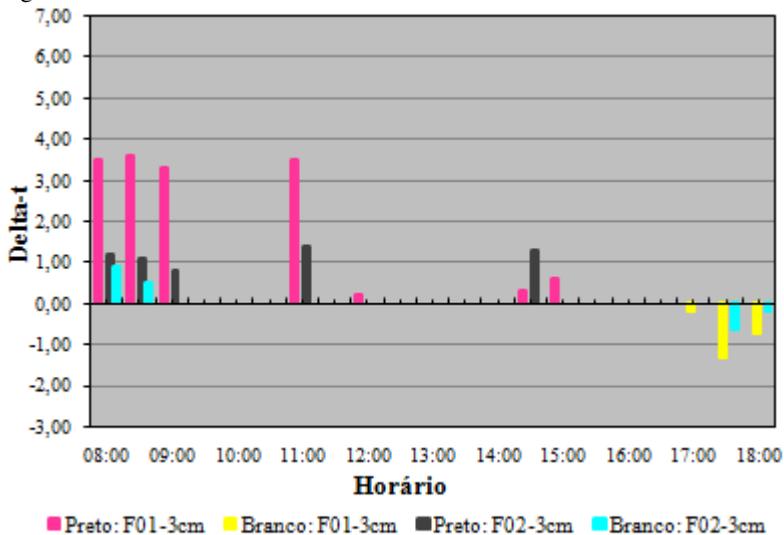
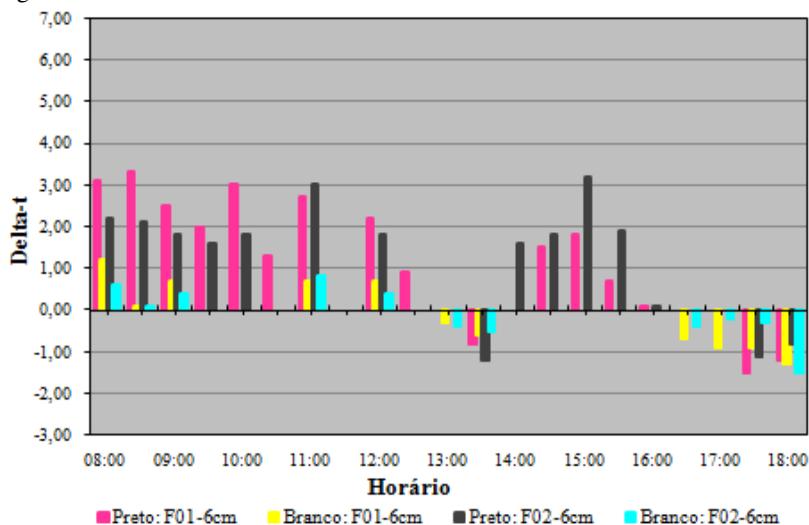
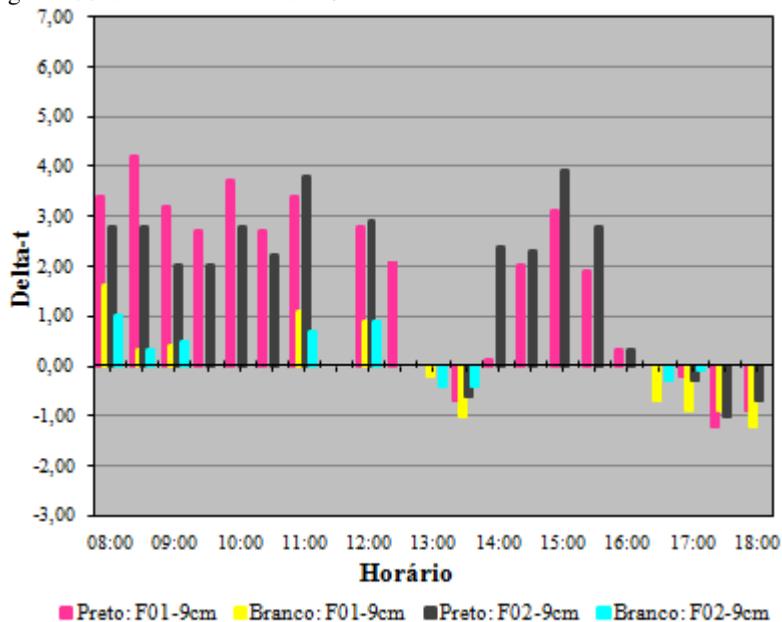


Figura 167: *Delta-T* – defeitos de 6cmFigura 168: *Delta-T* – defeitos de 9cm

#### 4.7.4. *Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos*

Sobre a umidade relativa do ar, as conclusões para este ensaio foram semelhantes aos ensaios 4, 5 e 6, uma vez que os Delta-T's foram percebidos com nitidez em determinados horários, mesmo com a umidade relativa abaixo de 50%.

#### 4.7.5. *Conclusões gerais sobre o ensaio*

A principal conclusão que se chegou com este ensaio é o quanto a variação das condições do entorno são importantes para a revelação dos defeitos. Nos outros ensaios, que obedeciam a sequência – aquecimento, equilíbrio térmico, resfriamento – a visualização dos defeitos era bem caracterizada. Ou seja, os defeitos eram percebidos no início do ensaio, na fase de ganho de calor das peças, depois ocorria um período de inércia, e no final, com o resfriamento dos painéis, as falhas voltavam a ser percebidas.

Neste ensaio, houve variações de temperatura e insolação fora desses padrões, e isso mostrou a importância de se ter conhecimento dessas variáveis ao utilizar a termografia infravermelha como ferramenta de diagnóstico de defeitos ocultos em fachadas.

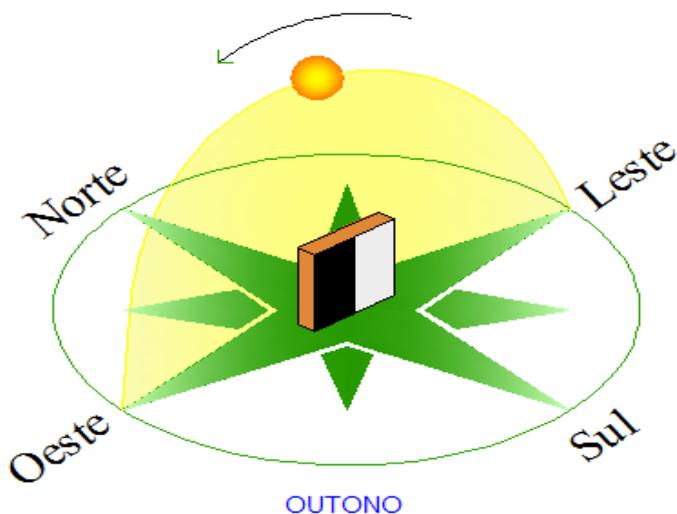
Em relação às cores, novamente ficou evidenciada a influência da absorvância na detecção dos defeitos, uma vez que apenas no final do dia é que foi possível constatar alguma falha no painel branco.

## 4.8. Ensaio 8 – SPO (sul, plena, outono)

### 4.8.1. Considerações iniciais

A Tabela 14 apresenta as condições climáticas registradas no dia do ensaio, que ocorreu em 07 de abril de 2016. Observa-se que, mesmo no outono, o dia foi muito quente, com temperatura média de 35°C.

Figura 169 – Esquema de ensaio



A Figura 169 representa o esquema de ensaio realizado, onde os painéis foram posicionados com a face revestida para o sul, sendo que o painel branco ficou à direita e o preto à esquerda.

Tabela 14 – Condições climáticas em 07 de abril de 2016

Horário	Insolação	Temperatura ambiente (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Umidade Relativa (%)
08h00min	Plena	28,30	0,90	69,00
08h30min	Plena	32,50	0,50	66,00
09h00min	Plena	36,00	0,90	58,00
09h30min	Plena	40,20	1,20	55,00
10h00min	Plena	41,70	0,80	49,00
10h30min	Plena	42,20	0,40	49,00
11h00min	Plena	42,80	1,50	41,00
11h30min	Plena	42,60	1,10	42,00
12h00min	Plena	38,60	0,90	47,00
12h30min	Plena	34,80	1,20	54,00
13h00min	Plena	36,40	1,30	50,00
13h30min	Plena	36,60	0,80	52,00
14h00min	Plena	36,70	1,80	48,00
14h30min	Plena	33,10	3,00	54,00
15h00min	Plena	33,70	1,20	55,00
15h30min	Plena	28,40	1,50	64,00
16h00min	Plena	27,50	1,90	69,00
16h30min	Plena	27,10	2,50	71,00
17h00min	Plena	27,00	2,10	70,00
17h30min	Plena	26,40	0,90	70,00
18h00min	Plena	26,10	1,20	68,00

Melhores Delta-T's

\* Horários em que a radiação solar incidia diretamente sobre a superfície investigada

#### 4.8.2. Obtenção dos termogramas

As Figura 170 a Figura 177 apresentam os termogramas registrados ao longo do ensaio. Embora a posição do painel branco estivesse mais favorável no período matutino, percebe-se que o preto ganhou calor mais rapidamente, viabilizando a detecção dos defeitos.

Figura 170: SPO, 08h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

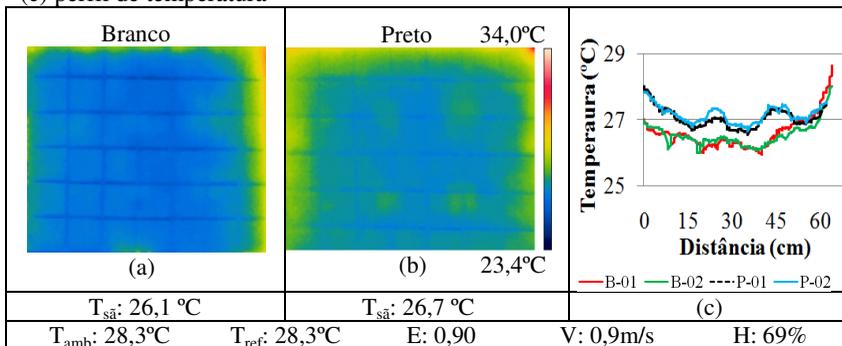


Figura 171: SPO, 08h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

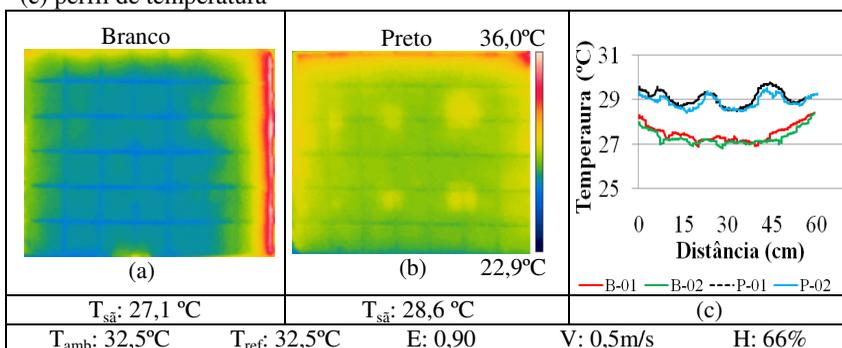


Figura 172: SPO, 09h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

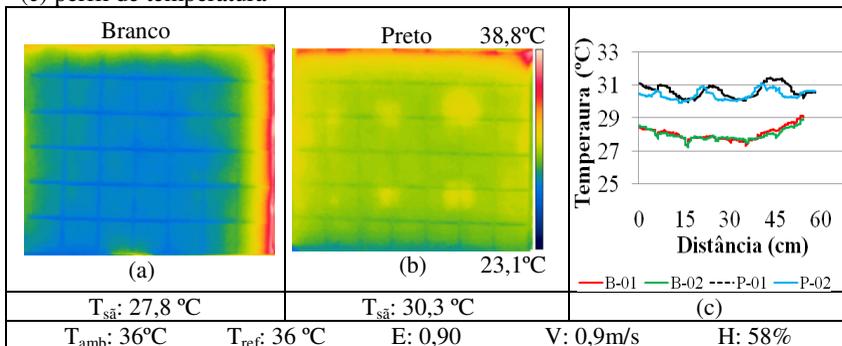
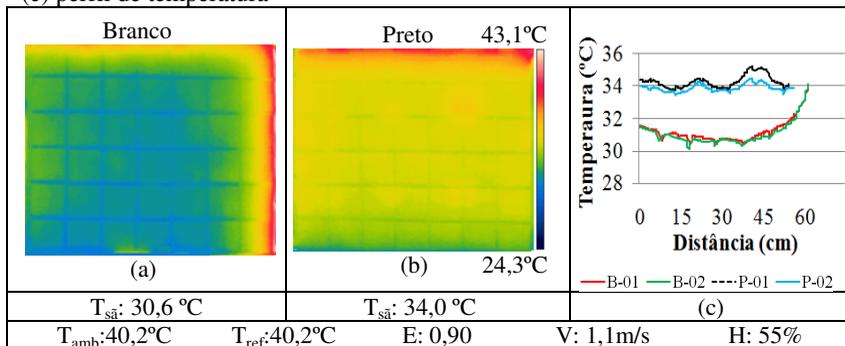


Figura 173: SPO, 09h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



Entre 09h30min e 16h00min os painéis entraram em equilíbrio térmico e nenhuma falha foi registrada, portanto, as imagens não estão apresentadas.

Figura 174: SPO, 16h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

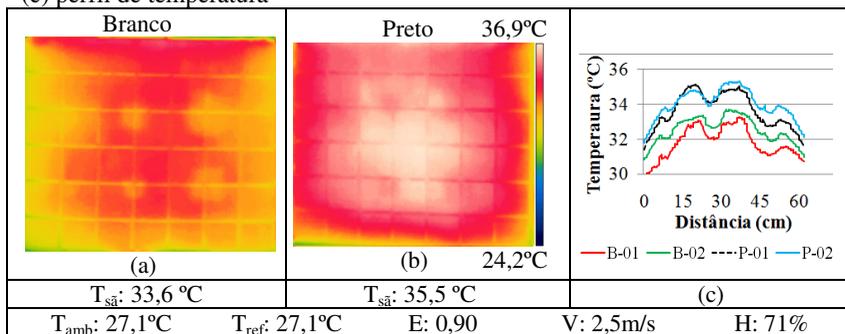


Figura 175: SPO, 17h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

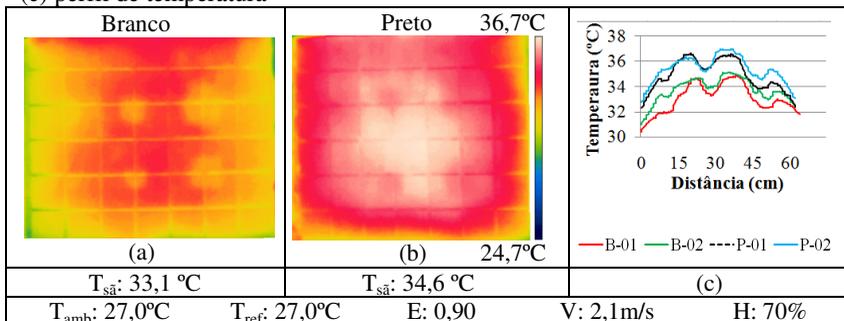


Figura 176: SPO, 17h30min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura

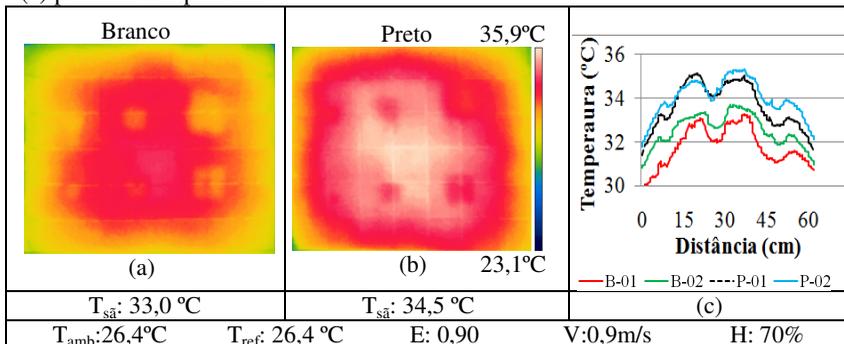
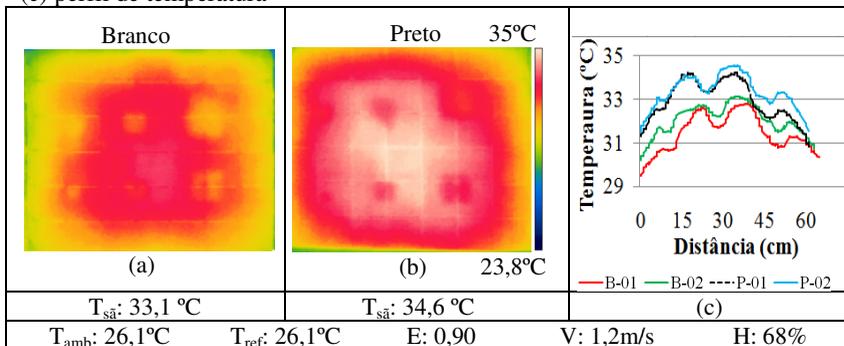


Figura 177: SPO, 18h00min: (a) revestimento branco; (b) revestimento preto e; (c) perfil de temperatura



4.8.3. *Evolução do aquecimento dos painéis*

Analisando a Tabela 14, nota-se que a temperatura ambiente foi crescente até as 11h30min, atingindo 42°C, e após isso foi caindo gradativamente até as 18h00min.

Figura 178: Evolução do aquecimento dos painéis ao longo do dia

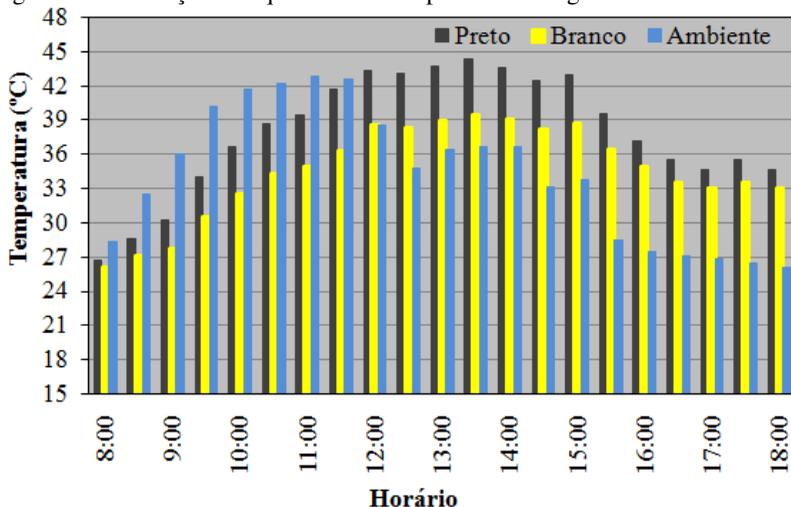
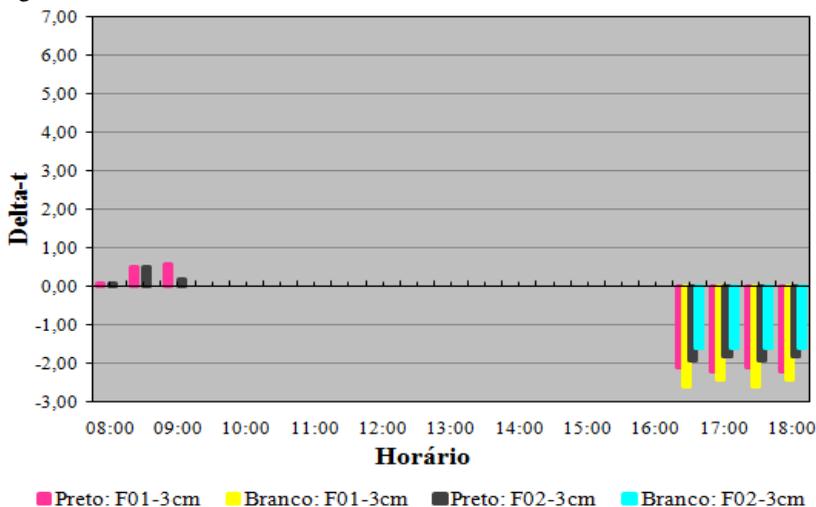
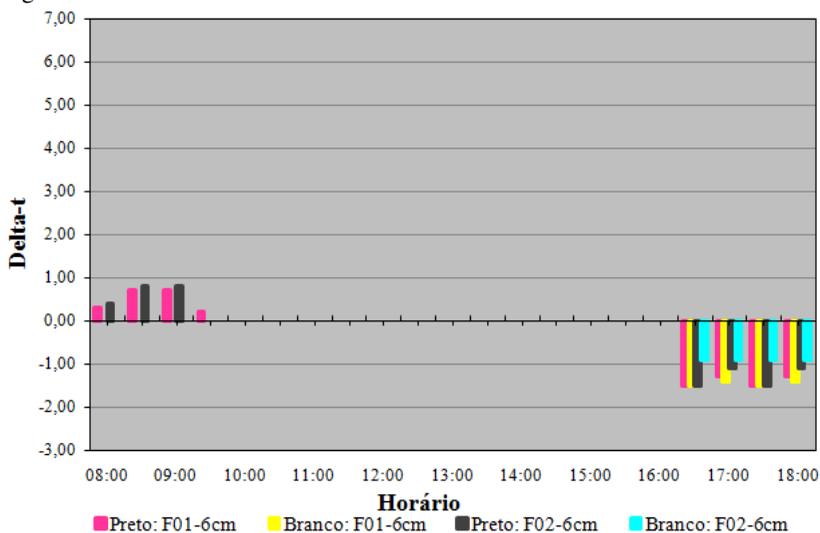


Figura 179: *Delta-T* – defeitos de 3cm

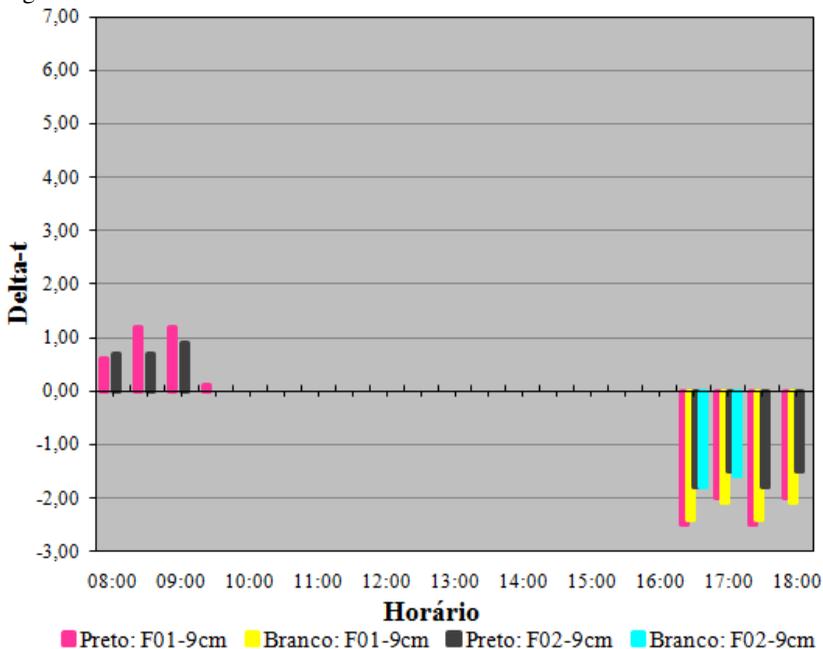


O  $\Delta T$  para o defeito de 3cm no período entre 08h00min e 09h00min foi em média  $+0,4^{\circ}\text{C}$ , e percebe-se que esse valor já foi suficiente para visualizá-lo. No final da tarde, esse valor foi muito maior, em média de  $-2,0^{\circ}\text{C}$ , porém, novamente, em função do resfriamento das peças ocorrer primeiramente nas bordas, a delimitação do contorno da falha ficou prejudicada.

Figura 180:  $\Delta T$  – defeitos de 6cm



Para as falhas de 6 e 9cm, cujos  $\Delta T$ s estão apresentados nas Figura 181, percebe-se que no painel branco elas somente foram detectadas a partir das 16h30min. No entanto, a partir desse momento, os valores foram semelhantes para ambas as cores.

Figura 181: *Delta-T* – defeitos de 9cm

#### 4.8.4. *Influência do vento e umidade relativa do ar na visualização dos defeitos*

Sobre a umidade relativa do ar, as conclusões para este ensaio foram semelhantes aos ensaios 1, 2 e 3, ou seja, os defeitos foram mais perceptíveis nos horários de maior umidade relativa do ar.

#### 4.8.5. *Conclusões gerais sobre o ensaio*

As conclusões gerais para este último ensaio vão de encontro às conclusões já apresentadas nesse trabalho. As baixas trocas de calor entre o painel branco e o entorno mascararam a existência dos defeitos, sendo necessário um período de exposição muito maior para detectar as falhas existentes.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal deste trabalho de mestrado foi avaliar o emprego da técnica de termografia infravermelha na detecção de falhas de aderência em fachadas com revestimentos cerâmicos. Para desenvolver essa tarefa, inicialmente foram estudados os aspectos fundamentais que envolvem essa técnica, assim como os métodos de detecção e caracterização de defeitos.

Em seguida, foi realizado um programa experimental por meio da confecção de painéis de alvenaria revestidos com cerâmica nas cores preta e branca (cores extremas), onde foram simuladas falhas internas variando alguns parâmetros, como profundidade, dimensões da falha e tempo de aquecimento. Os painéis foram avaliados por meio da termografia passiva, onde a análise conta com as condições naturais da estrutura estudada e do seu entorno, sendo o calor do sol um fator determinante.

Para compor o estudo, foram realizadas as análises espectrofotométricas de refletância das cerâmicas branca e preta utilizadas para revestir os painéis, e constatou-se que a refletância solar total para radiação de onda curta (300 a 2500nm) para o branco é cerca de seis vezes maior que o preto (72,1% branco; 12,0% preto).

Respondendo aos objetivos da presente pesquisa, após analisar o comportamento das imagens infravermelhas, observou-se que a cor do revestimento e sua respectiva absorvância apresentaram influência na detecção dos defeitos na fase de aquecimento das peças, tanto em termos qualitativos (visualização do defeito) quanto quantitativos (*Delta-T*). Porém, a partir do momento em que as peças entram em equilíbrio térmico com o ambiente e também na fase de resfriamento, a cor não demonstrou mais influência, uma vez que os resultados foram semelhantes para ambas as cores.

Percebeu-se também que, na fase de aquecimento, as falhas apresentam temperaturas superiores à região sã do painel. Isto ocorre, pois o ar, por ter condutividade térmica mais baixa do que a cerâmica, funciona como uma barreira para a troca de calor. Assim, a região da simulação de descolamento ganha calor com mais facilidade do que a superfície que apresenta boa aderência.

Já na fase de resfriamento, o oposto foi percebido, ou seja, a partir do momento em que os painéis passam a perder calor para o ambiente, os defeitos apareceram como regiões mais frias que a região

sã. Neste caso, a resistência térmica do painel é muito maior do que a massa dos defeitos de ar, e uma vez interrompido o aquecimento solar, a região sã ainda retém o calor enquanto o defeito de ar não possui a mesma capacidade, resfriando mais rapidamente.

Os defeitos foram simulados em duas profundidades diferentes em relação à superfície: 6 e 9mm. Em ambos os casos, a câmera termográfica conseguiu detectá-los, não sendo possível perceber diferença entre eles, seja em relação à qualidade da imagem (delineamento do defeito), ou em termos de variação de temperatura.

Em relação aos tamanhos das falhas, de uma maneira geral, verificou-se que o defeito de 3cm não pode ser registrado em alguns horários, mas que isso tem mais relação com a forma de resfriamento dos painéis (que ocorreu das bordas para o centro) do que com uma limitação da técnica.

Uma constatação importante que se chegou com este estudo é o quanto a variação das condições do entorno se mostra importante para a revelação dos defeitos, e o quanto pode ser complicado estabelecer uma relação entre os *Delta-Ts* e as variáveis que envolvem o ensaio, como velocidade do vento e umidade relativa do ar.

Na maioria dos casos, verificou-se que a realização do ensaio entre 10h00min e 16h00min não traz resultados satisfatórios, independente da cor. Para a cor branca, os melhores contrastes foram percebidos na fase de resfriamento das peças, a partir das 16h00min, com exceção da orientação leste, onde a radiação solar incidia diretamente sobre a superfície investigada no período matutino. Nos demais casos, era necessário um período de exposição maior para que as falhas fossem percebidas. Na cor preta, os maiores *Delta-Ts* foram detectados na fase de aquecimento (até as 11h00min), com exceção dos ensaios 5 (Oeste, plena, inverno) e 8 (Sul, plena, outono). Isso leva a crer que, quando a temperatura ambiente média estiver abaixo de 18°C ou quando a superfície analisada estiver voltada para o sul, é necessário um período de aquecimento maior para um diagnóstico correto.

Os resultados obtidos nos ensaios 01, 02 e 03 (orientação leste) podem ser comparados àqueles demonstrados por Bauer *et al* (2016), cuja inspeção termográfica também foi realizada em uma fachada voltada para a mesma orientação solar. Embora não tenham feito um comparativo entre as cores, os autores estudaram a evolução das temperaturas e dos *Delta-Ts* em uma fachada revestida com argamassa, e utilizaram os termogramas para avaliar os danos ocorridos por fissuração no revestimento. Como resultado, os autores encontraram o maior *Delta-T* entre 9h00min e 11h00min, caindo fortemente até as

14h00min onde estabilizaram próximos de 1°C. Considerando as condições da fachada estudada, nota-se que os resultados obtidos foram semelhantes ao que se percebeu nesta pesquisa. Em ambos os casos, observou-se um maior Delta-T na fase de aquecimento dos painéis, até as 11h00min, e o período matutino foi considerado o melhor período para realizar as inspeções. No entanto, nesta pesquisa, os contrastes térmicos também se mostraram bem delineados na fase de resfriamento (a partir das 16h00min). Isso pode ter ocorrido, entre outros fatores, pela diferença no tamanho e profundidade dos defeitos, que afetam a resistência térmica do conjunto, facilitando a visualização nos termogramas.

Após estas considerações, conclui-se que a termografia infravermelha passiva é uma ferramenta importante e bastante eficaz na detecção de falhas de aderência em revestimentos cerâmicos, mas que o desconhecimento de algumas variáveis pode levar a conclusões equivocadas. As investigações em campo se mostraram muito complexas, principalmente pela variabilidade das condições climáticas, indicando a importância de investimentos em outros estudos.

## 5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Sugerem-se como pesquisas futuras:

- O tamanho reduzido dos painéis restringiu algumas análises importantes neste estudo. Por exemplo, quando se investiga a fachada de um edifício, não se tem a informação de qual região está sã e qual região está com defeito. O ideal, nesses casos, é utilizar um *Delta-T* médio a cada pano de fachada analisada. Como os painéis usados eram relativamente pequenos, houve um resfriamento muito intenso nas bordas, inviabilizando essa análise. Desta forma, sugere-se que os próximos trabalhos sejam realizados em modelos maiores ou, melhor ainda, em fachadas de edificações reais.
- Sugere-se também que nos próximos estudos seja medida a radiação solar que chega à superfície no dia do ensaio. No presente caso, os ensaios foram realizados em dias de insolação plena e parcial (com nuvens), assim acredita-se que uma medida numérica de quantidade de radiação solar poderá aprimorar os resultados e melhor explicar a influência da presença de nuvens durante os ensaios.

## 6. REFERÊNCIAS

AVDELIDIS, N.P.; MOROPOULOU, A. **Emissivity Considerations in Building Thermography. Energy and Buildings**, v.35 (2003) p.663-667.

**ASTM 1933-99 (1999)** - Standard test methods for measuring and compensating for emissivity using infrared, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.

**ASTM E1862-97 (2010)** Standard test methods for measuring and compensating for reflected temperature using infrared imaging radiometers, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.

BARREIRA, E.; FREITAS, V.P. **Evaluation of Buildings Materials Using Infrared Thermography. Construction and Building Materials**, v.21 (2007) p.218-224.

BARREIRA, E. S. B. M. **Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios**. 2004. 196 f. Dissertação (Mestrado em Construção de Edifícios) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; OLIVEIRA FILHO, A. H.; PAVÓN, E. **Critérios para aplicação da termografia de infravermelho passiva como técnica auxiliar ao diagnóstico de patologias em fachadas de edifícios**. In: 1º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado, Salvador. 2014.

BAUER, E.; PAVÓN, E.; HILDENBERG, A. **Erros na utilização de parâmetros termográficos da argamassa e da cerâmica na detecção de anomalias em revestimentos**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2015, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, 2015.

BAUER, E.; PAVÓN, E.; OLIVEIRA, E.; PEREIRA, C. H. F. **Facades inspection with infrared thermography: cracks evolution**. J. Build Rehabil - DOI 10.1007/s41024-016-0002-9. 2016.

BENTO, J. J. J. **Patologias em revestimentos cerâmicos colados em paredes interiores de edifícios**. 2010. 166 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto, 2010.

CALDEIRA, M. M.; PADARATZ, I. J.; BRUDNA, L. **Emprego da termografia infravermelha para avaliação da qualidade de aderência entre concreto e PRFV utilizando diferentes tipos de aquecimento**. In: IX Congresso Internacional sobre Patologias e Recuperação de Estruturas, Paraíba. 2013.

CASTENEDO, C. I. **Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulse Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase**. Tese de Doutorado, Faculté des Sciences et de Génie Université Laval Québec, 2007.

CERDEIRA, F. *et al.* **Applicability of infrared thermography to the study of the behaviour of stonepanels as building envelopes**. Energy and Buildings. 43, 1845–1851. Elsevier, 2011.

CHRZANOWSKI, K.; **“Non-Contact Thermometry - Measurement errors”**, SPIE PL, Research and development Treaties, Vol. 7, Warsaw, 2001.

CORTIZO, E.C. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações: ênfase em edificações do patrimônio histórico**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

EDIS, E; FLORES-COLEN, I; BRITO, J. **Effect of the inspection conditions on the in-situ infrared thermographic examination of facades with adhered ceramic cladding**. XII |

DBMC – 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components. Volume 2 - Theme 4 – Building Pathology versus Durability (Methodologies of Research). pp. 957-964, 2011.

FREITAS, J. G. **A influência das condições climáticas na durabilidade dos revestimentos de fachada:** Estudo de caso na cidade de Goiânia. 2012. 163 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás. 2012.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo.** — 5. ed. — São Paulo : Studio Nobel, 2001.

GARCIA, J. R. R. **Potencialidades da termografia para o diagnóstico de patologias em edifícios.** 2014. 158 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto, 2012.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 6<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Sexta edição. 2008. 657 p.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 2. ed. São Paulo: PW editores, 2014. v. 1. 382p.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PAPS, A. L.. **Desempenho térmico das edificações.** Laboratório de Eficiência Energética, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

MALDAGUE, X. **Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing.** John Wiley & Sons, NY, 2001.

MALDAGUE, X.; MATINERI, S. **Pulse Phase Infrared Thermography.** J. Appl. Phys. 79(5) 2694-2698. 1996.

MALDAGUE, X.; GALMICHE, F.; ZIADI, A. **Advances in Pulse Phase Thermography**. Infrared and Technology, 43:175-181. Canadá, 2002.

MARINOSKI, D. L.; ORIGE, L. P.; GUESSER, A.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. **Análise comparativa de valores de refletância solar de superfícies opacas utilizando diferentes equipamentos de medição em laboratório**. In: XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2013, Brasília. Anais... Brasília, 2013.

MARINOSKI, D.L., SOUZA, G. T., SANGOI, J. M., LAMBERTS, R. **Utilização de imagens em infravermelho para análise térmica de componentes construtivos**. Anais do ENTAC 2010, Gramado-RS, 2010.

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. **Fundamentos de Física**. 3ª ed. São Paulo: Editora Scipione., 2006. 416 p.

MELRINHO, A. C. E; **Anomalias em impermeabilizações de coberturas de terraço: Detecção de termografia por infravermelhos**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

MONTANINI, R. **Quantitative Determination of Subsurface Defects in a Reference Specimen Made of Plexiglas by Means of Lock-in and Phase Thermography**. Infrared Physics and Technology, Vol. 53, pp.363-371. Messina, Italy, 2010.

MODEST, M. F. **Radiative Heat Transfer**. 2ª ed. Elsevier Science (USA), 1993.

PEDRA, S. A. **Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao design do conforto térmico de alvenaria estrutural**. 2011. Dissertação (Mestrado em Design) Programa de Pós Graduação em Design, Universidade do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

PEREIRA, C. D. **Influência da refletância e da emitância de superfícies externas no desempenho térmico de edificações**.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Tese de Doutorado. Florianópolis, 2014.

PEREIRA, J. C. A. **Contribuição para a Análise de Manifestações Patológicas em Madeira na Construção com Recurso à Termografia**. 2014. 171 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Superior de Tecnologia. Instituto Politécnico de Castelo Branco. 2014.

PEREIRA, C. D.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S.; GHISI, E. **Relatório de avaliação do espectrômetro portátil ALTA II**. Relatório de Pesquisa, CB3E, 2015. Disponível: <http://www.cb3e.ufsc.br/publicacoes>, acesso em 10/06/2015.

RODRÍGUEZ, F. J. L. **Deteção de Defeitos em Materiais Cerâmicos**. 2010. 150 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

ROSCOE, M. **Patologias em sistemas cerâmicos de fachadas**. 2008. Monografia. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

RUDDOCK, W. *Infrared Instruments Come of Age*. 2004. Advanced Infrared Resources [online]. <<http://www.infraredthermography.com/mvarticle.htm>>, acessado em Maio de 2015.

SILVA, D. D. S. **Diagnóstico de patologias em fachadas utilizando termografia**. 2012. 132 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto, 2012.

SANTOS, W. N.; GREGORIO F<sup>o</sup>, R. **Propriedades Termofísicas dos Polímeros por Métodos Transiente de Troca de Calor**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, n<sup>o</sup> 4, p. 265-269, 2003.

SANTOS, L. **Termografia Infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas**. 2006. 129 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Energia. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2006.

**SOUZA, G. T. Utilização de imagens em infravermelho para análise térmica de componentes construtivos.** 2010. 27 f.. Projeto de Pesquisa. Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

**TANCREDI, D. C. Uso da termografia infravermelha pulsada na detecção de defeitos em amostras planas.** 2011. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade do Estado de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

**TAVARES, S.G. Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

**VERATTI, A.B. Manual do curso de formação de termografista nível I do ITC *Infrared Training Center*.** Rev. 1.1 Publi. N° 1560063\_E-pt/BR – Cap. 1/14. São Paulo 2011.

**W, Y.; Li, D.; Lui, L.; Bai, J.; Feng, J. Thermographic Method for Evaluation of Thermal Influence of Exterior Surface Colour of Buildings.** 2008 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Applications, edited by Shenghua Ye, Guangjun Zhang, Jun Ni, Proc. Of SPIE Vol.7160 716037.