

MARIANA MARTINO CALDEIRA

**APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PARA  
IDENTIFICAÇÃO DE DANOS NA ADERÊNCIA ENTRE  
CONCRETO E POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ivo José Padaratz,  
PhD

Coorientador: Prof. Saulo Güths, Dr.

Florianópolis  
2016

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

Caldeira, Mariana Martino

Aplicação da Termografia Infravermelha para Identificação de Danos na Aderência entre Concreto e Polímero Reforçado com Fibras / Mariana Martino Caldeira ; orientador, Ivo José Padaratz – Florianópolis, SC, 2016.  
230 p.

Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referência

1. Engenharia Civil. 2. Termografia infravermelha. 3. Polímeros reforçados com fibras. 4. Concreto. 5. Aderência. I. Padaratz, Ivo José. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

MARIANA MARTINO CALDEIRA

**APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PARA  
IDENTIFICAÇÃO DE DANOS NA ADERÊNCIA ENTRE  
CONCRETO E POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “DOUTOR” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Florianópolis, 26 de fevereiro de 2016.

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do PPGEC

**Banca Examinadora:**

---

Ivo José Padaratz, PhD  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Saulo Güths, Dr.  
Co-orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Elton Bauer, Dr.  
Universidade de Brasília

---

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, PhD  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Philippe Jean Paul Gleize, PhD  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Roberto Lamberts, PhD  
Universidade Federal de Santa Catarina

*Dedico este trabalho em memória de minha querida tia Nazaré Martino de Sá, uma das maiores apoiadoras e incentivadoras de meus estudos.*



## AGRADECIMENTOS

Especialmente à minha família: meus pais Max e Joana, minha irmã Renata e à Lúcia pelo apoio incondicional a meus estudos desde sempre.

Ao Professor Ivo, que sempre me orientou e me incentivou com conselhos valiosos.

À Professora Henriette, que lecionou a maior parte das disciplinas que cursei e sempre me serviu de inspiração profissional.

Aos queridos colegas Paulo, Mateus, Gustavo Savaris e ao Bolsista Felipe Simoni que participaram ativamente de minha pesquisa, me auxiliando nos momentos mais difíceis.

À todos os colegas da salinha o meu imenso agradecimento pelo incentivo e pelos auxílios acadêmicos.

Às duas grandes amigas do Doutorado: Beth e Flávia. Obrigada por sempre poder contar com vocês em todos os momentos tanto acadêmicos quanto pessoais.

Às amigas: Bruna, Cris, Heloise, Joana e Luana por me acolherem desde o início com tanto carinho em Florianópolis.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa sanduíche no exterior.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro da pesquisa.

À empresa STRATUS COMPOSTOS ESTRUTURAIS, pelo fornecimento de material para confecção dos corpos de prova.



Ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), por ter concedido a licença para cursar o Doutorado e por ter acreditado em mim para levar conhecimento à esta Autarquia.



## RESUMO

Em estruturas de concreto reforçadas com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), a aderência entre o PRF e o concreto deve ser analisada, uma vez que falhas nessa interface podem promover enfraquecimento do reforço. Por meio da técnica não destrutiva de termografia infravermelha é possível detectar e avaliar tais falhas. A proposta desta pesquisa é utilizar a termografia infravermelha ativa e passiva para analisar danos subsuperficiais na interface PRF/concreto. Aplicando-se a termografia infravermelha ativa, são pesquisados: diferentes equipamentos para excitação térmica e quais as influências disso na identificação do dano nas imagens infravermelhas. A partir da escolha de um tipo de excitação térmica, faz-se a análise do cálculo de contraste térmico para avaliar a delaminação em vigas reforçadas por PRF. Para a termografia infravermelha passiva, foram realizadas análises quantitativas para avaliação de danos entre concreto e PRF. Uma delas apresenta uma técnica para dimensionamento da extensão do dano e a outra compara, por métodos estatísticos, a temperatura no defeito quando variados o tempo de exposição solar, tipo de reforço, dimensão e tipo de dano e ainda diferentes matrizes de colagem. Os resultados das análises qualitativas mostram que a termografia infravermelha promove notável identificação de falhas subsuperficiais entre concreto e PRF. As análises quantitativas também foram bem sucedidas. A técnica para dimensionamento do dano teve erro abaixo de 15%. A utilização de análise estatística mostrou que o tempo de exposição solar é o elemento que mais influência na temperatura do defeito. Em relação a avaliação da câmera infravermelha, observou-se que a inserção correta da emissividade é de caráter essencial para se obterem imagens infravermelhas confiáveis.

**Palavras-chaves:** Termografia Infravermelha. Polímeros Reforçados com Fibras. Reforço. Concreto. Aderência.



## ABSTRACT

Concrete structures strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP) need inspection at FRP/concrete interface, once damages at this interface can promote the weakening of strengthening system. The infrared thermography is a non-destructive technique that may detect and assess such damages. The purpose of this research is to use active and passive infrared thermography to analyze subsurface damages at FRP/concrete interface. Different sources of heating were used in order to produce thermal excitation and its influence in identifying damages on infrared images analyzed, when applied active infrared thermography. Afterwards, choosing one type of heating and calculating the thermal contrast of images, was investigated the delamination in beams strengthened with FRP by calculating the thermal contrast. Quantitative analyses were performed to assess damage between concrete and FRP by using passive infrared thermography. One of them presents a technique for quantifying the damages and the other compares defects' temperatures when the time of sun exposure, type of strengthening, size and type of damages and still different matrices of bonding are varied. The results of qualitative analysis show that, in general, subsurface damages between concrete and FRP are remarkable identified by infrared thermography. Quantitative analyses were also successful. The error of the technique to quantify the damages was below 15%. Statistical analysis shows that the time of exposure to sunlight is the factor that most influences the defect temperature. Regarding the evaluation of the infrared camera, the correct insertion of the emissivity was essential to obtain reliable infrared images.

**Keywords:** Infrared thermography. Fiber Reinforced Polymer. Strengthening. Concrete. Adherence.



# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>31</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	31
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....	37
1.3 OBJETIVO GERAL.....	39
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	39
1.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	40
1.6 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS E ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	40
<b>CAPÍTULO 2 - PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....</b>	<b>45</b>
2.1 CONCEITOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	45
<b>2.1.1 Emissividade.....</b>	<b>47</b>
<b>2.1.2 Lei de Stefan Boltzman.....</b>	<b>50</b>
<b>2.1.3 Intercepção da radiação em um corpo.....</b>	<b>50</b>
2.2 CÂMERA INFRAVERMELHA.....	52
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA CAPTAÇÃO DE IMAGENS INFRAVERMELHAS.....	59
<b>2.3.1 Qualificação do termografista.....</b>	<b>61</b>
<b>2.3.2 Escolha da câmera infravermelha.....</b>	<b>63</b>
<b>2.3.3 Influência da emissividade.....</b>	<b>64</b>
<b>2.3.4 Condições ambientais.....</b>	<b>66</b>
<b>2.3.5 Temperatura do ambiente.....</b>	<b>66</b>
<b>2.3.6 Chuva e umidade do ar.....</b>	<b>67</b>
<b>2.3.7 Radiação solar.....</b>	<b>68</b>
<b>2.3.8 Vento.....</b>	<b>68</b>
<b>2.3.9 Transmissividade atmosférica.....</b>	<b>69</b>
<b>CAPÍTULO 3 - TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA COMO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO.....</b>	<b>73</b>
3.1 TÉCNICAS DE UTILIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....	73
<b>3.1.1 Termografia infravermelha passiva.....</b>	<b>73</b>
<b>3.1.2 Termografia infravermelha ativa.....</b>	<b>74</b>
<i>3.1.2.1 Termografia Infravermelha Pulsada.....</i>	<i>75</i>
<i>3.1.2.2 Termografia infravermelha de aquecimento de pulso longo (Step Heating).....</i>	<i>77</i>
<i>3.1.2.3 Termografia infravermelha modulada (ou dinâmica).....</i>	<i>78</i>
<i>3.1.2.4 Vibrotermografia.....</i>	<i>78</i>

3.2 APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NA ENGENHARIA CIVIL.....	79
<b>CAPÍTULO 4 - ESTRUTURAS DE CONCRETO UNIDAS A POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS E A TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....</b>	<b>83</b>
4.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO UNIDAS A POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS (PRF).....	83
<b>4.1.1 Lajes e vigas mistas de concreto com perfil pultrudado de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV).....</b>	<b>83</b>
<b>4.1.2 Recuperação e reforço externo de estruturas.....</b>	<b>85</b>
4.2 ADERÊNCIA DO PRF AO CONCRETO.....	87
4.3 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NA DETECÇÃO DE DANOS NA ADERÊNCIA.....	94
<b>CAPÍTULO 5 - TIPOS DE EXCITAÇÃO TÉRMICA PARA DETECÇÃO DE FALHAS NA ADERÊNCIA CONCRETO/PRF POR TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA ATIVA.....</b>	<b>99</b>
5.1 INTRODUÇÃO.....	99
5.2 MATERIAIS E CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS.....	101
5.3 AQUECIMENTO DAS AMOSTRAS.....	104
5.4 INSTRUMENTAÇÃO.....	105
5.5 RESULTADOS E ANÁLISES.....	107
<b>5.5.1 Amostras do grupo 1 com aquecimento por lâmpada incandescente.....</b>	<b>107</b>
<b>5.5.2 Amostras do grupo 1 com aquecimento por estufa.....</b>	<b>108</b>
<b>5.5.3 Amostras do grupo 1 com aquecimento por termoventilador .....</b>	<b>110</b>
<b>5.5.4 Amostras do grupo 1 com aquecimento por lâmpada mista de mercúrio.....</b>	<b>111</b>
<b>5.5.5 Amostras do grupo 1 com aquecimento por aquecedor halógeno.....</b>	<b>112</b>
<b>5.5.6 Amostras do grupo 1 com aquecimento por soprador térmico .....</b>	<b>113</b>
<b>5.5.7 Amostras do grupo 2 com aquecimento por lâmpada incandescente.....</b>	<b>115</b>
5.6 ANÁLISES FINAIS.....	117
<b>CAPÍTULO 6 - TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA ATIVA APLICADA À ANÁLISE DE CONTRASTE TÉRMICO PARA DELAMINAÇÃO ENTRE CONCRETO/PRF.....</b>	<b>119</b>
6.1 INTRODUÇÃO.....	119
<b>6.1.1 Contraste térmico.....</b>	<b>120</b>
6.2 MATERIAIS E CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS.....	125

6.3 INSTRUMENTAÇÃO.....	127
6.4 RESULTADOS E ANÁLISES.....	130
6.5 ANÁLISES FINAIS.....	140
<b>CAPÍTULO 7 - DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DE DEFEITOS SUBSUPERFICIAIS NA ADERÊNCIA CONCRETO/PRF POR TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PASSIVA.....</b>	<b>143</b>
7.1 INTRODUÇÃO.....	143
7.2 MATERIAIS E CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRA.....	145
7.3 INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	148
7.4 RESULTADOS E ANÁLISES.....	151
7.5 DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DOS DEFEITOS.....	162
7.6 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DOS DEFEITOS.....	166
7.7 ANÁLISES FINAIS.....	170
<b>CAPÍTULO 8 - TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PASSIVA NA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA TEMPERATURA DE DEFEITO SUBSUPERFICIAL ENTRE CONCRETO E PRF.....</b>	<b>173</b>
8.1 INTRODUÇÃO.....	173
<b>8.1.1 Análise estatística aplicada a termografia infravermelha.....</b>	<b>174</b>
<b>8.1.2 Análise de variância (ANOVA).....</b>	<b>175</b>
8.2 MATERIAIS E CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS.....	178
8.3 AQUISIÇÃO DE DADOS.....	181
8.4 INSTRUMENTAÇÃO.....	181
8.5 RESULTADOS E ANÁLISES.....	183
<b>8.5.1 Perfil de temperatura dos defeitos.....</b>	<b>183</b>
<b>8.5.2 Análise de Variância (ANOVA).....</b>	<b>189</b>
8.5.2.1 Tipo de reforço x Tempo de aquecimento solar.....	191
8.5.2.2 Tipo de matriz x Tempo de aquecimento solar.....	192
8.5.2.3 Tipo de defeito x Tempo de aquecimento solar.....	193
8.5.2.4 Tipo de reforço x Dimensão do defeito.....	194
8.6 ANÁLISES FINAIS.....	195
<b>CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>199</b>
9.1 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	199
9.2 CONCLUSÕES GERAIS.....	200
9.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	201
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>203</b>
<b>APÊNDICE A - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE INSERÇÃO DA CÂMERA INFRAVERMELHA.....</b>	<b>219</b>

A.1 INTRODUÇÃO.....	219
A.2 MATERIAIS E CARACTERÍSTICAS AS AMOSTRAS.....	220
A.3 INSTRUMENTAÇÃO.....	220
A.4 RESULTADOS E ANÁLISES.....	223
<b>A.4.1 Distância da lente ao objeto.....</b>	<b>224</b>
<b>A.4.2 Temperatura ambiente e umidade relativa.....</b>	<b>227</b>
<b>A.4.3 Emissividade.....</b>	<b>228</b>
A.5 ANÁLISES FINAIS.....	229

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Ponte Ibach, na Suíça, com o detalhe do local danificado. .....	33
Figura 1.2 – (a) Lâminas de PRFC, (b) Execução do reforço: colagem das lâminas ao concreto.....	33
Figura 1.3 – (a) Aplicação de epóxi de colagem na viga, (b) aplicação de epóxi de colagem nas tiras de PRF.....	34
Figura 1.4 – (c) Tiras de PRF prontas para colagem, (d) Aplicação das tiras de PRF nas vigas da ponte.....	35
Figura 1.5 – (e) Finalização da colagem de uma das tiras com rolo de tinta, (f) Reforço concluído e resultado final.....	35
Figura 2.1: Espectro de radiação eletromagnética (INCROPERA et al., 2008).....	47
Figura 2.2 – Absorção, reflexão e transmissão da radiação incidente em material semitransparente (ÇENGEL, 2012).....	51
Figura 2.3 – (a) Sistema de detecção por varredura. 1) Detector; 2) Lente; 3) Espelho de deflexão horizontal; 4) Espelho de deflexão vertical; 5) Lente; 6) Objeto; 7) Ponto de medição. (b) Sistema com Matriz de Plano Focal. 1) Objeto; 2) Lente; 3) Detectores. (TAN et al., 2009).....	53
Figura 2.4 – (a) Sistema de detecção por Matriz de Plano Focal formada por microbolômetros (detectores térmicos). (b) Microbolômetro. (c) Detalhamento de um microbolômetro.....	54
Figura 2.5 – Espectro eletromagnético e as faixas espectrais utilizadas na fabricação de câmeras infravermelhas.....	55
Figura 2.6: Transmissividade atmosférica na região do infravermelho para uma camada de ar de 1.830 m de espessura, ao nível do mar contendo, contendo 17 mm de água precipitável (ROGALSKI; CHRZANOWSKI, 2002).....	56
Figura 2.7: Campo de visão (FOV) e campo de visão instantâneo (IFOV) de uma câmera de 160 x 120 pixels, IFOV 3,1 mrad e FOV 28° x 21°.....	58
Figura 2.8 – Representação esquemática da situação da medição termográfica geral. 1) meio adjacente, 2) objeto, 3) atmosfera, 4)	

câmera. $T_{obj}$ - 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 (MANUAL DO UTILIZADOR FLIR, 2010).....	60
Figura 2.9 – Emissividade em função do ângulo de visão (Holst, 2000). .....	65
Figura 4.1: Laje mista de concreto e PRFV. (SANTOS NETO, 2006). .....	84
Figura 4.2: Localizações de possíveis falhas na interface (BEBER, 2003).....	89
Figura 4.3 – Descolamentos na interface concreto/PRF iniciado na extremidade do PRF: (a) Separação do concreto de cobertura, (b) Descolamento interfacial iniciado na extremidade da placa (Teng et al., 2003).....	91
Figura 4.4 – Descolamentos na interface concreto/PRF iniciado longe da extremidade do PRF devido a fissuras intermediárias: (a) Descolamento interfacial induzido por fissuras de flexão intermediárias, (b) Descolamento interfacial induzido por fissuras de flexão-cisalhamento intermediárias (Teng et al., 2003).....	91
Figura 4.5: Detalhes da fissuração de flexão-cisalhamento que leva ao descolamento do compósito do concreto (MEIER, 1995).....	93
Figura 4.6 – (a) 1,4”x1,4” defeito de ar (b) 2”x2” defeito de ar, (c) 3”x3” defeito de ar (HALABE; DUTTA; GANGARAO, 2008).....	95
Figura 4.7 – Simulação de diferentes defeitos em bloco de concreto: (a) antes da colagem do PRFC; (b) depois da colagem de PRFC (DUMOULIN et al., 2010).....	96
Figura 5.1 – Corpos de prova do grupo 1 (medidas em cm).....	103
Figura 5.2 – Corpos de prova do grupo 2 (medidas em cm).....	104
Figura 5.3: Imagem dos corpos de prova do grupo 2 com a face de PRFV virada para baixo.....	104
Figura 5.4: Câmera FLIR B400, utilizada nesta etapa experimental. .	106
Figura 5.5 – CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por lâmpada incandescente.....	108

Figura 5.6 – CP2, grupo 1, EPS D=2 cm, aquecido por lâmpada incandescente.....	108
Figura 5.7 – CP3, grupo 1, EPS D=6 cm, aquecido por lâmpada incandescente.....	108
Figura 5.8 – CP4, grupo 1, EPS D=10 cm, aquecido por lâmpada incandescente.....	108
Figura 5.9 – CP1, grupo1, aderência completa, estufa, temp. mais altas. ....	109
Figura 5.10: –CP1, grupo1, aderência completa, estufa, temp. mais baixas.....	109
Figura 5.11 – CP2, grupo1, EPS D = 2 cm, estufa, temp. mais altas...109	
Figura 5.12 – CP2, grupo1, EPS D = 2 cm, estufa, temp. mais baixas. ....	109
Figura 5.13 – CP3, grupo1, EPS D = 6 cm, estufa, temp. mais altas...109	
Figura 5.14 – CP3, grupo1, EPS D = 6 cm, estufa, temp. mais baixas. ....	109
Figura 5.15 – CP4, grupo1, EPS D = 10 cm, estufa, em fusão, temperaturas mais altas.....	110
Figura 5.16 – CP4, grupo1, EPS D = 10 cm, estufa, em fusão, temperaturas mais baixas.....	110
Figura 5.17 – CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por termoventilador.....	111
Figura 5.18 – CP2, grupo 1, EPS D = 2 cm, aquecido por termoventilador.....	111
Figura 5.19– CP3, grupo 1, EPS D = 6 cm, aquecido por termoventilador.....	111
Figura 5.20 – CP4, grupo 1, EPS D=10 cm, aquecido por termoventilador.....	111
Figura 5.21 – CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por lâmpada mista.....	112
Figura 5.22 – CP2, grupo 1, EPS D = 2 cm, aquecido por lâmpada mista. ....	112
Figura 5.23 – CP3, grupo 1, EPS D = 6 cm, aquecido por lâmpada mista. ....	112

Figura 5.24 – CP4, grupo 1, EPS D = 10 cm, aquecido por lâmpada mista.....	112
Figura 5.25 – CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por aquecedor halógeno.....	113
Figura 5.26 – CP2, grupo 1, EPS D = 2 cm, aquecido por aquecedor halógeno.....	113
Figura 5.27 – CP3, grupo 1, EPS D = 6 cm, aquecido por aquecedor halógeno.....	113
Figura 5.28 – CP4, grupo 1, EPS D = 10 cm, aquecido por aquecedor halógeno.....	113
Figura 5.29 – CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por soprador térmico.....	114
Figura 5.30 – CP2, grupo 1, EPS D = 2 cm, aquecido por soprador térmico.....	114
Figura 5.31 – CP3, grupo 1, EPS D = 6 cm, aquecido por soprador térmico.....	114
Figura 5.32 – CP4, grupo 1, EPS D = 10 cm, aquecido por soprador térmico.....	114
Figura 5.33 – Absorção de calor dos materiais 1) argamassa, 2) PRFV, 3) Resina epóxi, 4) EPS.....	115
Figura 5.34 – CP1, grupo 2, espessura 2 cm.....	116
Figura 5.35 – CP2, grupo 2, espessura 3 cm.....	116
Figura 5.36 – CP3, grupo 2, espessura 4 cm.....	116
Figura 5.37 – CP4, grupo 2, espessura 5 cm.....	116
Figura 5.38 – CP5, grupo 2, espessura 6 cm.....	117
Figura 5.39 – CP6, grupo 2, espessura 7 cm.....	117
Figura 6.1 – Exemplo de curva de evolução do contraste térmico experimental (MALDAGUE, 2001).....	124
Figura 6.2: Esquema de viga reforçada por chapa pultrudada de PRFC ou PRFV.....	126
Figura 6.3 – Esquema de viga reforçada por laminado de PRFC.....	126
Figura 6.4 – Vista superior do esquema de aquecimento da extremidade esquerda da viga reforçada (medidas em cm).....	129
Figura 6.5: Vista lateral esquerda do esquema de aquecimento da extremidade da viga reforçada (medidas em cm).....	129

Figura 6.6 – Gráfico do contraste absoluto ao longo do tempo para vigas reforçadas por laminado de carbono submetidas a diferentes tempos de aquecimento.....	132
Figura 6.7 – Gráfico do contraste absoluto ao longo do tempo para vigas reforçadas por pultrudado de carbono comparando diferentes tempos de aquecimento.....	132
Figura 6.8 – Gráfico do contraste absoluto ao longo do tempo para vigas reforçadas por pultrudado de vidro comparando diferentes tempos de aquecimento.....	133
Figura 6.9 – Gráfico do decaimento de temperatura ao longo do tempo para a vigas intactas (LCI, PCI e PVI).....	134
Figura 6.10 – Gráfico do contraste padrão ao longo do tempo para vigas reforçadas com laminado de carbono comparando diferentes tempos de aquecimento.....	135
Figura 6.11 – Gráfico do contraste absoluto ao longo do tempo para vigas reforçadas com laminado de carbono comparando diferentes tempos de aquecimento.....	135
Figura 6.12 – Gráfico do contraste absoluto ao longo do tempo para vigas reforçadas com laminado de carbono submetidas a diferentes tempos de aquecimento.....	135
Figura 6.13 – Gráfico do contraste padrão ao longo do tempo para aquecimento de 10 minutos comparando os diferentes tipos de reforços. ....	136
Figura 6.14 – Imagem infravermelha da viga LCR imediatamente após cessar o aquecimento.....	137
Figura 6.15 – Imagem infravermelha da viga LCR 1 minuto após cessar o aquecimento (imagem ideal).....	137
Figura 6.16 – Imagem infravermelha da viga LCR 2 minutos após cessar o aquecimento.....	137
Figura 6.17 – Imagem infravermelha da viga PCR imediatamente após cessar o aquecimento.....	138
Figura 6.18 – Imagem infravermelha da viga PCR 1minuto após cessar o aquecimento (imagem ideal).....	138
Figura 6.19 – Imagem infravermelha da viga PCR 2 minutos após cessar o aquecimento.....	138

Figura 6.20 – Imagem infravermelha da viga PVR imediatamente após cessar o aquecimento.....	138
Figura 6.21 – Imagem infravermelha da viga PVR 1 minuto após cessar o aquecimento.....	138
Figura 6.22 – Imagem infravermelha da viga PVR 2 minutos após cessar o aquecimento (imagem ideal).....	139
Figura 6.23 – Imagem infravermelha da viga PVR 3 minutos após cessar o aquecimento.....	139
Figura 6.24 – Imagem fotográfica da viga LCR, lado esquerdo, na qual não se visualiza a delaminação a olho nu.....	139
Figura 6.25 – Imagem fotográfica da viga PCR, lado esquerdo, na qual não se visualiza a delaminação a olho nu.....	139
Figura 6.26 – Imagem fotográfica da viga PVR, lado esquerdo, na qual não se visualiza a delaminação a olho nu.....	140
Figura 7.1 – Mantas unidirecionais: (a) Fibra de carbono; (b) Fibra de vidro.....	146
Figura 7.2 – Amostras em concreto moldadas na superfície com 5mm de espessura de argamassa antes de serem reforçadas pela mesma manta de PRF (dimensões em cm).....	147
Figura 7.3 – Amostra após o reforço com PRF (usando como exemplo o Tipo 1). PRF podendo ser PRFC ou PRFV. Matriz podendo ser epoxídica ou cimentícia (dimensões em cm).....	148
Figura 7.4 – Câmera FLIR P620, utilizada nesta etapa experimental. ....	149
Figura 7.5 – Posição da câmera infravermelha à esquerda e imagens das amostras à direita (dimensões em cm).....	150
Figura 7.6 – Amostras reforçadas com PRFC: (a) Posição dos defeitos. (b) Imagem infravermelha após o ajuste do nível de temperatura pelo programa FLIR Quick Report.....	152
Figura 7.7 – Amostras reforçadas com PRFC: (a) Posição dos defeitos. (b) Imagem infravermelha após o ajuste do nível de temperatura pelo programa FLIR Quick Report.....	152
Figura 7.8 – Perfil de temperatura sobre 3 defeitos de madeira na amostra GE1 (ao longo da linha à esquerda do termograma).....	155

Figura 7.9: Direção e dimensão dos perfis de temperatura para amostras do Tipo 1.....	155
Figura 7.10: Direção e dimensão dos perfis de temperatura para amostras do Tipo 2.....	155
Figura 7.11 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de madeira, CE1 .....	156
Figura 7.12 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de ar, CE1.....	156
Figura 7.13 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de EPS, CE2. ..	157
Figura 7.14 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de cortiça, CE2 .....	157
Figura 7.15 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de madeira, CC1 .....	157
Figura 7.16 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de ar, CC1..... ..	158
Figura 7.17 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de EPS, CC2. ..	158
Figura 7.18 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de cortiça, CC2 .....	158
Figura 7.19 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de madeira, GE1 .....	159
Figura 7.20 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de ar, GE1..... ..	159
Figura 7.21 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de EPS, GE2. ..	159
Figura 7.22 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de cortiça, GE2 .....	160
Figura 7.23 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de madeira, GC1 .....	160
Figura 7.24 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de ar, GC1.....	160
Figura 7.25 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de EPS, GC2. ..	161
Figura 7.26 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de cortiça, GC2 .....	161
Figura 7.27: Largura real do defeito, baseando-se no pico do gráfico (LAI et al., 2009 - Adaptado).....	162
Figura 8.1 – Manta unidirecional de PRFB.....	178
Figura 8.2 – Vista superior e corte AA' da viga antes do reforço e vista superior após o reforço (viga CE, GE ou BE). Dimensões em cm.....	180

Figura 8.3 – Amostra BC: (a) vista superior, (b) cortes AA', BB' e CC' da placa de concreto antes da colagem da manta de PRFB (dimensões em cm).....	180
Figura 8.4 – Posição da câmera infravermelha em relação às vigas BE, CE e GE (dimensões em cm).....	182
Figura 8.5 – Posição da câmera infravermelha em relação a amostra BC (dimensões em cm).....	182
Figura 8.6 – (a) Imagem infravermelha das vigas BE, CE e GE após 15 minutos de aquecimento solar apontando a direção tomada para as linhas do perfil de temperatura (do maior para o menor defeito). (b) Gráfico do perfil de temperatura sobre os 3 defeitos de ar (defeitos à esquerda da viga BE).....	183
Figura 8.7 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 5 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.....	184
Figura 8.8 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de madeira após 5 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.....	184
Figura 8.9 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 8 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.....	184
Figura 8.10 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de madeira após 8 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.....	185
Figura 8.11 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.....	185
Figura 8.12 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.....	185
Figura 8.13 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as amostras BE e BC.....	186
Figura 8.14 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de madeira após 15 minutos de aquecimento solar para as BE e BC.....	186
Figura 8.15 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.....	187
Figura 8.16 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.....	187
Figura 8.17 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.....	187

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Divisão da radiação infravermelha adotada pela NBR 15572:2008.....	54
Tabela 3.1 – Variação do estímulo térmico na aplicação de termografia ativa (Cortizo, 2007 - Adaptado).....	74
Tabela 5.1 – Características dos grupos de corpos de prova.....	102
Tabela 5.2 – Características da câmera infravermelha FLIR B400.....	106
Tabela 5.3 – Características térmicas dos materiais do ensaio (INCROPERA et al.,2008).....	115
Tabela 6.1 – Código das vigas.....	125
Tabela 6.2 – Características dos reforços de PRF, segundo o catálogo dos fabricantes.....	127
Tabela 6.3 – Informações de cargas de ruptura das vigas.....	128
Tabela 7.1 – Características das matrizes de colagem.....	145
Tabela 7.2 – Códigos das amostras.....	148
Tabela 7.3 – Características da câmera infravermelha FLIR P620.....	150
Tabela 7.4 – Características sobre o dia do aquecimento solar.....	151
Tabela 7.5 – Identificação visual de defeitos na imagem infravermelha considerando as amostras reforçadas com PFRC.....	153
Tabela 7.6 – Identificação visual de defeitos na imagem infravermelha considerando as amostras reforçadas com PFRV.....	153
Tabela 7.7 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, CE1.....	167
Tabela 7.8 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, CE2.....	167
Tabela 7.9 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, CC1.....	167
Tabela 7.10 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, CC2.....	168
Tabela 7.11 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, GE1.....	168
Tabela 7.12 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, GE2.....	168
Tabela 7.13 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, GC1.....	169
Tabela 7.14 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, GC2.....	169
Tabela 8.1 – Tabela ANOVA para experimento de dois fatores a x b	177
Tabela 8.2 – Códigos das amostras de acordo com sua composição...	179
Tabela 8.3 – Dados meteorológicos no momento do ensaio.....	181
Tabela 8.4 – Análise dos parâmetros: reforço (fator A) vs. tempo de aquecimento solar (fator B).....	190

Tabela 8.5 – Análise dos parâmetros: matriz (fator C) vs. tempo de aquecimento solar (fator B).....	190
Tabela 8.6 – Análise dos parâmetros: defeito (fator D) vs. tempo de aquecimento solar (fator B).....	190
Tabela 8.7 – Análise dos parâmetros: dimensão (fator E) vs. Reforço (B) .....	191
Tabela 8.8: Resultados da comparação de tipo de reforço (fator A) e o tempo de aquecimento solar (fator B).....	191
Tabela 8.9 – Resultado da tabela ANOVA comparando o tipo de matriz (fator C) e o tempo de aquecimento solar (fator B).....	193
Tabela 8.10 – Resultado da tabela ANOVA comparando o tipo de defeito (fator D) e o tempo de aquecimento (fator B).....	194
Tabela 8.11 – Resultado da tabela ANOVA comparando o tipo de reforço (fator A) e o tipo de defeito (fator E).....	195

## LISTA DE SIGLAS

- CC1: Placa de concreto reforçada com manta de polímero reforçado de carbono colada com matriz cimentícia, amostra tipo 1.
- CC2: Placa de concreto reforçada com manta de polímero reforçado de carbono colada com matriz cimentícia, amostra tipo 2.
- CE1: Placa de concreto reforçada com manta de polímero reforçado de carbono colada com matriz epoxídica, amostra tipo 1.
- CE2: Placa de concreto reforçada com manta de polímero reforçado de carbono colada com matriz epoxídica, amostra tipo 2.
- CP: Corpo de prova.
- FPA: Matriz de Plano Focal (ou *Focal Plane Array*).
- GE1: Placa de concreto reforçada com manta de polímero reforçado de vidro colada com matriz epoxídica, amostra tipo 1.
- GE2: Placa de concreto reforçada com manta de polímero reforçado de vidro colada com matriz epoxídica, amostra tipo 2.
- IFOV: campo de visão instantâneo (ou *Instantaneous Field of View*), é FOV: campo de visão total da imagem (ou *Field of View*).
- IFOV<sub>m</sub>: vide MIFOV.
- LCI: Viga de concreto intacta reforçada por laminado de carbono .
- LCR: Viga de concreto reforçada por laminado de carbono rompida parcialmente.
- MIFOV: campo de visão instantâneo de medida (ou *Measuring Instantaneous Field of View*).
- NETD: sensibilidade térmica (ou *Noise Equivalent Temperature Difference*).
- PCI: Viga de concreto intacta reforçada por pultrudado de carbono de carbono.
- PCR: Viga de concreto reforçada por pultrudado de carbono rompida parcialmente.
- PRF: Polímero Reforçado com Fibras.
- PRFB: Polímero Reforçado com Fibras de Basalto.
- PRFC: Polímero Reforçado com Fibras de Carbono.
- PRFV: Polímero Reforçado com Fibras de Vidro.
- PVI: Viga de concreto intacta reforçada por pultrudado de vidro .
- PVR: Viga de concreto reforçada por pultrudado de vidro rompida parcialmente.
- SRI: Viga de concreto intacta sem reforço.
- SRR: Viga de concreto sem reforço rompida parcialmente.



# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações gerais

Com o passar dos anos, o concreto tem evoluído aproveitando do avanço da tecnologia. Surgem com frequência novos componentes que inseridos em sua mistura podem promover novas características ao material, tais como maior resistência, melhor trabalhabilidade, maior leveza, entre outras propriedades que podem ser requeridas para cada caso.

Naturalmente, o avanço desta tecnologia alcança toda a construção civil atingindo não apenas o aperfeiçoamento do material, mas também as estruturas de concreto.

Constantemente surgem novos materiais que, aderidos a uma estrutura de concreto, fornecem a esta características desejáveis que talvez jamais fossem adquiridas com a utilização do tradicional conjunto concreto/aço.

Um forte motivo para a demanda de novos materiais associados às estruturas de concreto se deve ao fato de que atualmente as estruturas usuais, tradicionalmente elaboradas com concreto e aço, estão em processo de deterioração. Nos dias de hoje, muitas delas encontram-se na iminência de atingir o período de vida útil previsto inicialmente, evidenciando-se os efeitos do envelhecimento ou, em outros casos, observando-se o aparecimento da degradação prematura muito antes deste período (SANTOS NETO, 2006).

Sabe-se que uma estrutura usual, desde o momento de sua construção e ao longo de toda sua vida útil, está sujeita a agentes agressivos que por ações químicas e/ou físicas podem gerar o enfraquecimento mecânico de seus elementos. Percebe-se, portanto, que a corrosão natural das barras de aço altera as condições iniciais consideradas no projeto original, reduzindo assim vida útil prevista da estrutura.

Outro importante motivo que estimula a busca por novos materiais que trabalhem unidos ao concreto é o surgimento de projetos de estruturas mais arrojadas e até mesmo de reforços estruturais mais eficientes e práticos, uma vez que a construção civil tem requerido cada vez mais agilidade, leveza e rapidez do processo construtivo.

Conclui-se, portanto, pela observação de tantas edificações já construídas em concreto e aço, de variados tipos de projetos e idades, que estes materiais começam a se mostrar inadequados para

determinados casos. Dessa forma, tentando solucionar este problema, a busca por materiais mais modernos torna-se praticamente obrigatória.

Dentre esses materiais, destacam-se dois que têm obtido sucesso sendo utilizados individualmente ou unidos ao concreto, são eles: o polímero reforçado com fibras de vidro (PRFV), o polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) e ainda o polímero reforçado com fibras de basalto (PRFB), sendo este último material mais recente nas pesquisas. Estes são também denominados materiais compósitos que têm demonstrado ser solução para diversos problemas nos projetos e reforços estruturais devido a suas condições de leveza, flexibilidade, durabilidade, resistência, adaptabilidade (NUNES et al., 2006).

As principais formas de comercialização dos polímeros reforçados com fibras são: unidirecionais, bidirecionais ou multidirecionais, de acordo com a distribuição das fibras. Ainda podem ser classificados em sistemas pré-fabricados (como as chapas pultrudadas ou laminados) ou curados “in situ” (como as mantas) (ARQUEZ, 2010).

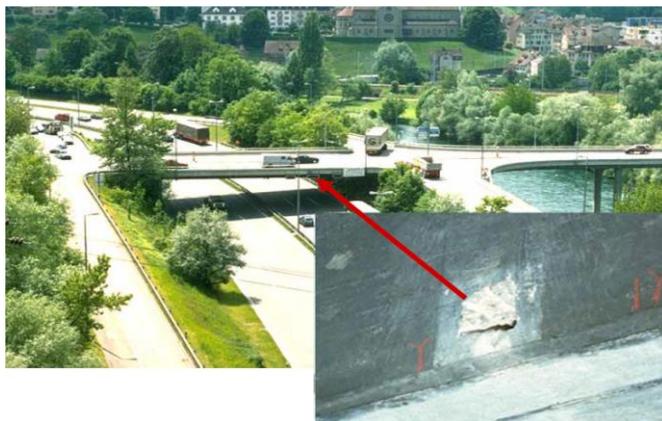
Dentro da Engenharia Civil, esses materiais são comumente associados ao concreto como reforços estruturais ou ainda como estruturas mistas, conferindo-lhes inúmeras vantagens em relação às tradicionais chapas de aço (SANTOS NETO, 2006):

- Maior resistência e durabilidade das placas;
- Menor peso;
- Facilidade no transporte;
- Versatilidade de forma e projeto;
- Redução do período de construção;
- Facilidade na preparação da superfície;
- Redução no uso de fixadores mecânicos.

De acordo com Meier (1995), um dos casos pioneiros na aplicação de um sistema de reforço com PRF ao concreto é o da ponte “Ibach”, próximo ao município de Lucerna, na Suíça. A ponte, concluída em 1969, foi acidentalmente danificada no ano de 1991 por um dos núcleos de perfuração realizados para montar sinais de tráfego. Durante processo de perfuração, alguns cabos de protensão foram completamente cortados. A Figura 1.1 mostra a ponte e o local danificado no detalhe.

O reforço foi executado por colagem externa de laminados de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) por resina epóxi, conforme mostram as Figuras 1.2 (a) e 1.2 (b). Foram necessários

apenas 3 laminados de PRFC sendo dois deles de dimensões 150 x 5000 x 1,75 mm e o outro de 150 x 5000 x 2,0 mm. Ao final, procedeu-se a um teste de carga com um veículo de 84 toneladas demonstrando que o reforço foi executado com sucesso. Os engenheiros destacaram a facilidade de aplicação do material e ainda constataram que o peso adicionado à estrutura foi de apenas 6,2 kg, diferentemente dos 175 kg que seriam adicionados, caso fosse adotado o aço como material do reforço (MEIER, 1995).



**Figura 1.1 – Ponte Ibach, na Suíça, com o detalhe do local danificado.**



**Figura 1.2 – (a) Lâminas de PRFC, (b) Execução do reforço: colagem das lâminas ao concreto.**

Contudo, deve-se notar que, a fim de associar o polímero reforçado com fibras (PRF) ao concreto de forma a estabelecer uma união sólida fazendo com que ambos os materiais trabalhem juntos, suas propriedades devem ser convenientemente ajustadas, sobretudo por

meio da garantia de uma adequada ligação, pela compatibilidade de deformações entre eles (JUVANDES, 2002).

Por isso, a aderência adequada na interface PRF/concreto torna-se um dos principais responsáveis pelo sucesso da utilização conjunta desses dois materiais.

Carmichael e Barnes (2005) relatam com detalhes a execução de reforço na ponte “War Memorial”, localizada em Macon, no estado do Alabama, nos Estados Unidos, e deixam evidente a importância da aderência para a garantia da qualidade do reforço.

A ponte “War Memorial”, executada em concreto armado, foi finalizada no ano de 1945. Contudo, durante seus anos de serviço as cargas usuais dos caminhões que ali transitavam aumentaram consideravelmente. Isto significa que a ponte passou a ser submetida a tensões e deformações maiores do que aquelas para as quais estava inicialmente projetada. Sendo assim, em 1999, o Departamento de Transporte do Alabama escolheu a ponte “War Memorial” para efetuar o reforço à flexão. Pesquisadores da Universidade de Auburn propuseram o reforço por colagem externa de laminados de polímero reforçado com fibras (PRF) nas vigas da ponte para fornecer a capacidade adicional de momento positivo que esta necessitava. O projeto de reforço foi elaborado por Swenson e Barnes (2002) e o início dos serviços ocorreu em outubro de 2001.

A instalação das lâminas de PRF nas vigas da ponte consistiu-se, resumidamente, em três etapas principais: a preparação das superfícies, a aplicação do epóxi de colagem nas superfícies e, por último, aplicação das tiras de PRF na superfície de concreto, conforme mostram as Figuras 1.3, 1.4 e 1.5 a seguir.



(a)



(b)

**Figura 1.3 – (a) Aplicação de epóxi de colagem na viga, (b) aplicação de epóxi de colagem nas tiras de PRF.**



(c)



(d)

**Figura 1.4 – (c) Tiras de PRF prontas para colagem, (d) Aplicação das tiras de PRF nas vigas da ponte.**



(e)



(f)

**Figura 1.5 – (e) Finalização da colagem de uma das tiras com rolo de tinta, (f) Reforço concluído e resultado final.**

Observa-se, no relatório de Carmichael e Barnes (2005) a descrição de inúmeros procedimentos e cuidados para que a aderência seja a mais perfeita possível. Segundo os mesmos autores, uma camada de ar, mesmo que pequena, entre o concreto e o PRF, pode proporcionar o início de uma delaminação quando a estrutura estiver submetida às cargas usuais de serviço. A delaminação não só interrompe a transferência de esforços entre o PRF e o concreto como também, devido a sua propagação, cria o potencial de falta completa de adesão entre esses materiais.

Logo, uma vez instalados os laminados de PRF nas vigas da ponte “War Memorial”, iniciou-se a etapa de inspeção para detecção de falhas na aderência: vazios entre o concreto e o PRF e também possíveis pontos de delaminação. O método utilizado pelos pesquisadores foi o “*tap test*” (teste do toque) que é baseado no som produzido quando a superfície do compósito é atingida por um objeto duro. Nesta situação, os pesquisadores utilizaram uma moeda de US\$ 0,25 (vinte e cinco

centavos de Dólar) para atingir o PRF instalado nas vigas. Caso haja ar entre o laminado de PRF e o concreto, ouve-se um som oco no momento em que a moeda atinge a superfície de PRF. Os pesquisadores efetuaram o “*tap test*” em toda a extensão das quatro vigas onde foi colado o laminado de PRF.

A fim de realizar a inspeção, percorreu-se, portanto, um total de 84 metros de extensão de tiras de PRF coladas, utilizando-se apenas uma moeda de US\$ 0,25.

Nota-se que este procedimento, além de extremamente demorado, é passível de erro humano, pois é necessário escutar o som oco proveniente do impacto da moeda para detectar as falhas e isto pode ser confundido com ruídos externos, por exemplo. Ademais, pode acontecer de alguma área passar despercebida e não ser inspecionada, já que a moeda é pequena e a extensão das tiras de PRF muito grande.

Este exemplo deixa clara a dificuldade na inspeção da aderência entre o concreto e o PRF, demonstrando a necessidade de estudos de novos procedimentos de inspeção. Então, para serem obtidos resultados mais rápidos e precisos, sugere-se recorrer aos ensaios não destrutivos.

Ensaaios não destrutivos são métodos de inspeção estrutural que não provocam prejuízos à estrutura e ainda possuem diversos benefícios como: prevenção de acidentes, possibilidade de aplicação durante o uso ou serviço da estrutura (sem necessidade de parada ou desmontagem), menos mão-de-obra, rapidez aliada à eficiência, entre outras inúmeras vantagens.

Os ensaios não destrutivos abrangem desde simples técnicas, tal como a inspeção visual, até técnicas mais complexas como: utilização de raios-X, emissão acústica, métodos magnéticos, radar, métodos sônicos, métodos esclerométricos, termografia infravermelha, ensaios ultrassônicos, entre outros.

No caso da inspeção da aderência dos reforços na ponte “War Memorial” a termografia infravermelha seria uma opção viável por já existirem diversas pesquisas internacionais relacionadas a este tema que comprovam sua eficácia (GHOSH; KARBHARI, 2011) (MITANI; MATSUMOTO, 2012) (MATSUMOTO; MITANI; CATBAS, 2015).

A termografia infravermelha é um método baseado na captação e análise de imagens obtidas por uma câmera infravermelha que permite investigações rápidas e eficientes sem que haja sequer contato físico com a estrutura. Sua aplicação segue o princípio fundamental de que anomalias internas ao longo de uma estrutura de mesmo material representam fluxo de calor não uniforme. Essas diferenças de fluxo de calor podem ser percebidas na temperatura superficial do elemento em

estudo (MENDONÇA, 2005). Sendo assim, a captação de imagens infravermelhas que aponte as temperaturas superficiais de um elemento submetido a um determinado fluxo de calor pode determinar a existência e a localização de anomalias ou descontinuidades internas.

A aplicação do ensaio não destrutivo de termografia infravermelha possui inúmeras vantagens, limitações e minuciosidades, que serão discutidas e apresentadas ao longo deste trabalho. Tal aplicação está direcionada para aderência de polímeros reforçados com fibra ao concreto, uma aliança que também possui ótimo desempenho da união desses materiais e que por isso já vem sendo constantemente pesquisada (BERG et al., 2006) (BIZINDAVYI; NEALE, 1999).

## **1.2 Justificativa e relevância do trabalho**

A construção civil tem passado por um grande avanço tecnológico o que significa, dentre outros aspectos, que há uma busca por novos tipos de materiais e, conseqüentemente, de novas estruturas que se adeqüem à atualidade. Por isso, os polímeros reforçados com fibras associados ao concreto vêm ganhando espaço nas pesquisas científicas.

Do mesmo modo, passa a existir também uma demanda por métodos de inspeção mais modernos, condizentes com a nova realidade tecnológica da construção civil, como é o caso do ensaio não destrutivo de termografia infravermelha.

Contudo, para que qualquer inovação científica comece a ser utilizada em larga escala e assim sejam aproveitados todos os benefícios que oferece, é essencial que haja estudos detalhados, pesquisas nacionais e internacionais além de refinamentos tecnológicos de forma que seus eventuais problemas tornem-se mais previsíveis e, portanto, mais fáceis de serem superados.

Na engenharia civil, segundo Hollaway (2004), o uso do concreto associado ao PRF surgiu em meados dos anos 80 com a utilização de polímeros reforçados com fibras como reforço externo de elementos de concreto armado, na cidade de Zurique, na Suíça.

Antes disso, um dos métodos de reforço mais conhecido era a colagem de chapas de aço com resina epóxi (MENON, 2008).

No Brasil, de acordo com Curty (2009) a primeira utilização da união desses materiais ocorreu no ano de 1990, na execução do reforço, por colagem de tiras de PRFC ao concreto, do viaduto Santa Tereza, em Belo Horizonte – MG.

Desde o surgimento dessa técnica de reforço, os estudos científicos buscam constantemente expandir o conhecimento e confiança na utilização dos compósitos PRF. Isto impõe a compreensão precisa de três fatores: o comportamento dos materiais, as técnicas de aplicação e o funcionamento posterior das estruturas.

No caso de estruturas reforçadas por materiais compósitos e concreto, para que seu funcionamento posterior seja satisfatório, é necessária a aderência adequada entre esses dois materiais e, portanto, a inspeção da qualidade da aderência torna-se indispensável. Assim sendo, é conveniente escolher para inspecioná-la um método que se beneficie dos avanços tecnológicos trazendo resultados práticos, rápidos, eficientes e seguros. Como opção a atender estes requisitos, pode ser adotada a termografia infravermelha. No Grupo de Pesquisa em Ensaio Não Destrutivos – GPEND, da Universidade Federal de Santa Catarina, o método da termografia infravermelha vem sendo testado para este fim, desde o início desta pesquisa, não sendo encontradas outras pesquisas brasileiras com este tema.

No Brasil, já existem pesquisas relacionadas a termografia infravermelha no ramo de Engenharia Civil, porém a grande maioria está relacionada às áreas de conforto térmico e construção civil, mas não à área de estruturas de concreto.

Nota-se ainda que nos trabalhos nacionais e internacionais em geral que empregam a termografia infravermelha, sua aplicação em ensaios experimentais, sejam eles realizados em laboratório ou em campo, possui foco em análises qualitativas, ou seja, na detecção da patologia somente por visualização da imagem termográfica. Por outro lado, em simulações computacionais o foco é dado às análises quantitativas, como por exemplo a detecção de tamanho e profundidade do defeito.

Percebe-se que análises quantitativas baseadas em dados de ensaios experimentais não são encontradas com frequência, já que neste tipo de ensaio não existem condições de contorno delimitadas, as quais são essenciais para se obter sucesso em simulações computacionais, mas sim interferências reais que devem ser ponderadas.

Entender e ponderar estas interferências minimiza erros intrínsecos ao método e busca produzir resultados mais precisos na aplicação da termografia infravermelha.

Outro fator relevante no estudo deste método não destrutivo está relacionado ao conhecimento mais aprofundado sobre câmera infravermelha, especialmente em relação aos parâmetros que nela

devem ser inseridos e que influenciam na formação da imagem infravermelha.

Preende-se, com este estudo, aprimorar a aplicação do ensaio não destrutivo de termografia infravermelha em estruturas compostas por concreto reforçadas por PRF por meio de análises quantitativas e qualitativas (com a utilização de procedimentos experimentais) bem como apontar erros intrínsecos ao método.

Desta forma, esta pesquisa também visa contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico na construção civil brasileira difundindo o ensaio não destrutivo de termografia infravermelha e ainda avaliar a aderência na interface de estruturas de concreto e reforçadas por PRF.

### **1.3 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar quantitativa e qualitativamente o ensaio não destrutivo da termografia infravermelha aplicado a estruturas de concreto reforçadas com PRF, para produzir melhorias e avanços em sua aplicação para detecção de danos na aderência entre concreto e PRF.

### **1.4 Objetivos específicos**

- Avaliar qualitativamente o comportamento das imagens infravermelhas na identificação de defeitos subsuperficiais na interface PRFV/concreto quando a superfície reforçada é submetida a diferentes tipos de excitações térmicas artificiais.

- Avaliar qualitativamente e comparar as imagens infravermelhas por cálculo de contraste térmico para delaminação ocorrida entre o concreto e diferentes tipos de reforço de PRF pré-fabricados em vigas.

- Por termografia infravermelha passiva, analisar as diferenças nas imagens infravermelhas para defeitos existentes entre o PRF e concreto considerando diferentes tipos de polímeros, tipos e tamanhos de defeitos subsuperficiais, tipos de matriz de colagem e diferentes tempos de aquecimento solar.

- A partir de imagens infravermelhas, estabelecer método inédito de cálculo para estimar a dimensão dos defeitos subsuperficiais na interface PRF/concreto, quando utilizada a termografia infravermelha passiva.

- Utilizar termogramas obtidos nos experimentos quando aplicada a termografia infravermelha passiva a fim de identificar as diferenças de temperaturas entre defeitos subsuperficiais submetidos a diferentes condições, empregando-se estatística.

## **1.5 Delimitações da pesquisa**

O estudo que será desenvolvido nesta tese limita-se à avaliação da aderência entre PRF e concreto com a utilização do ensaio não destrutivo de termografia infravermelha para os materiais e equipamentos específicos utilizados nesta pesquisa.

Salienta-se que os materiais e equipamentos podem ter características diferentes dependendo do fabricante e, no caso de resultados obtidos em laboratório, estes não devem ser extrapolados para ambientes externos sem antes serem testados.

## **1.6 Organização dos capítulos e estratégia de pesquisa**

Este trabalho possui uma primeira parte referente à apresentação e bases teóricas do tema e uma segunda parte destinada aos experimentos e suas respectivas análises e embasamentos teóricos.

No capítulo 1, a termografia infravermelha e o reforço de estruturas de concreto com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) são brevemente apresentados e são postos também: justificativa e relevância do trabalho, objetivos e ainda a delimitação da pesquisa.

No capítulo 2, são expostos os princípios físicos da termografia infravermelha, ou seja, são apresentados os fundamentos de transferência de calor, que é a base teórica da termografia infravermelha.

O capítulo 3, a partir das definições de transferência de calor apresentadas no capítulo 2, trata do ensaio não destrutivo da termografia infravermelha, mostrando seus tipos e peculiaridades.

O capítulo 4 apresenta o reforço de PRF ligado ao concreto e mais especificamente quais são os problemas advindos de falta de aderência entre estes materiais e como a termografia infravermelha pode identificá-los.

No capítulo 5, é iniciada a pesquisa experimental na qual se analisa comportamento das imagens infravermelhas na identificação de defeitos artificiais na subsuperfície entre o PRF (chapa pré-fabricada) e concreto, quando utilizados diferentes tipos de aquecimento, por termografia infravermelha ativa.

No capítulo 6, analisa-se a delaminação entre concreto e PRF (chapa pré-fabricada), baseando-se no conceito de contraste térmico, para diferentes tempos de excitação térmica artificial, em vigas reforçadas por PRF.

No capítulo 7, utiliza-se a termografia infravermelha passiva por aquecimento solar para se estimar a dimensão de defeitos artificiais posicionados entre concreto e PRF (manta) para diferentes tipos e tamanhos de defeitos e diferentes tipos de PRF.

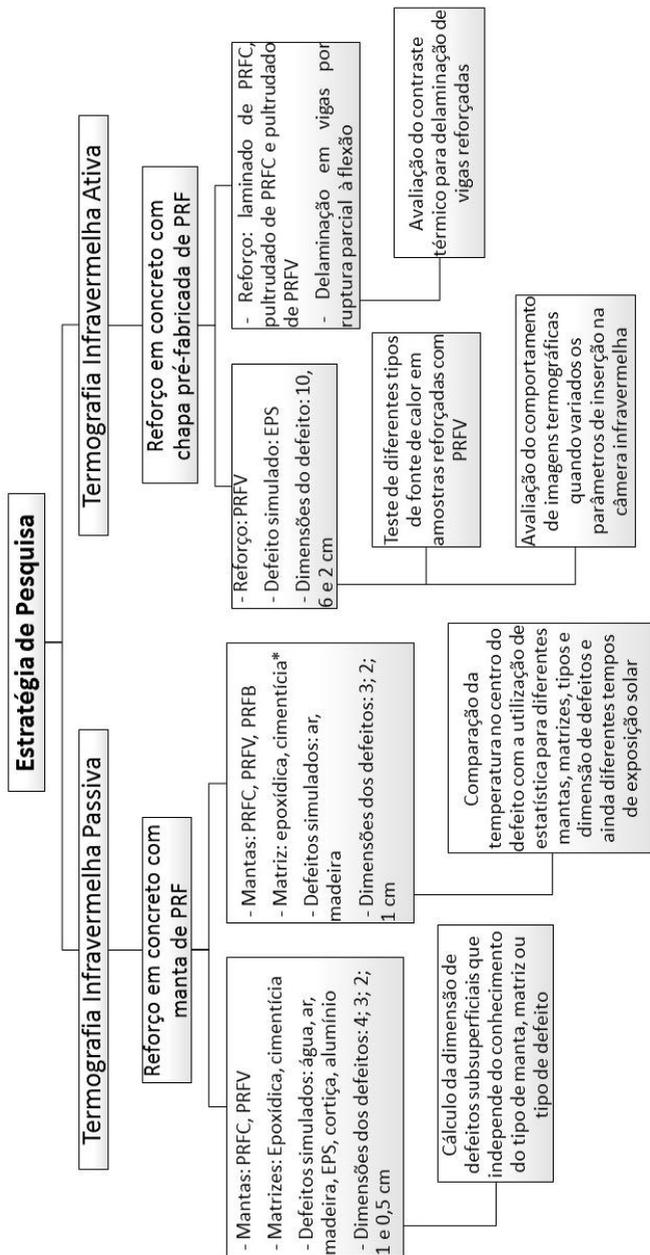
No capítulo 8, identificam-se por análise estatística quais são os parâmetros que influenciam na identificação de defeitos artificiais incluídos na interface concreto/PRF (manta) por termografia infravermelha passiva. Dentre os parâmetros analisados estão tipo e dimensão do defeito, tipo de PRF (manta), tipo de matriz de colagem e ainda o tempo de aquecimento solar.

Finalmente, o capítulo 9 apresenta as conclusões gerais do trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice A avalia-se o equipamento principal empregado neste ensaio não destrutivo: a câmera infravermelha. Os parâmetros que devem ser inseridos na câmera tais como emissividade, umidade relativa do ar, temperatura ambiente e distância da lente ao objeto são alterados de propósito e assim avalia-se qual a influência disso na identificação de defeitos artificiais localizados entre concreto e PRF (chapa pré-fabricada).

A seguir apresenta-se um fluxograma com a estratégia de pesquisa adotada.





\*Matriz cimentícia utilizada apenas para PRFB



## CAPÍTULO 2 - PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Neste capítulo apresentam-se os princípios fundamentais da termografia infravermelha, especialmente aqueles relacionados à transferência de calor, que são a base científica para o entendimento deste ensaio não destrutivo.

### 2.1 Conceitos de transferência de calor

A termografia infravermelha analisa a distribuição térmica e mede a temperatura da superfície de um objeto por meio da detecção da radiação infravermelha. Por isso, para melhor entendê-la é necessário detalhar conceitos relacionados à transferência de calor.

O conceito básico de transferência de calor (ou calor) é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Esse fenômeno é dividido fundamentalmente em três modos distintos, são eles: a condução, a convecção e a radiação.

A condução é a transferência de energia que ocorre devido ao contato direto das partículas da matéria, sólida ou fluida, em um meio estacionário que estão a diferentes temperaturas. Essa taxa de transferência de calor entre duas superfícies planas unidimensionais pode ser calculada pela Lei de Fourier, de acordo com a Equação 2.1 (INCROPERA et al., 2008):

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Sendo:

$q_x''$ : é o fluxo térmico e representa a taxa de transferência de calor na direção  $x$  por unidade de área perpendicular à direção da transferência, dada na unidade  $W/m^2$ .

$k$ : propriedade de transporte conhecida como condutividade térmica. É uma característica do material e sua unidade usual é  $W/(m.K)$ .

$\frac{dT}{dx}$ : é o gradiente de temperatura, que nas condições de estado estacionário pode ser representado como  $\frac{dT}{dx} = \frac{T_{quente} - T_{frio}}{L}$ .

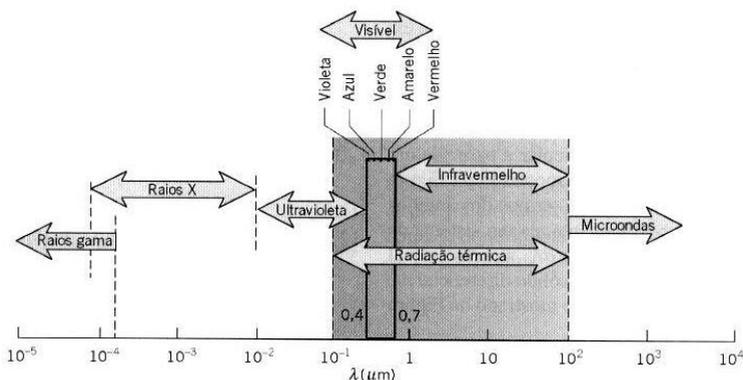
Além da condução, existe ainda a convecção que é um tipo de transferência de calor que se refere uma superfície e um fluido em movimento, quando eles estiverem a diferentes temperaturas. É bastante relevante principalmente quando existe um movimento significativo de fluido ao redor de um sólido.

Por fim, tem-se ainda o modo de transferência de calor mais importante para a caracterização da termografia infravermelha: a radiação.

A radiação é a energia em trânsito que ocorre em todas as superfícies com temperaturas diferentes de zero Kelvin por meio da emissão de ondas eletromagnéticas. Essas ondas são capazes de realizar trocas de energia, sem a necessidade de um meio interposto entre as superfícies de diferentes temperaturas. Portanto, enquanto a transferência de energia por convecção ou condução requer a presença de um meio material, a radiação, diferentemente, ocorre no vácuo.

A radiação relacionada à transferência de calor também é conhecida como radiação térmica. Para entender melhor seu conceito deve-se considerar a classificação das ondas eletromagnéticas. Estas são divididas em intervalos, de acordo com seus comprimentos de onda. Essa classificação é denominada espectro de radiação eletromagnética. Dentre as bandas que formam esse espectro, a radiação térmica é o intervalo referente às ondas que causam ou afetam o estado térmico de um corpo, conforme está indicado na Figura 2.1.

Analisando-se, agora, dentro do intervalo denominado radiação térmica, ou seja, no intervalo de comprimento de onda ( $\lambda$ ) entre  $10^{-1}$  a  $10^2$   $\mu\text{m}$ , percebe-se que, conforme o comprimento de onda aumenta, não é mais possível perceber visualmente a radiação que o corpo continua a emitir, logo, esta faixa é definida como radiação infravermelha. Na figura 15, observa-se, no espectro de radiação eletromagnética, a faixa de radiação infravermelha representada pelo intervalo “IR”.



**Figura 2.1: Espectro de radiação eletromagnética (INCROPERA et al., 2008).**

O método da termografia infravermelha fundamenta-se em conceitos da radiação térmica dos corpos relacionados à faixa de radiação infravermelha.

Sabe-se que qualquer fonte material (corpo sólido, banho líquido, mistura de gases), com temperatura acima do Zero Absoluto emite energia na forma de ondas eletromagnéticas. A temperatura e a radiação térmica são reflexos do grau de agitação das moléculas do material, ou seja, quanto maior o grau de agitação das moléculas, maior será a temperatura e maior será a emissão de radiação térmica do material. A câmera infravermelha funciona como um radiômetro espectral que mede esta energia de agitação, possibilitando a captação de imagens e da temperatura superficial de um corpo.

Associados à radiação, existem ainda outros conceitos que complementam a compreensão dos conceitos de transferência de calor e também são essenciais para o entendimento da técnica de termografia infravermelha.

O poder emissivo da superfície, a emissividade e a temperatura da superfície do material são alguns dos importantes parâmetros para medição da radiação infravermelha.

### **2.1.1 Emissividade**

A emissividade ( $\epsilon$ ) de um material é a razão entre a radiação emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura, sendo corpo negro um absorvedor e emissor perfeito de radiação.

A definição de emissividade está associada a alguns fatores tais como: temperatura, ângulo de emissão e comprimento de onda. Características da superfície do material tais como: geometria e composição química também são importantes para caracterização desse parâmetro.

Por isso, existem quatro diferentes tipos emissividades que podem ser definidas, conforme o caráter direcional e conforme a relação com o comprimento de onda. Percebe-se, portanto, que a emissividade pode assumir diferentes valores de acordo com o interesse do estudo que pode ser focado na emissão em um dado comprimento de onda ou em uma dada direção, ou então em médias integradas ao longo de comprimento de onda e direções (INCROPERA et al., 2008).

Considerando-se esses fatores, define-se a emissividade espectral direcional,  $\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi,T)$ , de uma superfície a uma temperatura T, como a razão entre a intensidade da radiação (I) emitida no comprimento de onda  $\lambda$  e nas direções de  $\theta$  e  $\phi$  e a intensidade de radiação emitida por um corpo negro nos mesmos valores de T e  $\lambda$ , dada pela Equação 2.2.

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi,T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T)}{I_{\lambda,cn}(\lambda,T)} \quad (2.2)$$

Em que:

$I_{\lambda,e}$  : intensidade de radiação emitida de acordo com seu comprimento de onda.

$I_{\lambda,cn}$ : intensidade de radiação emitida por um corpo negro de acordo com o comprimento de onda.

Se a intensidade de radiação emitida da Equação 2.2 for integrada em todos os comprimentos de onda ( $\lambda$ ) resultará, então, na chamada **emissividade total direcional**, que é calculada conforme a Equação 2.3.

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\theta,\phi,T) = \frac{I_e(\theta,\phi,T)}{I_{cn}(T)} \quad (2.3)$$

Porém, na prática, adotam-se propriedades de radiação médias em todas as direções, chamadas propriedades hemisféricas.

$$E_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta d\phi \quad (2.4)$$

Como a integral da taxa da energia de radiação emitida  $I_{\lambda,e}$  em um determinado comprimento de onda por unidade de superfície ao longo de todo hemisfério é o poder emissivo espectral  $E_{\lambda}$ , segundo Equação 2.4, a **emissividade espectral hemisférica** pode ser expressa como mostra a Equação 2.5.

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda, cn}(\lambda, T)} \quad (2.5)$$

Por fim, se escolhermos calcular a emissividade espectral direcional como uma média em todas as direções e comprimentos de onda, será obtida a expressão de **emissividade total hemisférica**, conforme Equação 2.6, a qual será o parâmetro utilizado neste trabalho.

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_{cn}(T)} \quad (2.6)$$

A radiação não é considerada um fenômeno simples, por isso, além da simplificação na forma de medir a emissividade, ainda existem outras simplificações que não consideram dependência do comprimento de onda e nem da direção nas propriedades. Sendo assim, em cálculos de radiação, são utilizados conceitos de superfície cinza e difusa. A superfície é considerada difusa quando suas propriedades são independentes da direção, já a superfície cinza é aquela em que as propriedades não dependem do comprimento de onda, portanto, percebe-se que a emissividade hemisférica total é relativa a uma superfície cinza e difusa. Apesar de superfícies reais não emitirem radiação de forma perfeitamente difusa, geralmente se aproximam disso.

Na análise de radiação, é comum considerar-se que as superfícies são emissoras difusas com uma emissividade igual ao valor da direção normal ( $\theta = 0$ ). Sendo assim a emissividade total hemisférica, também conhecida como emissividade média, é considerada praticamente constante para cada tipo de material.

A emissividade está relacionada com a absortividade pela lei de Kirchhoff. Esta lei afirma que em um corpo, em situação de equilíbrio térmico, a emissividade espectral para a emissão de radiação à temperatura T é igual ao poder de absorção espectral para a radiação proveniente de um corpo negro, à mesma temperatura T.

### 2.1.2 Lei de Stefan Boltzman

A radiação que é emitida pela superfície de um corpo tem sua origem na energia térmica da matéria delimitada pela superfície. A taxa na qual a energia é liberada por unidade de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) é conhecida como poder emissivo da superfície. A lei de Stefan-Boltzmann define a relação entre poder emissivo de um corpo negro ( $E_n$ ) e sua temperatura, conforme mostra a Equação 2.7.

$$E_n = \sigma T_s^4 \quad (2.7)$$

Em que:

$E_n$ : poder emissivo de um corpo negro ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

$T_s$ : Temperatura absoluta em Kelvin (K)

Um corpo negro ideal deve ter a emissividade igual a 1 enquanto que qualquer objeto real deve ter a emissividade menor que 1. Isso significa que um objeto real não absorve e nem emite toda energia nele incidente.

Portanto, um fluxo térmico emitido por uma superfície real é menor que aquele emitido por um corpo negro à mesma temperatura e é dado pela Equação 2.8:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.8)$$

Em que:

$E$ : poder emissivo ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\varepsilon$ : emissividade de um corpo

### 2.1.3 Intercepção da radiação em um corpo

Como já foi dito, a emissividade caracteriza a emissão de energia de um corpo. Isto significa que no ambiente, além da radiação emitida pelo corpo, há também a radiação recebida que é, portanto, proveniente de todas as direções ao longo de um intervalo de comprimento de onda. Assim sendo, torna-se importante analisar os processos que resultam da intercepção da radiação por um meio sólido ou líquido.

No momento em que a radiação atinge superfície de um corpo, uma parte é absorvida, outra parte é refletida e outra, se houver, é transmitida.

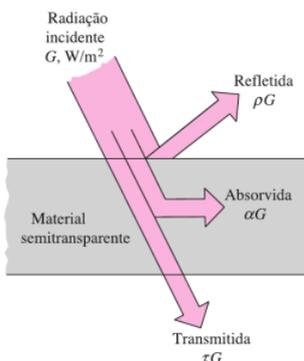
Na Figura 2.2, pode-se observar a radiação incidente em um corpo que se divide em três partes. A fração de irradiação absorvida pela superfície é chamada absorvidade ( $\alpha$ ), a fração refletida pela superfície é chamada refletividade ( $\rho$ ) e a fração transmitida pela superfície é chamada transmissividade ( $\tau$ ) (ÇENGEL, 2012).

Sendo  $G_{abs}$ ,  $G_{refl}$  e  $G_{trans}$  as porções de fluxo de radiação incidente absorvida, refletida e transmitida, respectivamente, concluem-se como resultados as Equações 2.9 e 2.10, de acordo com a Figura 2.2.

$$G_{abs} + G_{refl} + G_{trans} = G \quad (2.9)$$

$$\alpha + \rho + \tau^* = 1 \quad (2.10)$$

\*Para superfícies opacas  $\tau = 0$



**Figura 2.2 – Absorção, reflexão e transmissão da radiação incidente em material semitransparente (ÇENGEL, 2012).**

É importante notar que nas Equações 2.9 e 2.10, para aplicações em engenharia são desconsiderados composição e espessura do meio, além de efeitos volumétricos que podem ocorrer no meio, sendo então utilizadas para fenômenos de superfície.

A energia radiante absorvida por um corpo ( $G_{abs}$ ) é transformada em calor e assim colabora para o aumento de sua temperatura, porém parcelas transmitidas e refletidas não sofrem mudança em seus comprimentos de onda.

## 2.2 Câmera infravermelha

A câmera infravermelha, também conhecida como termovisor, é o principal instrumento para a realização do ensaio não destrutivo de termografia infravermelha. Ela é capaz de detectar a radiação infravermelha emitida por um objeto e convertê-la em imagem visível atribuindo-lhe leituras de temperatura.

O sistema de detecção da câmera infravermelha pode ser de dois tipos: sistema de detecção por varredura (*scanning system*) ou sistema fixo de detecção (*staring system*), sendo este último o tipo utilizado no equipamento deste trabalho.

O sistema de detecção por varredura, como o próprio nome já define, possibilita a varredura de uma área por meio de um conjunto eletromecânico de espelhos e/ou prismas rotativos. Para realizar a varredura, esse sistema necessita de apenas um detector ou de um arranjo linear de detectores. Essa configuração apresenta como desvantagem a limitação da taxa de repetição dos quadros (*Frame Rate*<sup>1</sup>), o que prejudica a qualidade da imagem.

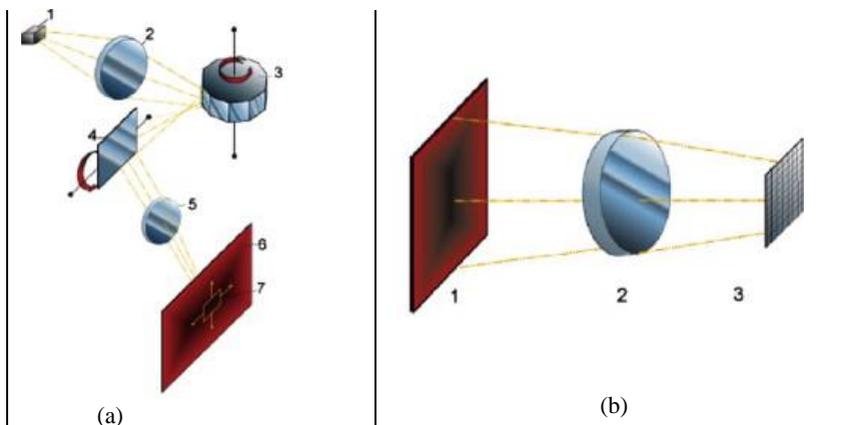
O sistema fixo de detecção também é conhecido como Matriz de Plano Focal ou FPA (*Focal Plane Array*). Esse sistema possui detectores posicionados no formato de uma matriz bidimensional e assim a radiação incidente é captada diretamente. Percebe-se, dessa forma, que a taxa de repetição de quadros pode ser alta, diferentemente do sistema de detecção por varredura, já que cada elemento da matriz pode acompanhar diretamente a radiação emitida, proveniente do corpo sob inspeção.

As Figuras 2.3 (a) e (b) ilustram o funcionamento destes sistemas de detecção, especificando alguns de seus componentes.

Além do tipo de sistema utilizado, é importante caracterizar o tipo de detector infravermelho que compõe a câmera infravermelha uma vez que este é um dos componentes mais importantes para definir seu desempenho. Existem dois tipos de detectores: térmicos e de fótons.

---

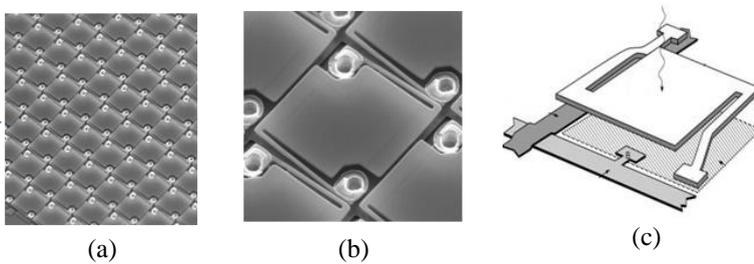
<sup>1</sup> É definido como o número de vezes que uma imagem completa é atualizada pelo termovisor em um segundo. Baixas taxas de repetição de quadro produzem uma imagem borrada quando existe um movimento relativo entre o Termovisor e o objeto sob inspeção (SANTOS, 2012).



**Figura 2.3 – (a) Sistema de detecção por varredura. 1) Detector; 2) Lente; 3) Espelho de deflexão horizontal; 4) Espelho de deflexão vertical; 5) Lente; 6) Objeto; 7) Ponto de medição. (b) Sistema com Matriz de Plano Focal. 1) Objeto; 2) Lente; 3) Detectores. (TAN et al., 2009).**

Os detectores térmicos se caracterizam por responderem a uma mudança de temperatura com uma variação de alguma propriedade física, sendo mais comum a variação de sua resistência. A radiação incidente é absorvida e o aumento da temperatura produz o sinal de saída. Este tipo de detector absorve todos os comprimentos de onda, por isso possuem resposta espectral ampla e uniforme, porém possuem sensibilidade baixa e tempo de resposta lento quando comparados aos detectores de fótons (ou fotodetectores). Alguns exemplos de detectores térmicos são: a termopilha, detector piroelétrico e bolômetro. O equipamento utilizado nesta pesquisa possui sistema fixo de detecção (FPA) cuja matriz é formada por microbolômetros, conforme ilustra a Figura 2.4.

Nos detectores de fótons, a incidência da radiação é transformada rapidamente em cargas elétricas uma vez que os fótons incidentes carregam os elétrons da banda de valência para a banda de condução. Operam em temperaturas abaixo de zero para melhorar o desempenho, necessitando, nesses casos, de resfriamento criogênico ou resfriamento por processo elétrico. Possuem como características: resposta espectral limitada, alta sensibilidade e rápido tempo de resposta. Um exemplo comum de fotodetector é o de Mercúrio-Cádmio-Telúrio (HgCdTe).



**Figura 2.4 – (a) Sistema de detecção por Matriz de Plano Focal formada por microbolômetros (detectores térmicos). (b) Microbolômetro. (c) Detalhamento de um microbolômetro.**

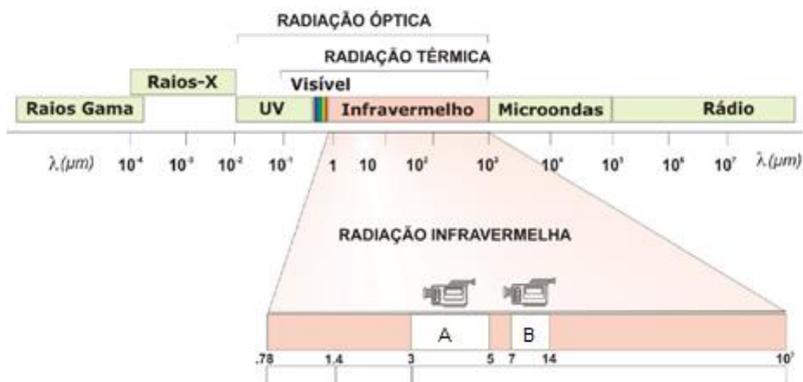
Outra importante característica de uma câmera infravermelha é a definição de qual a faixa de comprimento de onda da radiação infravermelha ela abrange.

A NBR 15572:2008 – Ensaio não destrutivo – Termografia – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos – divide a radiação infravermelha em diferentes regiões de acordo com a faixa do comprimento de onda, conforme mostra a Tabela 2.1.

Segundo Rogalski e Chrzanowski (2002), em geral, a banda espectral preferida para serem obtidas altas performances da imagem térmica é a faixa entre 8  $\mu\text{m}$  e 14  $\mu\text{m}$  (dentro da faixa de infravermelho distante). Entretanto, a banda entre 3  $\mu\text{m}$  e 5  $\mu\text{m}$  (dentro da faixa de infravermelho médio) pode ser mais apropriada para objetos mais quentes ou então caso a sensibilidade seja menos importante que o contraste. A Figura 2.5 localiza essas bandas espectrais mais utilizadas para termovisores dentro do espectro eletromagnético.

**Tabela 2.1 – Divisão da radiação infravermelha adotada pela NBR 15572:2008.**

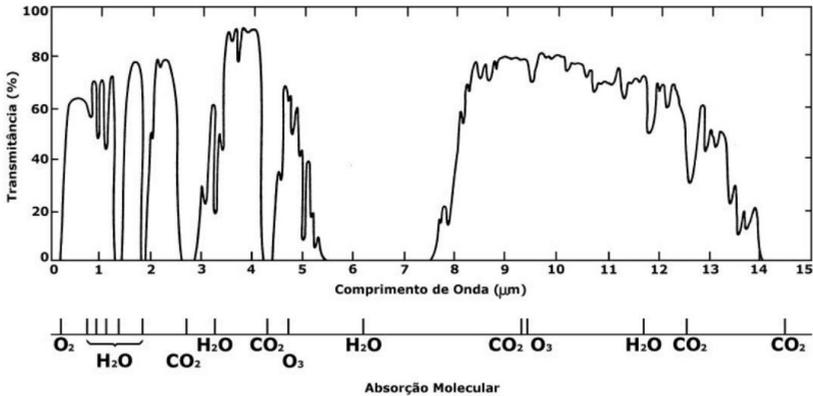
<b>Região</b>	<b>Faixa comprimento de onda</b>
Infravermelho muito próximo	0,78 $\mu\text{m}$ – 1,1 $\mu\text{m}$
Infravermelho próximo	1,1 $\mu\text{m}$ – 3 $\mu\text{m}$
Infravermelho médio	3 $\mu\text{m}$ – 6 $\mu\text{m}$
Infravermelho distante	6 $\mu\text{m}$ – 15 $\mu\text{m}$
Infravermelho muito distante	15 $\mu\text{m}$ – 1000 $\mu\text{m}$



**Figura 2.5 – Espectro eletromagnético e as faixas espectrais utilizadas na fabricação de câmeras infravermelhas.**

A escolha dessas faixas está relacionada com a transmitância da atmosfera à radiação infravermelha que varia de acordo com o comprimento de onda da radiação. Quanto maior a transmitância atmosférica à radiação infravermelha, melhor o desempenho do termovisor. Sendo assim, observa-se pelo gráfico da Figura 2.6, que as maiores transmitâncias estão compreendidas, aproximadamente, entre as bandas espectrais de 3  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$  e de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ . Dentre essas duas faixas, a última faixa é a mais utilizada por apresentar maior sensibilidade a objetos à temperatura ambiente e melhor transmitância através de neblina e fumaça.

Dentro do campo de visão, interessa-nos ainda definir o menor detalhe visível que a câmera pode captar. Este parâmetro é o chamado “campo de visão instantâneo”, ou IFOV (*Instantaneous Field of View*), é medido em radianos e corresponde a projeção de 1 pixel na superfície observada. Portanto, a soma de todos os IFOVs resulta no FOV, que é o campo de visão total da imagem.



**Figura 2.6: Transmissividade atmosférica na região do infravermelho para uma camada de ar de 1.830 m de espessura, ao nível do mar contendo, contendo 17 mm de água precipitável (ROGALSKI; CHRZANOWSKI, 2002).**

Em relação à ótica da câmera infravermelha, pode-se definir sua resolução espacial, ou seja, o seu campo de visão e também seu campo de visão instantâneo.

O “campo de visão” de uma câmera infravermelha, também conhecido como FOV (*Field of View*), é a maior área que o equipamento pode captar a uma dada distância, ou seja, é o tamanho da imagem projetada na janela do termovisor. Geralmente é descrito em graus horizontais por graus verticais angulares.

O IFOV pode ser calculado a partir da Equação 2.11.

$$IFOV = \frac{FOV}{Pix} \quad (2.11)$$

Sendo:

*IFOV*: campo de visão instantâneo, em microrradianos [mrad]

*FOV*: campo de visão total, em microrradianos [mrad]

*Pix*: número de pixels

Tomando-se como exemplo uma câmera infravermelha com FOV = 28° (horizontal) x 21° (vertical), pixels de 160 (horizontal) x 120 (vertical). Tem-se:

$$IFOV_{hor} = \frac{28 \cdot \frac{\pi}{180}}{160} = 3,1 \text{ mrad}$$

$$IFOV_{vert} = \frac{21 \cdot \frac{\pi}{180}}{120} = 3,1 \text{ mrad}$$

Contudo, o IFOV geralmente é um parâmetro fornecido pelo fabricante. Sendo assim, tendo-se o IFOV como dado, pode-se calcular a distância máxima que um objeto de tamanho “ $d$ ” pode ser detectado pelo termovisor pela equação 2.12.

$$Dist = \frac{d}{IFOV} \quad (2.12)$$

Sendo:

$Dist$ : distância máxima, em metros [m], que um objeto de tamanho  $d$  pode ser detectado.

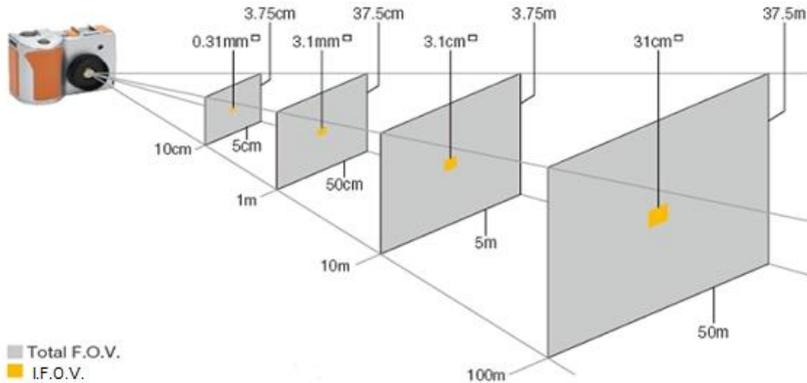
$d$ : tamanho do objeto sob inspeção, em metros [m]

$IFOV$ : campo de visão instantâneo, em radianos [rad]

Adotando-se o mesmo exemplo anterior, para um objeto de aproximadamente 31 x 31 cm, a distância máxima para que possa ser detectado é de 100 metros.

$$Dist = \frac{0,31}{3,1 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ m}$$

Na Figura 2.7, podem ser observadas algumas medidas de campo de visão, detalhamentos e distâncias máximas que o termovisor desse exemplo pode detectar.



**Figura 2.7: Campo de visão (FOV) e campo de visão instantâneo (IFOV) de uma câmera de 160 x 120 pixels, IFOV 3,1 mrad e FOV 28° x 21°.**

Portanto, percebe-se que o campo de visão é determinante na localização de uma anomalia. Sendo assim, é importante haver a precaução no momento da leitura de detalhes da imagem já que isto está vinculado à distância tomada e, conseqüentemente, à especificação do equipamento.

Caso seja necessário melhorar a resolução quando existe uma distância maior, podem ser utilizadas lentes especiais, porém existe a desvantagem da diminuição do campo de visão. Isso significa que chegar mais próximo ao alvo, é o mesmo que utilizar a lente. Porém, como nem sempre é possível se aproximar do alvo em uma inspeção, em certas ocasiões as lentes são indispensáveis.

Outro fator importante na análise termográfica da imagem é a temperatura detectada. Por isso, deve-se observar a resolução de medida e a sensibilidade térmica do equipamento.

A resolução de medida também é conhecida como “campo de visão instantâneo de medida”, MIFOV (*Measuring Instantaneous Field of View*) ou ainda IFOV<sub>m</sub>. Este parâmetro define o menor objeto que pode ter sua temperatura medida com exatidão a uma determinada distância. De acordo com Snell (2005), uma leitura de temperatura deve obedecer à resolução de medida, pois pode ter grande influência na análise da intensidade do defeito. Infelizmente, os fabricantes geralmente não fornecem este parâmetro do equipamento, contudo sabe-se que geralmente é inferior à resolução espacial. Isto significa que, adotando-se novamente as definições do equipamento do exemplo anterior, para medir-se com exatidão a temperatura de um objeto de

dimensões 3,1 x 3,1 cm, a distância máxima adotada deve ser, aproximadamente, de 2 a 4 vezes menor que 100 metros.

Interessa-nos ainda a menor diferença de temperatura que uma câmera infravermelha é capaz detectar. Este parâmetro é chamado de sensibilidade térmica ou também conhecido como NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*). Mais especificamente pode-se definir a sensibilidade térmica como a medida do nível de ruído da imagem de uma câmera infravermelha. Ela depende, portanto, da captação de luz do sistema óptico, do tipo de receptor e do ruído do sistema, mas não depende da resolução espacial (HOLST, 2000). Segundo o mesmo autor, para baixas temperaturas o sistema de um termovisor apresenta mais ruídos e sua resolução diminui sendo que os equipamentos que trabalham na faixa de 3 a 5  $\mu\text{m}$  são mais prejudicados do que aqueles que trabalham na faixa de 8 a 14  $\mu\text{m}$ .

### **2.3 Fatores que influenciam na captação de imagens infravermelhas**

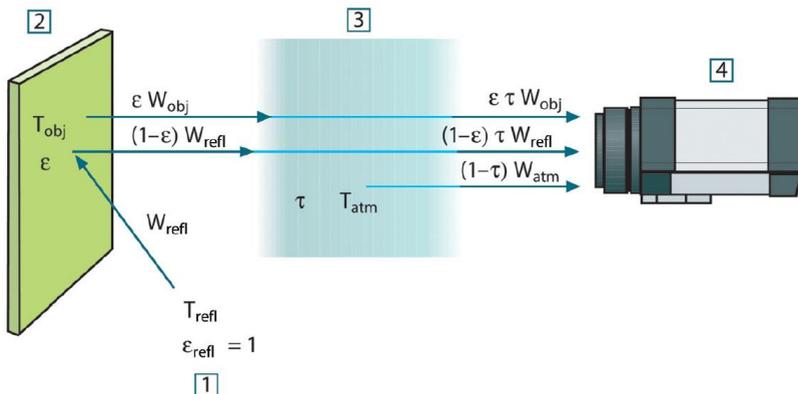
O ensaio não destrutivo da termografia infravermelha não é de ser de fácil procedimento, pois existem diversos fatores que influenciam na análise dos resultados. Caso não se tomem certos cuidados antes e durante a realização do ensaio, pode haver conclusões equivocadas uma vez que, ao analisar o termograma, é alto o risco de se confundir, ou até mesmo de não se detectar, os defeitos de um objeto.

Em um termograma, irregularidades na temperatura superficial podem não apenas serem advindas de danos no objeto inspecionado, mas também resultantes de fatores externos, tais como (DE FREITAS; DE FREITAS; BARREIRA, 2014):

- Condições térmicas do objeto e do meio em que se encontra, antes e durante o ensaio;
- Presença de fontes externas, tais como: sombra, reflexão, superfícies com diferentes acabamentos, entre outros aspectos;
- Condições de medição, como por exemplo: emissividade empregada, temperatura e umidade do ambiente, distância entre câmera e objeto, definições do equipamento, experiência do operador, entre outras condições.

Esses fatores podem influenciar resultados de temperaturas apresentadas no termovisor diferentes das temperaturas reais, já que a formação da imagem está associada à captação da radiação infravermelha que atinge detector da câmera e não em uma simples medição direta da temperatura.

Segundo o Manual do Utilizador Flir B Series T Series (2010), manual do equipamento utilizado nesta pesquisa, 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 objeto está inserido (meio adjacente). Ambas as radiações são, em parte, atenuadas pela atmosfera na trajetória de medição. A estas, se junta uma terceira contribuição de radiações emitidas pela própria atmosfera, como está ilustrado pela Figura 2.8.



**Figura 2.8 – Representação esquemática da situação da medição termográfica geral. 1) meio adjacente, 2) objeto, 3) atmosfera, 4) câmara.  $T_{obj}$  - 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 (MANUAL DO UTILIZADOR FLIR, 2010).**

A configuração da Figura 2.8 pode ser descrita de acordo com a Equação 2.13.

$$W_{tot} = \varepsilon \tau W_{obj} + (1 - \varepsilon) \tau W_{refl} + (1 - \tau) W_{atm} \quad (2.13)$$

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

Portanto, é a soma dessas radiações que atinge o detector, gerando de um sinal de saída que é processado e transformado em imagens visíveis com leituras de temperatura.

Nota-se ainda que o valor da intensidade do sinal de saída, gerado pelo detector, está associado a alguns parâmetros fornecidos pelo termovisor tais como: emissividade, distância do objeto ao termovisor, entre outros parâmetros relativos ao meio ambiente que são necessários para o cálculo da temperatura do objeto sob inspeção. Logo, a precisão da medida de temperatura depende da calibração do termovisor e da exatidão dos parâmetros informados pelo operador (SANTOS, 2006).

### ***2.3.1 Qualificação do termografista***

Uma das principais medidas a serem adotadas para se obter maior precisão de imagens infravermelhas capturadas é ter um operador de câmera infravermelha (ou termografista) apto e qualificado para esta tarefa.

Um termografista qualificado deve, primeiramente, ter aptidão visual, natural ou corrigida, e ainda conhecer bem as características e funcionamento da câmera utilizada, bem como saber das propriedades dos objetos em inspeção e ter conhecimentos sobre a transferência de calor e teoria de radiação infravermelha.

Como todos estes fatores podem influenciar no resultado das imagens, tais conhecimentos propiciam diferenciar um defeito real de uma falsa anomalia, tornando a análise mais confiável.

Para adquirir este conhecimento, são necessárias normas que orientem o treinamento de um termografista para que haja procedimentos padronizados na aplicação do método.

De acordo com Santos; Alves e Bortoni (2011), em outubro de 2005 foi estabelecido no Brasil pela ABENDI (Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeções) um grupo de trabalho para dar início à elaboração de regras para a certificação de pessoal qualificado para atuar com o ensaio não destrutivo de termografia infravermelha. Este grupo teve como base para as discussões duas normas e uma recomendação, todas internacionais. São elas:

- ISO 9712 – *Nondestructive testing – Qualification and certification of personnel was prepared by Technical Committee ISO/TC 135, Subcommittee SC 7.* Publicada pela Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization – ISO*);

- *Recommended Practice No. SNT-TC-1A - Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing* publicada pela Sociedade Americana de Ensaio Não Destrutivos (*The American Society for Nondestructive Testing – ASNT*) e sob direção da SNTTC-1A Review Committee2;

- ISO 18436 – *Condition monitoring and diagnostics of machines - Requirements for qualification and assessment of personnel - Part 7: Thermography*. Foi preparada pelo comitê técnico ISO/TC 108, Subcomitê SC 5 e publicada pela Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization – ISO).

Como resultado, este grupo de trabalho elaborou a NA-009 – Qualificação e Certificação de pessoas em termografia (ABENDI, 2011), que é a base do curso de certificação em termografia oferecido pela ABENDI, instituição acreditada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) como organismo de certificação de pessoas (OPC).

Além disso, de 2005 a 2010, a comissão de termografia (CE-58:000.11), estabelecida pela ABENDI e sob sua direção, juntamente com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), publicou cinco normas relativas ao ensaio de termografia infravermelha (SANTOS; ALVES; BORTONI, 2011):

- ABNT NBR15424 – Ensaio não destrutivo – Termografia – Terminologia.

- ABNT NBR 15572 – Ensaio não destrutivo – Termografia por infravermelho – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos.

- ABNT NBR 15718 – Ensaio não destrutivo – Termografia – Guia para verificação de termovisores.

- ABNT NBR 15763 – Ensaio não destrutivo – Termografia – Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência.

- ABNT NBR 15866 – Ensaio não destrutivo – Termografia – Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos.

Outra norma muito utilizada que referencia diretamente a termografia para inspeção em estruturas reforçadas com polímeros reforçados com fibras é a CNR-DT 200/2013 que se apresenta como um guia para projeto e construção de sistemas reforçados com PRF.

Entretanto, apesar de tantos estudos, discussões e normas, percebe-se que estas 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.

Apesar de já ser utilizada como ensaio não destrutivo na engenharia civil, a termografia infravermelha não possui norma brasileira específica nesta área, ou seja, não há padronização normalizada da análise, o que faz com que muitos engenheiros civis prefiram não adotar esta técnica mesmo que ela possa oferecer excelentes resultados, quando utilizada corretamente.

### ***2.3.2 Escolha da câmera infravermelha***

Um termografista qualificado deve ainda saber escolher o tipo de câmera infravermelha adequada para a inspeção. Nessa escolha, devem ser conhecidas algumas características do ensaio, tais como aponta Santos (2012) baseando-se em pesquisa na área de eletricidade:

- Temperatura dos objetos inspecionados: o que definirá a faixa de temperatura e a faixa de comprimento de onda que o termovisor deve alcançar.

- Distância da câmera ao objeto e tamanho do objeto inspecionado: o que definirá a resolução espacial (FOV, IFOV) e a resolução de medida (MIFOV) do termovisor a ser utilizado.

- Variação de temperatura do ambiente onde se desenvolve a inspeção: o que definirá a faixa de temperatura de operação do termovisor.

Além dessas características deve-se escolher ainda o tipo de sistema de detecção (sistema fixo ou varredura), tipo de detector (térmico ou por fótons), tamanho e peso do equipamento, entre outras peculiaridades.

Baseando-se nestas características, podem ser escolhidas, de forma geral, algumas das definições que um termovisor adequado para inspeções aplicadas à engenharia civil deve possuir:

- Leveza, a fim de possibilitar boa portabilidade, permitindo inspeções longas e em grandes áreas.

- Faixa espectral de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ , já que, esta faixa possui uma menor interferência do reflexo solar e às influências da atmosfera em inspeções realizadas em ambientes abertos e a grandes distâncias, além

de alta transparência da atmosfera à radiação infravermelha (ARAÚJO; BARBOSA; SINISCALCHI, 2008).

- Sistema fixo de detecção (Detector de Matriz de Plano Focal - Focal Plane Array), uma vez que não existem partes móveis como no sistema de detecção por varredura, facilitando, por exemplo, o transporte do equipamento.

- Detector infravermelho térmico do tipo microbolômetro, pois possui menor consumo de energia e possibilita operação em temperatura ambiente.

- Temperatura de operação de  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ , ideal para ambientes de altas ou baixas temperaturas. Esta é faixa de temperatura na qual o termovisor pode operar e que o fabricante garante as especificações fornecidas. Estes valores são adequados a praticamente toda extensão do território brasileiro.

Outras características tais como resolução espacial e de medida, sensibilidade térmica, taxa de repetição de quadros (*frame rate*), faixa de temperatura do objeto sob inspeção devem atender às distâncias e às dimensões dos alvos encontrados bem como às definições do material e o objetivo da inspeção.

Neste trabalho foram utilizados 2 tipos de câmeras infravermelhas sendo que ambas possuíam todas as características desejadas descritas anteriormente. Além disso, ambas as câmeras são da marca FLIR e específicas para inspeções em edificações, segundo o fabricante. Há algumas diferenças entre estas em relação à resolução da imagem entre outras especificações que serão mais bem definidas posteriormente, de acordo com os experimentos que cada qual será utilizada.

### **2.3.3 Influência da emissividade**

O funcionamento da câmera infravermelha é baseado na medição da radiação emitida pelo corpo sob inspeção. Como consequência desse fato a emissividade torna-se um dos principais parâmetros para a correta leitura de temperatura em um termovisor, uma vez que a radiação é muito dependente desta propriedade.

Como já foi descrito anteriormente, no subitem 2.1.2, a emissividade pode variar de acordo com o comprimento de onda, o ângulo, forma do objeto, o tipo de sua superfície e sua temperatura (MALDAGUE, 2000) (MADDING, 1999) (ARAÚJO; BARBOSA; SINISCALCHI, 2008).

Entretanto, neste trabalho foram adotadas algumas simplificações. Escolheu-se utilizar a emissividade total hemisférica, além da consideração de corpo cinzento e difuso. Portanto, a emissividade é considerada constante para uma temperatura adotada. Assim sendo quando a temperatura é variada em metais (não oxidados), cuja emissividade geralmente é baixa, ocorre um aumento da emissividade com o aumento da temperatura. Já no restante dos materiais, que geralmente possuem emissividade superior a 0,80, a emissividade diminui com o aumento da temperatura.

Todavia, um mesmo material pode ter diferentes emissividades dependendo do estado de sua superfície. Logo, há diferentes valores de emissividade para um mesmo material polido ou não polido, oxidado ou não oxidado, pintado ou não, etc.

A geometria da superfície é outro fator que influencia na quantidade de energia emitida por um objeto. Alterações de forma causam variações na emissividade de um corpo. Por exemplo, formas côncavas aumentam o valor da emissividade, enquanto formas convexas o diminuem (OLIVEIRA, 2012).

A emissividade aparente, no momento de medição, também depende do ângulo de visão e diminui na medida em que o ângulo de visão aumenta em relação à sua normal. Para medições de temperatura precisas é necessário um ângulo de visão menor que  $30^\circ$ . Em ângulos de visão entre  $30^\circ$  e  $60^\circ$ , um pequeno erro é introduzido na medição infravermelha, mas para ângulos maiores que  $60^\circ$  podem ocorrer erros grosseiros (HOLST, 2000). A Figura 2.9 ilustra este comportamento.

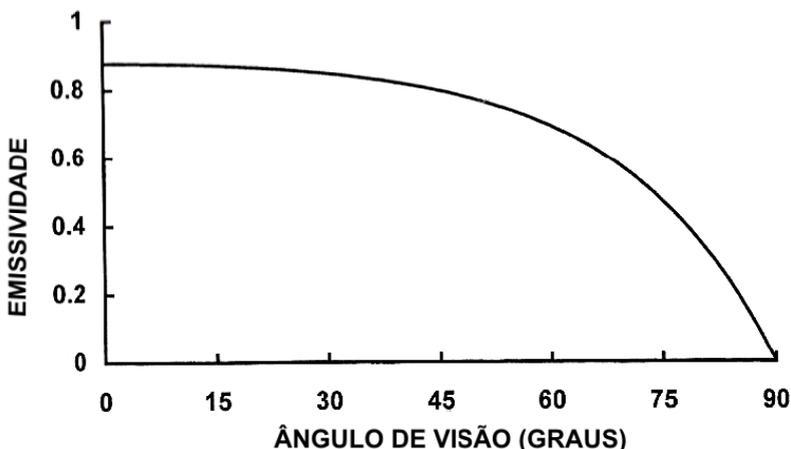


Figura 2.9 – Emissividade em função do ângulo de visão (Holst, 2000).

Nas inspeções realizadas na construção civil, em algumas situações, não é possível realizar a medição no ângulo da linha normal devido à dificuldade de acesso. Porém, é necessário buscar a visão mais perpendicular possível do local a ser analisado para evitar erros ocasionados por ângulo de visão.

### ***2.3.4 Condições ambientais***

As condições climáticas são fatores limitantes para a definição do dia de uma inspeção termográfica externa. A lista de limitações ambientais é bem extensa. Por exemplo, precisa-se de um dia que possua radiação solar significativa (quando é necessário o aquecimento por aquecimento solar), ausência de precipitação, orvalho ou geada e o mínimo possível de vento. Sugere-se que o início da inspeção ocorra após certo período após o pôr do sol, mas isso pode variar de acordo com o material inspecionado, umidade, etc. O tempo necessário dependerá da dissipação do calor armazenado, que dependerá por sua vez da superfície do corpo e do ambiente (BARREIRA, 2004)

Mesmo adotando esses controles, as condições climáticas podem mudar drasticamente e ser necessário cancelar a inspeção. Para tentar minimizar esse imprevisto, recomenda-se discutir as condições meteorológicas por meio de boletins meteorológicos, 5 dias antes e observar novamente 3 dias e 1 dia antes da inspeção (HOLST, 2000).

Os bons resultados obtidos em uma inspeção termográfica estão extremamente associados aos cuidados adotados no ensaio para a redução de interferências ambientais. Isto ocorre, pois, a distribuição térmica em um corpo, bem como a quantidade de radiação infravermelha que chega à câmera infravermelha, pode variar de acordo com alguns parâmetros ambientais tais como: temperatura ambiente, chuva e umidade, radiação solar, vento e transmitância atmosférica.

Cada uma dessas ações pode afetar a medição infravermelha de maneira diferente, por isso são detalhadas a seguir, a fim de melhor entendê-las para conseguir-se diminuí-las.

### ***2.3.5 Temperatura do ambiente***

A temperatura ambiente, além da já citada emissividade, é um dos parâmetros a ser inserido na câmera infravermelha para que seja realizada a correta medição de temperatura da inspeção. É utilizada para compensar a radiação atmosférica que é refletida na superfície do

material (RODRÍGUES, 2010). Essa compensação possui efeitos mais favoráveis em inspeções realizadas em ambientes externos, especialmente em épocas de temperaturas extremas como as que geralmente ocorrem no verão ou inverno.

Tomando-se as outras condições estáveis, um aumento da temperatura ambiente acarreta em um aumento da temperatura do objeto inspecionado. Consequentemente, a observação de defeitos, como por exemplo, falhas internas ao concreto, fica mais evidente. Em contrapartida, em dias muito frios, defeitos que comumente apresentariam um ligeiro aumento de temperatura, podem simplesmente não ser detectados (MADDING; LYON, 2002).

### ***2.3.6 Chuva e umidade do ar***

De maneira geral, pode-se afirmar que a umidade é a quantidade de vapor d'água na atmosfera. Sendo assim, quando o ar está totalmente saturado com vapor d'água cria-se a possibilidade de precipitação, dependendo das condições meteorológicas.

Quanto mais altos os índices de umidade, maiores serão as interferências negativas causadas na aplicação da termografia infravermelha. Este efeito ocorre, pois, este fenômeno resfria a superfície do objeto em inspeção o que dificulta a detecção, a avaliação e o diagnóstico do defeito. Além disso, atenua a radiação infravermelha que chega a câmera infravermelha (CRAVEIRO, 2008).

Em relação ao resfriamento, a água, seja ela proveniente de precipitação ou apenas da alta umidade do ar, quando em contato com a superfície do objeto, resfria-o. Essa dissipação de calor é devido à alta condutividade térmica da água e ao processo de evaporação.

Há ainda a atenuação da radiação infravermelha que chega ao termovisor, ou seja, a redução da transmitividade atmosférica. Quando a concentração de água na atmosfera aumenta, a transmitância reduz. Este fenômeno ocorre devido à absorção da radiação infravermelha pelo vapor d'água presente na atmosfera.

A amplitude da dispersão da radiação infravermelha depende da relação do diâmetro da gotícula de água e o comprimento de onda. Quando as partículas aumentam de tamanho, a dispersão aumenta, caso contrário, a dispersão é reduzida. No caso de neblina, por exemplo, nos quais essas partículas são relativamente grandes, a atenuação da radiação infravermelha pela atmosfera é significativa (HOLST, 2000).

### **2.3.7 Radiação solar**

Uma inspeção termográfica externa está sujeita à influência da radiação solar, principalmente se for realizada durante o dia.

A radiação solar pode interferir em uma inspeção termográfica de duas maneiras: pelo carregamento solar, que eleva a temperatura dos corpos, e pelo reflexo da luz solar, que resulta em uma medição equivocada da radiação infravermelha emitida pelo objeto (CRAVEIRO, 2008).

O aquecimento causado pelo carregamento solar ser benéfico em algumas inspeções termográficas. Por exemplo, em inspeções que buscam defeitos subsuperficiais e que compreendem grandes áreas, como em tabuleiros de pontes, um aquecimento ponto a ponto seria muito demorado, então o carregamento solar pode desempenhar esse papel. A vantagem desse efeito é a ausência de custos e que um aquecimento uniforme da área.

Mendonça (2005) sugere que, para o melhor aproveitamento do carregamento solar, os testes em concreto sejam efetuados durante o período dia, em que a radiação solar produz um rápido aquecimento da superfície, ou durante a noite, em um período que depois de ser exposta à radiação durante o dia, a superfície se resfrie. Portanto, se a inspeção for realizada à noite, a maioria dos defeitos se apresentará no termograma em valores de  $0,01^{\circ}$  a  $5^{\circ}$  C abaixo da temperatura das áreas sem defeitos. Por outro lado, em inspeções diurnas, os resultados são inversos, ou seja, nos locais onde há anomalias estarão mais quentes que as superfícies correspondentes ao concreto sem defeitos (MENDONÇA, 2005).

A desvantagem da radiação solar para a termografia infravermelha é o fenômeno de reflexão. A reflexão solar ocorre com mais intensidade em superfícies que apresentam baixa emissividade. No local onde ocorre a reflexão solar no termograma, a temperatura apresenta-se mais alta induzindo o termografista a registrar uma falsa temperatura elevada e deduzir uma falha em um local sem defeitos. Entretanto, é simples exterminar essa influência modificando a direção da visão da câmera ou fazendo a inspeção em períodos noturnos.

### **2.3.8 Vento**

O vento consiste no deslocamento de massas de ar que resulta da movimentação do ar de locais de alta pressão atmosférica para locais de

baixa pressão atmosférica. As zonas de alta ou baixa pressão atmosférica se formam devido distribuição desigual da radiação solar sobre a superfície terrestre. As áreas de temperaturas mais elevadas formam zonas de baixa pressão, já as áreas de temperaturas mais baixas, formam zonas de alta pressão, ocasionando a movimentação do ar.

Em uma inspeção termográfica, o corpo inspecionado pode perder calor pela influência do vento para o ambiente até que suas temperaturas sejam igualadas, causando, portanto, um resfriamento convectivo. Isso provoca uma diminuição da diferença de temperatura entre a superfície do objeto medido e o ambiente, resultando em erros de medição do termovisor.

Defeitos severos geralmente se apresentam em áreas mais quentes da imagem termográfica, quando a superfície é aquecida. A influência do vento, mesmo a velocidades relativamente baixas, pode reduzir essa temperatura, levando-se a crer que o problema não é grave ou até mesmo não existe, especialmente em casos de defeito inicial que geralmente apresentam apenas uma pequena elevação de temperatura (MADDING; LYON, 2002).

Para reduzir os efeitos negativos do vento em uma inspeção termográfica externa, Bolleni (2009) faz um estudo do ambiente em relação ao vento, para que seja previsto o período de menor incidência no dia. Dessa forma, é possível escolher o melhor dia para se realizar a inspeção.

### ***2.3.9 Transmissividade atmosférica***

A transmissividade, como já foi definida anteriormente, é a fração de irradiação transmitida por um corpo. Portanto, a transmissividade atmosférica é a fração de radiação transmitida pela atmosfera, que é camada de gases que cobre a Terra.

A atmosfera é formada principalmente por gases, tais como nitrogênio, oxigênio, argônio, gás carbônico e pequenas quantidades de outros gases, além de vapor d'água que podem variar dependendo da altitude, hora e espaço. Podem existir ainda na atmosfera partículas suspensas no ar, como por exemplo, poeira e poluição.

A radiação térmica captada pela câmera infravermelha fornece informação sobre a distribuição de calor sobre a superfície de um objeto. No entanto, a atenuação da radiação pela atmosfera pode distorcer significativamente esta informação devido a quatro fenômenos: absorção, dispersão, emissão e turbulência (CHRZANOWSKI, 2001).

A absorção e a dispersão atmosférica causam atenuação da propagação da radiação óptica, a emissão atmosférica adiciona uma radiação adicional à emitida pelo objeto, por fim, a turbulência causa distorção da imagem dos objetos emissores.

Existem dois tipos de absorção: absorção molecular e absorção de aerossol. Porém, devido aos componentes menores da atmosfera, a absorção molecular, é uma fonte muito mais significativa de atenuação da radiação de propagação do que a absorção de aerossol.

O fenômeno da dispersão redistribui o fluxo de radiação incidente, redirecionando-o para todas as direções e diminuindo, assim, o fluxo de propagação no sentido inicial. Existem dois tipos de dispersão atmosférica: a molecular (Rayleigh) e a dispersão de aerossol (Mie). Dentre os dois tipos, destaca-se a dispersão de aerossol, a qual afeta significativamente a transmissividade atmosférica. Geralmente, o efeito de dispersão diminui quando o comprimento de onda de propagação da radiação aumenta. Portanto, a transmissividade atmosférica na neblina, por exemplo, é muito maior na região do infravermelho do que no visível do espectro eletromagnético.

Pela lei de Kirchhoff, sabe-se que absorvidade atmosférica é igual à sua emissividade. Como a absorvidade atmosférica é sempre maior do que zero e ainda a temperatura ambiente é sempre maior do que o zero absoluto, isso significa que a atmosfera emite a sua própria radiação. No entanto, para as condições de curta distância durante medições termográficas típicas, a emissividade atmosférica é geralmente muito baixa. Por isso, o fenômeno de emissão atmosférica pode ser tratado como insignificante na maioria das aplicações de medição de temperatura.

A turbulência atmosférica é causada por movimentos de ar irregulares e aleatórios. Ela surge quando as moléculas de ar de temperaturas ligeiramente diferentes são misturadas pelo vento e pela convecção.

Do ponto de vista óptico tais movimentos significam flutuação aleatória de índice de refração da atmosfera que gera manchas em uma imagem produzida por um sistema óptico.

Este fenômeno pode prejudicar significativamente o desempenho das câmeras infravermelhas somente para distâncias entre câmera e objeto de, no mínimo, algumas centenas de metros. Porém, as medições termográficas de temperatura raramente são executadas nas distâncias de mais de 50 metros, sendo assim, a influência da turbulência atmosférica sobre os resultados das medições de temperatura com a câmera

infravermelha pode, quase sempre, ser tratada como desprezível (CHRZANOWSKI, 2001).



## **CAPÍTULO 3 - TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA COMO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO**

Neste capítulo apresentam-se os principais conceitos de termografia infravermelha utilizada como ensaio não destrutivo, descrevendo-se seus tipos e como pode ser utilizada dentro da Engenharia Civil.

### **3.1 Técnicas de utilização da termografia infravermelha**

Como já apresentado anteriormente, um corpo emite mais radiação infravermelha quanto maior sua temperatura. Portanto, para induzir esse aumento no nível de radiação é necessária uma excitação térmica no corpo. Sendo assim, baseando-se no modo de excitação térmica, a termografia infravermelha pode ser dividida em dois tipos: termografia passiva e termografia ativa.

A escolha da técnica a ser empregada dependerá do tipo de material que está sendo analisado, das condições do ambiente em que se desenvolve o ensaio e das características do possível defeito a ser detectado.

#### ***3.1.1 Termografia infravermelha passiva***

A termografia infravermelha passiva depende apenas da distribuição de calor natural ambiental na superfície do objeto em inspeção. Portanto, não há qualquer estímulo térmico artificial no objeto, sendo utilizadas na análise apenas as condições de contorno naturais.

Uma anomalia pode ser detectada em uma imagem termográfica quando existe uma distribuição anormal de temperatura. Segundo Maldague (2000), se a imagem do objeto apresenta uma diferença de temperatura (também chamada de “delta-T” ou “ponto quente”) de 1° a 2°C em relação ao ambiente, considera-se uma suspeita de uma anomalia, porém a partir de um “delta-T” de 4°C já se considera uma forte evidência de anomalia.

Estas aplicações são geralmente baseadas em regras empíricas aplicadas por pessoal experiente e nas condições ambientais necessárias para produzir uma imagem térmica interpretável.

Na maioria das vezes, este tipo de resultado proporciona apenas uma análise qualitativa, já que o objetivo é apenas apontar o local da falha. Entretanto, algumas investigações mais sofisticadas podem

proporcionar também avaliações quantitativas. Para se fazer uma análise quantitativa, convém fazer algumas análises prévias, ou seja, é necessário prever o comportamento térmico da superfície a ser analisada de forma analítica (mais simples) ou por meio de modelos de transferência de calor utilizando-se o método dos elementos finitos, por exemplo (MALDAGUE, 2000).

### 3.1.2 Termografia infravermelha ativa

No caso da aplicação da técnica de termografia infravermelha ativa, deve haver um estímulo de energia térmica artificial sobre a superfície do corpo inspecionado.

Nesta técnica, as análises quantitativas são mais utilizadas, pois é possível ter-se um bom conhecimento sobre as características térmicas dos estímulos aplicados à superfície do corpo.

De acordo com Cortizo (2007), esse estímulo pode ser feito de diversas maneiras, tal como é apresentado na Tabela 3.1.

Dependendo do tipo de estímulo empregado pode-se dividir a técnica de termografia infravermelha ativa em três grandes grupos: métodos de estimulação ópticos, métodos de estimulação indutivos ou eletromagnéticos e métodos de estimulação mecânicos.

Como métodos de estimulação óptica, podem ser citadas: a termografia pulsada (*pulsed thermography*), aquecimento de pulso longo (*step heating*) e a termografia modulada (*lock-in thermography*). Outra técnica muito comum é a vibrotermografia (*vibrothermography*) que é um método de estimulação mecânico. Essas quatro técnicas citadas são bastante utilizadas no meio científico e serão mais bem definidas a seguir.

**Tabela 3.1 – Variação do estímulo térmico na aplicação de termografia ativa (Cortizo, 2007 - Adaptado).**

Propriedades	Característica
Intensidade	Alta Baixa
Posição	Sobre a face da superfície pesquisada Sobre a face oposta da superfície pesquisada
Frequência	Pulso Constante Modulado
Tempo	Instantâneo Moderado espaço de tempo
Tipo	Injeção de calor Injeção de jatos de ar frio

### 3.1.2.1 Termografia Infravermelha Pulsada

A termografia pulsada é uma das técnicas mais promissoras na área de Termografia Infravermelha (MALDAGUE, 2001). Tal fato se deve a três principais características: rapidez de inspeção, que varia de acordo com o tempo de duração do pulso térmico empregado; possibilidade de aplicação direta em condições de operação do componente analisado e, por fim, prevenção de danos ao sistema ensaiado, devido à baixa intensidade energética dos estímulos utilizados (OSHIRO, 2011).

Esta técnica consiste basicamente em aquecer rapidamente a amostra e, em seguida, registrar a curva de decaimento da temperatura.

Após o pulso térmico inicial, a temperatura da superfície do material muda rapidamente devido à difusividade térmica do material e ainda devido a perdas de calor por radiação e convecção. A presença de um defeito reduz a taxa de difusão de modo que quando da observação da temperatura da superfície, os defeitos aparecem como zonas de diferentes temperaturas no que respeita à área circundante. Consequentemente, falhas mais profundas são percebidas em um tempo de observação maior e seu contraste é reduzido (MALDAGUE, 2000).

O tempo de observação ( $t$ ) é representado pela Equação 3.1 que relaciona a este parâmetro a profundidade ( $z$ ) e a perda de contraste térmico ( $C$ ).

$$t \sim \frac{z^2}{\alpha} \quad e \quad C \sim \frac{1}{z^3} \quad (3.1)$$

Sendo  $\alpha$  a difusividade térmica do material.

Todavia, essas relações possuem limitações, pois os defeitos visíveis serão geralmente superficiais já que o contraste térmico é fraco para maiores profundidades.

Uma regra empírica valiosa diz que o raio do menor defeito detectável deve ser, pelo menos, uma a duas vezes maior do que a sua profundidade sob a superfície. Esta regra é válida para material isotrópico homogêneo. Em caso de anisotropia, a regra é mais restrita (VAVILOV; TAYLOR, 1982)(MALDAGUE, 2001).

A termografia infravermelha pulsada pode ser executada de acordo com alguns tipos de configurações:

- Inspeção pontual: aquecimento feito com laser ou com feixe de luz focalizada. As vantagens são a facilidade de repetição do

aquecimento, bem como sua uniformidade. Por outro lado, o processo torna-se demorado caso seja necessário inspecionar uma superfície inteira, já que deve-se mover a amostra e aquecê-la por partes.

- Inspeção por linha: aquecimento por lâmpadas lineares, fio aquecido, laser por scanner (varredura a laser) e linhas de jato de ar (frio ou quente). A vantagem principal é a inspeção rápida graças a facilidade de movimentação lateral. A projeção de uma série de tiras de aquecimento de linha é bastante usada para detectar fissuras superficiais.

- Inspeção por superfície: aquecimento por lâmpadas em geral, lâmpadas de *flash*, soprador térmico, etc. Possui como vantagem a análise completa do fenômeno, uma vez que toda a curva de evolução da temperatura é registrada. Entretanto, o inconveniente se dá devido a preocupações quanto a não-uniformidade do aquecimento.

A estimulação da termografia pulsada pode ser por reflexão ou por transmissão. Tomando a amostra como referência, o primeiro caso é definido quando a fonte de excitação térmica está localizada do mesmo lado do ponto de captação da imagem, enquanto que o segundo o caso ocorre quando a fonte de calor e o ponto de captação de imagem estão em lados opostos.

Neste trabalho será utilizada a termografia pulsada quando adotada a termografia infravermelha ativa, sendo o tipo de inspeção por superfície e aquecimento por reflexão. Maiores detalhes sobre os tipos de aquecimento adotados serão mostrados na descrição de cada experimento.

O conhecimento do contraste térmico na aplicação da termografia infravermelha pulsada é um fator que auxilia na investigação de defeitos subsuperficiais. Simplificadamente, o contraste térmico padrão pode ser definido de acordo com a Equação 3.2:

$$C(t) = \frac{T_i(t) - T_i(t_0)}{T_s(t) - T_s(t_0)} \quad (3.2)$$

Onde  $T$  é a temperatura,  $t$  é a variável de tempo. Os índices  $i$  e  $s$  se referem a área defeituosa e área intacta, respectivamente. A subtração de temperatura nos tempos  $t$  e  $t_0$  é realizada com o objetivo de suprimir contribuições adversas do ambiente.

Neste trabalho, o contraste térmico é utilizado para avaliar a delaminação que ocorre em vigas reforçadas com PRF e será mais bem detalhado no capítulo 6.

### *3.1.2.2 Termografia infravermelha de aquecimento de pulso longo (Step Heating)*

Ao contrário da termografia pulsada, na qual a temperatura de decomposição é de interesse (após o pulso de calor), neste caso, o aumento de temperatura da superfície é monitorado durante a aplicação de um pulso longo de aquecimento.

Esta técnica se aplica geralmente para a avaliação da espessura do revestimento (incluindo revestimentos de multicamadas).

A vantagem desta técnica é que a profundidade e as características térmicas são acessíveis a partir de uma única medida, sem sequer requerer o conhecimento sobre a região não defeituosa. Na verdade, o tempo de início de aquecimento antes de os defeitos subsuperficiais se manifestarem permite calibrar a imagem, a fim de levar em conta as variações espaciais de emissividade e refletividade e assim a restrição de aquecimento uniforme deixa de ser um item importante.

Apesar de, do ponto de vista experimental, a termografia infravermelha pulsada ser diferente da de pulso longo, do ponto de vista matemático ambos os procedimentos fornecem sinais térmicos que contém exatamente a mesma informação (FAVRO; HAN, 1998). Sendo assim, a escolha depende do tipo de aplicação e, mais especificamente, da escala de tempo do fenômeno de interesse. Fenômenos mais lentos são mais bem explorados utilizando-se a termografia de pulso longo enquanto que a termografia pulsada se aplica melhor a fenômenos mais rápidos.

Para se escolher entre os dois métodos, pode-se considerar um período de tempo de aquecimento necessário para que um dado defeito se destaque de seu fundo e assim adota-se o processo que permita colocar um máximo de energia na amostra durante um determinado período de tempo para produzir o maior sinal. Contudo, segundo Favro et al. (1998) em uma determinada aplicação, o impulso térmico deve ser ajustado de modo que a temperatura máxima alcançada na superfície não danifique a amostra. No entanto, outros critérios práticos, tais como a limitação de potência para fontes contínuas ou limitação do ajuste da

duração de impulsos para fontes pulsadas, devem ser também considerados.

### 3.1.2.3 Termografia infravermelha modulada (ou dinâmica)

A termografia infravermelha modulada é um método dinâmico de medição baseado em ondas térmicas geradas no interior da amostra.

A amostra é submetida a um aquecimento de modulação sinusoidal com uma frequência  $\omega$ , que introduz ondas térmicas altamente atenuadas no interior do material (em uma região perto da superfície).

A superfície do material é termicamente excitada por impulsos periódicos de calor (gerados na maioria dos casos por lâmpadas moduladas), enquanto que a oscilação resultante de temperatura é monitorada com a câmera infravermelha (RODRÍGUES, 2010).

Para obtenção de resultados satisfatórios, ao se adotar esta técnica, deve-se monitorar a dependência exato de tempo entre o sinal da temperatura captada e o sinal de referência (aquecimento da modulação sinusoidal). Isto pode ser feito por um amplificador *lock-in* com aquecimento a laser ponto por ponto, ou com um computador para uma implantação de total de campo.

A excitação por onda sinusoidal pode ser realizada com a utilização de lâmpadas halógenas, laser ou pistolas de ar quente sobre a superfície do objeto em inspeção.

Esta técnica possui a vantagem de possibilitar implantações em grandes áreas (aproximadamente 2 m<sup>2</sup>) permitindo a detecção de pequenos defeitos.

### 3.1.2.4 Vibrotermografia

Esta é uma técnica em que, sob o efeito de vibrações mecânicas induzidas externamente à estrutura, a energia mecânica é convertida em energia térmica. O calor liberado pelo atrito das vibrações mecânicas ocorre precisamente nos locais onde defeitos estão localizados, tais como fendas e delaminações. Aumentando ou diminuindo a frequência de excitação mecânica, gradientes térmicos locais aparecem ou desaparecem a uma frequência de ressonância específica. Modelagens diretas permitem determinar frequências de excitação adequadas.

A principal vantagem desta técnica é a detecção de falhas dificilmente visíveis por outros regimes termografia infravermelha, tal

como no caso de fendas fechadas. Além disso, possui capacidade para inspecionar grandes áreas estruturais *in loco*. Por outro lado, a carga mecânica exigida pode ser difícil de alcançar em alguns casos.

### **3.2 Aplicação da termografia infravermelha na engenharia civil**

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

Grinzato, Vavilov e Kauppinen (1998) fizeram uma análise termográfica da envolvente de um edifício em regime térmico transiente e os resultados experimentais permitiram detectar deficiências de isolamento, detecção de fugas de ar e ainda realizar o mapeamento de umidade.

No Brasil, podem ser citadas algumas pesquisas como por exemplo a de Barreira (2004) que utilizou esta técnica para identificação de deficiências de isolamento térmico e umidade na estrutura de um edifício, fazendo um estudo sobre o comportamento higrotérmico dos elementos construtivos de um edifício. Um de seus importantes resultados foi a definição do tempo de secagem aproximado dos corpos de prova de concreto autoclavado pelas imagens térmicas.

Altoé e Filho (2012) vistoriaram uma edificação utilizando a termografia infravermelha para detectar patologias construtivas e identificar detalhes relacionados às características térmicas da construção com o objetivo de definir ações de manutenção da estrutura física e medidas de conservação de energia da edificação.

Pode-se citar ainda a aplicação da termografia infravermelha para identificação e avaliação de anomalias em fachada cerâmica, tal como mostra a pesquisa de Bauer et al. (2015). Neste estudo, são controladas em laboratório cada uma das variáveis relacionadas com a técnica e com o defeito. Foi comprovado que falhas de aderência ou ausência de argamassa por trás da cerâmica são identificáveis e quantificáveis utilizando-se a termografia infravermelha.

Na Europa, a termografia infravermelha já tem sido bastante empregada há anos na identificação e diagnóstico de patologias do patrimônio histórico, além de ser um poderoso instrumento de identificação de estruturas ocultas de seus elementos. Como exemplos podem ser citados os estudos de Bison et al. (1998), Maierhofer e Roellig, (2009), Imposa (2010), Moropoulou et al. (2013) entre tantos outros.

Todavia, em relação ao patrimônio histórico e cultural brasileiro, Cortizo e Barbosa (2008) foram os precursores desse tema de pesquisa. Efetuando-se uma análise termográfica, foram identificadas com sucesso nas edificações áreas de umidade nas quais eram necessárias intervenções a fim de preservar esses bens.

Especificamente na área de estruturas a termografia infravermelha está mais associada à inspeção de estruturas de concreto tais como: tabuleiros de pontes, estradas, barragens, garagens, pistas de taxiamento de aeroporto e edifícios, mostrando-se precisa e eficiente na localização de vazios, delaminações, bem como em problemas em ligações estruturais, umidade, entre outras anomalias (NAIK; SINGH; ZACHAR, 1997).

Segundo Weil (2004), o primeiro trabalho experimental documentado sobre o uso de termografia infravermelha para detectar delaminações subsuperficiais de concreto foi publicada pelo Ministério dos Transportes e Comunicação de Ontário, no Canadá, em 1973. Os pesquisadores basearam-se na utilização de um simples gerador de imagens infravermelhas para medir a temperatura da superfície do tabuleiro de uma ponte de concreto e não utilizaram qualquer aprimoramento computacional. Devido ao pouco desenvolvimento da técnica, a coleta de dados foi efetuada em diversas situações diferentes, como por exemplo, em períodos diurnos e noturnos, obtendo-se resultados bastante satisfatórios.

Mais tarde, Tanaka; Tottori e Nihei (2006) também detectaram delaminações em concreto de um viaduto com a termografia infravermelha ativa, aquecendo o elemento com lâmpadas de arco de xenônio, lâmpadas halógenas e irradiação infravermelha longa. Os resultados foram comparados ao ensaio de esclerometria e a ensaios laboratoriais com placas planas de concreto compostas por vazios artificiais. Os autores concluíram a eficiência do método, afirmando que ele pode até mesmo substituir a esclerometria.

Larget et al. (2011) realizaram uma análise quantitativa da termografia infravermelha passiva com o objetivo de mensurar anomalias internas ao concreto. Muros de concreto de diferentes espessuras foram avaliados em ambiente externo e foram comparados a modelos experimentais baseados no método das diferenças finitas. Foram ainda estudadas as sensibilidades dos parâmetros tais como: influência da densidade do concreto, calor específico, condutividade térmica. Concluiu-se que principalmente a densidade e o calor específico do material devem ser estimados com precisão para que haja resultados confiáveis.

Pettes (2011), em uma análise computacional, avaliou a integridade subsuperficial de estruturas de concreto utilizando imagens térmicas e redes neurais artificiais para identificar o tamanho e posição da anomalia. Alguns dos algoritmos desenvolvidos pelo autor mostraram-se ágeis e eficientes na detecção do dano.

Pesquisas nacionais e principalmente internacionais revelam o imenso campo que o ensaio não destrutivo de termografia infravermelha pode abranger dentro da Engenharia Civil.

O presente estudo está direcionado para a aplicação deste método na detecção de danos de aderência entre concreto e PRF. Polímeros reforçados com fibras (PRF) aderidos ao concreto podem trazer diversos benefícios à estrutura, conforme mostra o capítulo a seguir. Tais benefícios podem ser perdidos caso esta ligação não esteja adequada e para inspecionar esta aderência pode-se utilizar o ensaio não destrutivo de termografia infravermelha.



## **CAPÍTULO 4 - ESTRUTURAS DE CONCRETO UNIDAS A POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS E A TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**

Nesta etapa, são apresentadas as maneiras de como o PRF pode estar associado ao concreto promovendo reforço ou mesmo fazendo parte da estrutura (estrutura mista). Além disso, são definidos os problemas de aderência entre estes materiais e de que maneira a termografia infravermelha pode diagnosticar este problema.

### **4.1 Estruturas de concreto unidas a Polímero Reforçado com Fibras (PRF)**

Os compósitos de PRF podem ser considerados um dos principais desenvolvimentos ocorridos nas áreas de construção e recuperação de estruturas nas últimas décadas (LESKO et al., 2002).

Esse material pode fornecer ao engenheiro civil a solução para muitos dos principais problemas estruturais. Por exemplo, os reforços antes executados em aço e concreto agora têm sido substituídos com sucesso pelo PRF, que pode ser aplicado a prédios, pontes e outros sistemas de infraestrutura.

Por isso, torna-se importante conhecer os modos de utilização do PRF, especialmente aqueles nos quais é possível aliá-lo ao concreto. Afinal, o concreto ainda é um dos principais materiais utilizados nas construções atuais, já bastante conhecido e estudado pelos engenheiros durante anos. Nos subitens seguintes apresentam-se algumas aplicações do PRF aliado ao concreto, exemplificadas com exemplos bem sucedidos.

#### ***4.1.1 Lajes e vigas mistas de concreto com perfil pultrudado de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)***

No ano de 2002, desenvolveu-se na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) um projeto de pesquisa denominado “Laje Mista de Concreto e Perfis Pultrudados de PRFV – Aplicação em Tabuleiros de Passarelas”, cujo objetivo principal era o desenvolvimento de uma laje mista composta de uma capa de concreto colada a perfis pultrudados de PRFV com resina epóxi e com preenchimento de blocos de poliestireno expandido (EPS) entre perfis e adição de fibras curtas de polipropileno à mistura de concreto para controle da fissuração,

conforme mostra a Figura 4.1. A aplicação principal desta laje foi em passarelas expostas a ambientes de atmosfera agressiva.

A partir deste projeto de pesquisa, alguns trabalhos da pós-graduação em Engenharia Civil da UFSC foram desenvolvidos visando dar continuidade ao tema e, assim, melhor explorar este tipo de estrutura. Dentre eles, pode ser citar a tese de doutorado de Santos Neto (2006) na qual foram realizados ensaios experimentais de resistência de aderência entre concreto e perfil de PRFV, além de análise da laje sob flexão por meio da Teoria de Viga de Timoshenko, análise numérica usando o Método dos Elementos Finitos e ainda, para verificar o comportamento à fluência do sistema de laje mista proposto, realizou-se um ensaio de flexão de longa duração na laje mista, com carregamento uniformemente distribuído.



**Figura 4.1: Laje mista de concreto e PRFV. (SANTOS NETO, 2006).**

Após este trabalho, foram publicados diversos artigos sobre este tema bem como algumas dissertações de mestrado. Na dissertação de mestrado de Canalli (2010) obteve-se a rigidez à flexão dos perfis pultrudados, determinando-se os módulos de elasticidade longitudinal ( $E$ ) e de cisalhamento ( $G$ ) assim como para vigas mistas formadas por uma capa de concreto disposta sobre um perfil de PRFV, usando blocos de EPS como enchimento. A obtenção destes parâmetros foi realizada de forma experimental e numérica.

Vieira (2010), por sua vez, analisou o comportamento da laje mista submetida a cargas concentradas estáticas e dinâmicas para diferentes espessuras de capa de concreto e diferentes tipos e teores de fibras de polipropileno incorporadas às misturas de concreto, fazendo análises experimentais e numéricas.

Junges (2010) estudou o comportamento das vibrações desta mesma laje quando induzida por atividades humanas. Neste trabalho o autor examinou os critérios de dimensionamento da laje mista, tanto

para o Estado Limite de Serviço quanto para o Estado Limite Último, visando aplicação em passarelas.

Observou-se por meio das diversas pesquisas o grande potencial desta laje mista. Contudo, assim como na utilização do PRFC para reforço e recuperação de estruturas, pode haver uma ruína prematura caso o perfil de PRFV e o concreto se desprendam, o que pode ocorrer por simples falhas de colagem ou mesmo devido à delaminação do concreto. Isto demonstra a importância do estudo da zona de ligação concreto-adesivo-PRF, especialmente quanto à detecção prematura de falhas nestas áreas.

#### ***4.1.2 Recuperação e reforço externo de estruturas***

Para reforço e reabilitação de estruturas, além das técnicas tradicionais que utilizam concreto e aço, pode-se recorrer à utilização de técnicas executadas com materiais compósitos, como mantas ou laminados de PRF que são colados criteriosamente nas faces dos elementos para resistirem à flexão e ao cisalhamento (JUVANDES, 1999).

Esta técnica que utiliza o reforço de compósito de fibras, especialmente de carbono, tem sido muito utilizada para aumentar a vida útil das estruturas de concreto, tais como pontes, edifícios e construções industriais (MARINI, 2011). Suas duas maiores aplicações são: recuperação e reforço de estruturas submetidas à ação de cargas sísmicas e em estruturas que sofreram corrosão das armaduras, no caso do concreto armado.

Devido à grande potencialidade deste tipo de reforço, já existem inúmeras pesquisas sobre o assunto.

Curty (2009) apresenta em sua dissertação de mestrado um estudo experimental de consoles curtos de concreto armado reforçados com compósitos de fibras de carbono. Os consoles foram instrumentados com extensômetros elétricos de resistência na armadura tracionada, no estribo, no concreto e no compósito. Os ensaios comprovaram um razoável aumento da capacidade resistente dos elementos estruturais quando aplicada essa técnica de reforço.

Fortes (2004) estudou em sua tese de doutorado o comportamento de peças de concreto armado reforçadas aos esforços de flexão seguindo a técnica de colagem de laminados pré-fabricados de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) em entalhes realizados no concreto. O autor abordou ainda aspectos de projetos, analisando procedimentos do

ACI e CEB-FIP, específicos para o reforço de estruturas com materiais compósitos. Os resultados experimentais foram comparados aos resultados obtidos por meio de análise computacional, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos, indicando viabilidade da técnica.

Na dissertação de mestrado de Souto Filho (2002) foi elaborada uma modelagem numérica de reforço estrutural em vigas de concreto armado, utilizando um programa computacional baseado no método dos elementos finitos capaz de descrever o comportamento de elementos estruturais prismáticos em concreto armado reforçados à flexão.

Monti (2003) discute sobre técnica de reforço com PRF para pilares submetidos a abalos sísmicos. Segundo o autor, o confinamento do concreto pela envoltória da manta de PRF pode aumentar a capacidade de carga axial e a ductilidade desses pilares. Essa conclusão foi obtida avaliando as propriedades do FRP e também a pressão de confinamento do concreto quando utilizado o reforço, dentre outras análises.

Outra aplicação para reforço de estruturas que passaram por abalos sísmicos é descrita por Burwell; Hooper e Anderson (2006). Neste artigo, relata-se a reestruturação do Centro Médico Harborview de Seattle. Após a expansão do edifício, foi necessário adequar a área antiga para que seu desempenho sísmico ficasse compatível com a construção mais recente. Contudo, uma das condições para se realizar essa tarefa era manter a ocupação máxima possível do local com segurança estrutural, ou seja, era necessário haver o mínimo de interrupção das atividades do hospital durante os serviços de reestruturação. Além disso, era preciso adotar uma solução econômica que estivesse dentro do orçamento previsto. Portanto, para atender a essas requisições, foi proposto o reforço com PRF. O projeto para tal reestruturação foi baseado nos resultados de programa de teste que representava o comportamento de um elemento de análise não linear, tridimensional. O resultado foi bastante satisfatório resultando em projeto de um edifício que terá a capacidade de responder de forma previsível às forças sísmicas e permanecerá seguro para ser ocupado após um evento sísmico.

Percebe-se que a técnica de reforço à flexão de vigas de concreto armado pela colagem de PRF mostra-se bastante eficiente. Porém, pode ser caracterizada como um recurso recente, mesmo já tendo sido testada em diversos estudos experimentais. Ocorre que, na maior parte destes estudos, observa-se a ruína prematura do reforço, tendo como causa o seu desprendimento do substrato de concreto. Esse tipo de ruína é extremamente indesejável, pois ocorre sem aviso e antecipa o colapso da

viga reforçada, impossibilitando o total aproveitamento das propriedades resistentes à tração do PRFC (FERRARI; PADARATZ; LORIGGIO, 2002). Por isso, a aderência na interface entre esses materiais merece especial atenção, o que é um dos objetivos principais deste trabalho.

## **4.2 Aderência do PRF ao concreto**

Para garantir a funcionalidade de estruturas que possuem o PRF ligado ao concreto é necessária uma correta conexão entre estes dois materiais.

Nos casos em que o PRF está ligado externamente ao concreto, tal conexão é executada por ligações (ou juntas) coladas, ou seja, a aderência do PRF ao concreto é realizada por meio de uma matriz polimérica (por exemplo, uma resina de saturação).

Woo e Lee (2010) descrevem que, para estruturas de concreto reforçadas por PRFC, o comportamento desse conjunto é regido principalmente pela interação interfacial, que representa a transferência de tensão e de deslizamento relativo entre o concreto e o PRFC. Essa tensão é propagada como tensão de cisalhamento na interface.

Observa-se, porém, que o mesmo ocorre para qualquer estrutura na qual o PRF esteja colado externamente ao concreto, seja esta uma estrutura nova ou reforçada.

A resistência dessa ligação é governada pela aderência entre os materiais envolvidos. Logo, uma vez que a ligação Concreto/PRF não seja adequada, pode haver o desprendimento do substrato de concreto, causando uma ruína prematura. Este tipo de ruína prematura tem chamado à atenção da grande maioria dos pesquisadores e, conseqüentemente, tem sido o principal motivo de projetistas mais conservadores evitarem a especificação deste tipo de arranjo estrutural.

De acordo com Shin, Webb e Peters (2013), grande parte das publicações sobre o reforço com PRFC em vigas de concreto tem dado especial atenção à zona de ligação dos materiais concreto/adensivo/PRFC, para melhor conhecer o que se passa ao nível de comportamento geral nesta região.

Estas publicações podem ser divididas em três grupos. O primeiro grupo é formado pelos modelos empíricos que se caracterizam pela observação e análise estatística de resultados experimentais; o segundo é baseado na mecânica da fratura, que geralmente conduz a modelos complexos e de difícil aplicação, e o terceiro está relacionado a

propostas de projetos, que se baseia em um conjunto de modelos analíticos, idealizado por uma abordagem simplificada, com o objetivo da implementação de ferramentas para o dimensionamento e verificação de estruturas de concreto e PRF (TENG et al., 2002) (BEBER, 2003).

Dentre os modelos empíricos, pode-se citar o estudo realizado por Bengar e Maghsoudi (2010). Os autores ensaiaram algumas vigas contínuas de concreto armado de elevada resistência reforçadas com PRFV e PRFC a fim de avaliar o descolamento do polímero devido à fissuração intermediária na viga. Os resultados experimentais foram comparados aos modelos teóricos do ACI440, JSCE, Teng et al. (2003) e Toutanji et al. (2006). Nesta mesma linha segue o trabalho de Sena Crus; Barros e Faria (2001) já que um dos objetivos foi a obtenção da relação entre tensão e deslocamento de aderência entre concreto e PRFC por meio da realização de ensaios de arrancamento à flexão (*pull-out bending test*) em uma viga de concreto armado reforçada com laminado de PRFC embutido. Além disso, foi estudado o comportamento nesta interface em condições de carga cíclica e para diferentes níveis de carga. Mais um estudo interessante nessa área é apresentado por Buyukozturk; Gunes e Karaca (2004) no qual se apresenta uma revisão dos progressos alcançados na caracterização e modelagem de falhas de aderência relativas às aplicações em concreto reforçado com PRF.

Outras pesquisas como a de Chen e Teng (2001) e de Cao et al. (2007) são baseadas em modelos da mecânica da fratura. Os primeiros autores desenvolveram um modelo novo, simples e racional, baseado em uma análise de mecânica da fratura e observações experimentais da literatura que é considerado bastante adequado para aplicação prática. Na mesma direção segue o trabalho de Cao et al. (2007). Estes autores deduziram, a partir dos ensaios realizados, um modelo para comportamento de aderência entre concreto e PRF baseado em curvas de aderência (*bond-slip curves*). Observaram que a resistência do concreto tem efeito significativo na tensão máxima de aderência, mas pouco efeito no deslocamento correspondente à tensão de aderência máxima. Baseados nestes resultados, os autores propuseram um modelo logarítmico e um modelo parabólico simples para representar as curvas constitutivas experimentais de aderência. Pode-se citar ainda mais exemplos de modelos baseados na mecânica da fratura os trabalhos desenvolvidos por Woo e Lee (2010), Caggiano e Martinelli (2013), entre outros.

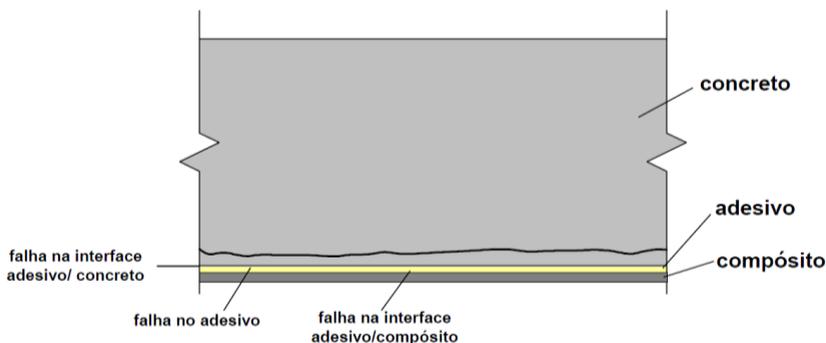
Por fim, tem-se ainda as pesquisas baseadas em modelos analíticos desde estudos mais antigos como os de Van Gemert (1980)

até estudos um pouco mais recentes como os de Yuan et al. (2004), Toutanji et al. (2006) e Hadigheh; Gravina e Setunge (2013).

No trabalho de Yuan et al. (2004), apresenta-se uma solução analítica na qual se emprega um modelo de aderência bilinear local, considerado mais realista. Neste artigo, o processo de descolamento é discutido em detalhes e os resultados das análises são comparados aos dados experimentais. Já no estudo de Toutanji et al. (2006), os autores montam um extenso banco de dados, baseados em diversos estudos existentes, sobre o comportamento de vigas de concreto armado sob flexão reforçadas externamente por PRF protendido. A partir destes dados, verificam-se as equações apresentadas no ACI 440 relacionadas à aderência concreto/PRF e ainda uma equação modificada é proposta. Em um estudo mais atual, Hadigheh; Gravina e Setunge (2013) apresentam um novo método de equação diferencial para estimar o perfil de tensão local e global de juntas adesivas na interface concreto/PRF, a partir de resultados de uma série experimental de testes simples de cisalhamento que têm sido utilizados para investigar os efeitos da espessura e largura da linha de adesão na interface concreto/PRF.

Em todos estes estudos nota-se que a perda de aderência ocorre quando a força resistente na ligação PRF/Concreto é superada, o que pode levar ao desenvolvimento de vários mecanismos de falha.

As possíveis falhas na interface concreto/compósito podem ocorrer em diferentes locais, conforme ilustra a Figura 4.2, podendo ser provenientes de: ruptura coesiva no adesivo (falha no adesivo), ruptura adesiva na superfície do compósito (falha na interface adesivo/compósito) e ruptura adesiva na superfície do concreto (falha na interface adesivo/concreto).



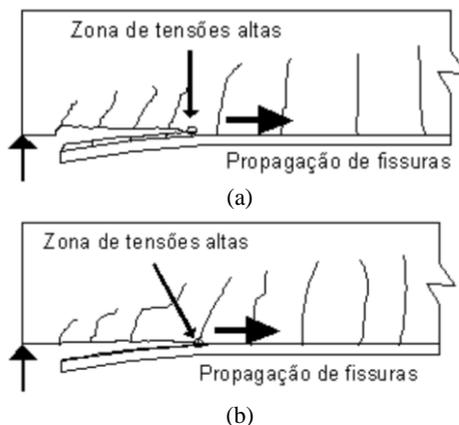
**Figura 4.2:** Localizações de possíveis falhas na interface (BEBER, 2003).

Cada uma dessas falhas pode ocorrer por diferentes motivos. A ruptura coesiva no adesivo pode surgir no momento em que a tensão de corte do adesivo é ultrapassada e, por isso, esta falha está intimamente associada a falhas na colagem. Portanto, neste caso, é essencial que haja um controle na qualidade de execução para evitar o aparecimento de bolhas de ar. Já a ruptura adesiva na superfície do compósito pode ser prevenida evitando-se, deterioração do material (como a corrosão), solicitações de fadiga e ainda erros de aplicação, como, por exemplo, eliminação defeituosa de excessos de compósito na execução de um reforço. Logo, é necessário controle de qualidade, manutenção (preditiva e preventiva) e em alguns casos, proteção contra corrosão. Por fim, a ruptura adesiva na superfície do concreto pode ocorrer devido a erros de aplicação ou a baixa resistência à tração na superfície de base da colagem. Para impedi-la deve-se preparar adequadamente a superfície do concreto bem como orientar a equipe em relação à qualidade da execução.

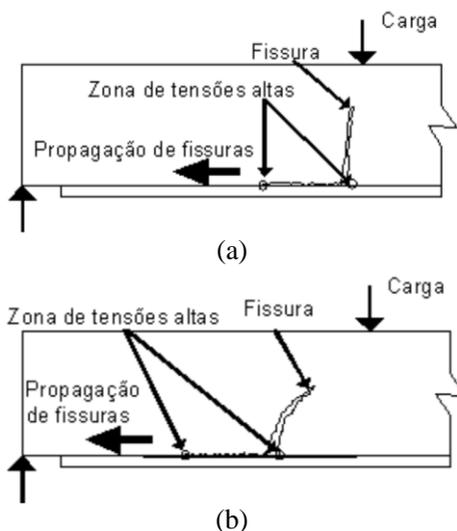
Além da localização, é importante ainda avaliar os diferentes modos de descolamento devido a falhas na interface PRF/concreto. Nesse sentido, Teng et al. (2003), avaliando alguns trabalhos como os de Saadatmanesh e Ehsani (1991) e também de Takeda et al. (1996), classificaram a ocorrência dessas falhas em dois tipos:

(a) Aquelas associadas a elevadas tensões interfaciais próximas à extremidade da placa de PRF, conforme ilustram as Figuras 4.3 (a) e (b).

(b) Aquelas induzidas por fissuras de flexão ou flexão-cisalhamento (fissuras intermediárias) localizadas longe das extremidades da placa de PRF, conforme ilustram as Figuras 4.4 (a) e (b).



**Figura 4.3 – Descolamentos na interface concreto/PRF iniciado na extremidade do PRF: (a) Separação do concreto de cobertura, (b) Descolamento interfacial iniciado na extremidade da placa (Teng et al., 2003).**



**Figura 4.4 – Descolamentos na interface concreto/PRF iniciado longe da extremidade do PRF devido a fissuras intermediárias: (a) Descolamento interfacial induzido por fissuras de flexão intermediárias, (b) Descolamento interfacial induzido por fissuras de flexão-cisalhamento intermediárias (Teng et al., 2003).**

As falhas por descolamento com início na extremidade do PRF podem ocorrer em dois locais: ou na camada de cobrimento do concreto ou no adesivo. O primeiro caso acontece com mais frequência e acredita-se que tem início com a formação de uma fissura localizada ao final ou próximo ao final do PRF, uma vez que existem altas tensões normais e de cisalhamento concentradas ao final do PRF, que excedem a resistência do elemento mais fraco, no caso o concreto.

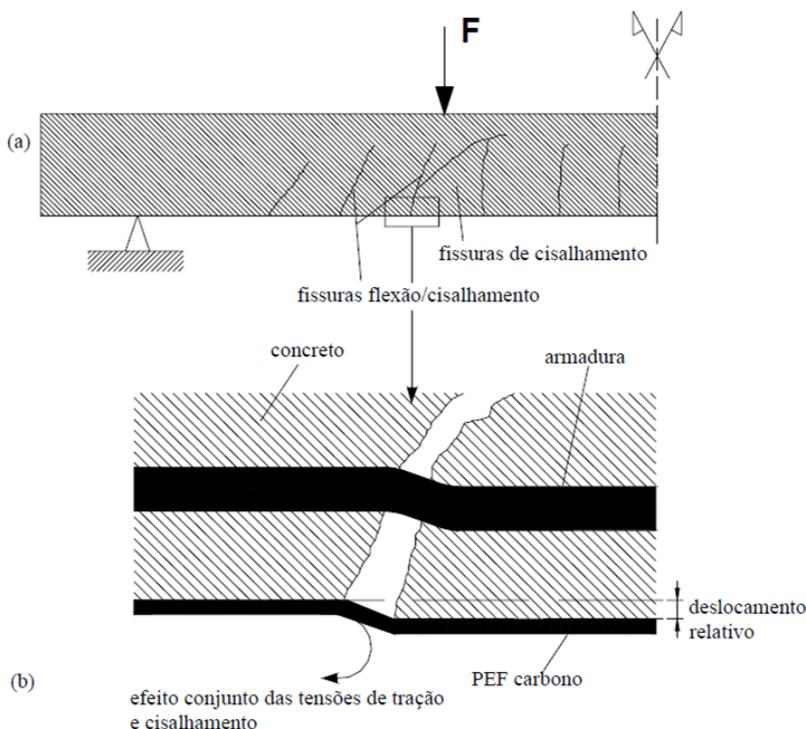
Utilizando como exemplo uma viga de concreto armado reforçada com PRFC em sua parte inferior, uma fissura formada próxima à extremidade de PRFC ou nesta própria extremidade se propaga de verticalmente ou levemente inclinada até chegar ao nível da armadura de tração. A partir deste ponto, a fissura progride horizontalmente ao longo da viga (SMITH; TENG, 2002). Como resultado, observa-se que o concreto de cobrimento se separa do restante da peça (Figura 4.3a), geralmente sem sinais de aviso.

É possível ainda que haja um descolamento entre o adesivo e o concreto, também com fissuração iniciada a partir do final do PRF (Figura 4.3b). Este comportamento geralmente acontece quando o adesivo utilizado para colagem é não possui boa qualidade. Contudo, os adesivos existentes no mercado atualmente possuem características desejáveis, apresentando inclusive uma resistência superior ao concreto, tornando menos frequente a ocorrência de falhas no adesivo (SWENSON; BARNES, 2002).

A ruptura na interface concreto/PRF induzida por fissuras intermediárias, conforme ilustram as Figuras 4.4(a) e (b), tem sido abordada em diversos artigos como, por exemplo, nos trabalhos de Teng et al. (2003), Yuan et al. (2004) e Hadigheh; Gravina e Setunge (2013). Neste tipo de ruptura observa-se o aparecimento de tensões de cisalhamento no PRF ou de tensões de corte no concreto entre armadura e PRF.

Tomando novamente o exemplo de uma viga de concreto armado reforçada com PRFC em sua parte inferior, segundo Teng et al. (2003), sabe-se que, no momento em que essa estrutura é solicitada à flexão, surgem fissuras na região tracionada do elemento, exatamente onde está localizado o reforço (PRF). Este material fica, portanto, bastante tensionado e estas tensões são transferidas para as bordas do elemento de concreto, iniciando uma propagação de fissuras no concreto na direção horizontal e adjacente à interface concreto/PRF que propiciam o descolamento do reforço. As fissuras têm início no ponto de tensão mais alto, devido à atuação do momento fletor, quando a tensão de tração resistente na borda inferior do concreto é ultrapassada.

Segundo Meier (1995), caso os esforços de cisalhamento estejam agindo simultaneamente à tensão de tração, como ilustrado na Figura 4.4 (b), pode haver um deslocamento relativo em relação às bordas da fissura. Sendo assim, ocorre um desvio vertical que resulta em esforços de flexão no PRF e, conseqüentemente, esforços de tração no concreto. Se a resistência à tração do concreto é excedida, uma fissura se desenvolverá na direção paralela à superfície inferior da viga, e a camada de PRF se separará ao longo de todo comprimento da viga, juntamente com uma camada de concreto de aproximadamente 5 a 10 mm de espessura. A Figura 4.5 demonstra com maiores detalhes como ocorre esta ação.



**Figura 4.5: Detalhes da fissuração de flexão-cisalhamento que leva ao descolamento do compósito do concreto (MEIER, 1995).**

De acordo com o mesmo autor, o efeito de cisalhamento entre concreto e PRF devido ao desvio vertical, depende de alguns parâmetros, tais como: carregamento (magnitudes de momento, de

esforço axial e de cisalhamento), propriedades mecânicas dos materiais (concreto, armadura e PRF), geometria da fissura (tamanho, largura e direção do desvio vertical) e deformação máxima do material do PRF devido a forças externas.

Günter (1999) destaca ainda que os poros do concreto bem como a umidade transportada na interface concreto/PRF possuem importância significativa na magnitude das tensões de cisalhamento, pois as diferenças de propriedades físicas e químicas entre estes materiais promovem tensões internas.

Analisando-se os diversos estudos da interface Concreto/PRF, percebe-se a vital importância dessa região para o correto funcionamento do arranjo estrutural. Por isso, a garantia da qualidade da ligação entre concreto e PRF durante a instalação e em serviço é uma área que merece maior ênfase, pois ainda há um conhecimento limitado sobre a mecânica e a durabilidade dessas aplicações. Logo, métodos não destrutivos confiáveis podem garantir segurança estrutural desempenhando papel primordial na garantia da integridade da ligação (BUYUKOZTURK; GUNES; KARACA, 2004). Neste trabalho, será dada ênfase ao ensaio não destrutivo de termografia infravermelha.

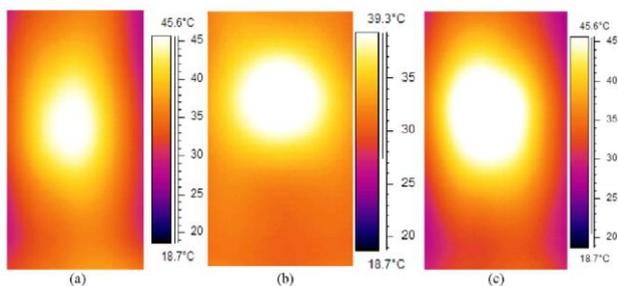
### **4.3 Termografia Infravermelha na Detecção de Danos na Aderência**

Em estruturas mistas de concreto e PRF ou ainda em estruturas de concreto reforçadas externamente com PRF o problema de aderência entre estes dois materiais já é bastante conhecido e estudado pelos pesquisadores. Diversos estudos apontam a termografia infravermelha como uma ótima opção para a detecção de tais danos principalmente por ser uma técnica não destrutiva e não haver contato com a estrutura.

Nokes e Hawkins (2001) utilizaram a termografia infravermelha passiva em campo para avaliar a qualidade da aderência do reforço com PRFC em tabuleiro de ponte de concreto localizada no município rural de Coshocton, Ohio. Uma das preocupações para a obtenção de resultados confiáveis foi a configuração de aquecimento da estrutura. Por isso, foram feitos testes em laboratório para ser encontrado um posicionamento ideal das lâmpadas, de modo que fornecessem a temperatura mais uniforme possível. Foram avaliadas três configurações diferentes: uma única lâmpada, duas lâmpadas ao longo de um único eixo, e três lâmpadas escalonadas, sendo esta última a que apresentou melhores resultados. Na inspeção foram utilizadas 5 lâmpadas de quartzo-halogênio, de 300W cada, escalonadas, colocadas sobre rodas elétricas que se movimentavam a uma velocidade constante entre 2 e 5

cm por segundo. A velocidade de movimentação está relacionada ao controle de temperatura na superfície do compósito, que deve permitir adequada penetração do calor, porém sem danificá-lo. Foram realizadas três inspeções uma no ano de 1998 outra em 1999 e a última em 2000. Este monitoramento demonstrou que, apesar de haver faltas de aderência em alguns pontos entre concreto e PRF, não houve aumento do descolamento. Os resultados foram confirmados por outros testes, tais como o “tap test” e ultrassom.

No trabalho de Halabe; Dutta e Gangarao (2008) a falta de aderência entre concreto e PRF foi simulada por preenchimentos de ar e água, de três diferentes tamanhos e mesma espessura, em corpos de prova cilíndricos de concreto, alguns envoltos por PRFV e outros por PRFC. Para simular os descolamentos preenchidos por ar, foram utilizadas folhas rígidas de plástico côncavas e, no caso de descolamento preenchido por água, pequenas bolsas de polietileno cheias de água inseridas entre o concreto e o PRF.



**Figura 4.6 – (a) 1,4”x1,4” defeito de ar (b) 2”x2” defeito de ar, (c) 3”x3” defeito de ar (HALABE; DUTTA; GANGARAO, 2008).**

Os corpos de prova foram aquecidos por torres de radiação infravermelha durante 70 segundos. Durante o processo de aquecimento e um pouco após cessá-lo as imagens infravermelhas foram capturadas. A detecção dos danos simulados nas imagens infravermelhas foi evidente, comprovando o sucesso da técnica, como pode ser observado nas figuras 4.6 (a), (b) e (c), para a manta de PRFC e defeitos de ar.

Na mesma linha segue o trabalho de Zi et al. (2008), porém buscando estudar as condições ótimas para a detecção de vazios e delaminações entre concreto e folhas de PRFV e PRFC. As amostras foram aquecidas por três diferentes fontes de calor incluindo: luz do sol, lâmpada infravermelha e lâmpada de halogênio, antes de ser aplicada a

termografia infravermelha para detecção dos defeitos. Os autores concluíram que apenas os aquecimentos executados por lâmpada infravermelha e lâmpada halógena foram eficazes para detecção de delaminações. Além disso, os corpos de prova colados com PRFC apresentaram maior clareza na visualização do dano da imagem termográfica.

Dumoulin et al. (2010) testam a qualidade de aderência entre PRFC e concreto utilizando a termografia infravermelha em ensaios experimentais e simulações numéricas 3D. Nos ensaios experimentais, diferentes tipos de defeitos foram inseridos entre o PRFC e o concreto em uma mesma profundidade. Tais defeitos possuíam diferentes formas e capacidade de aquecimento já que eram confeccionados de diferentes materiais (madeira, aço, teflon, cortiça), conforme mostra a Figura 4.7. As amostras foram submetidas a diferentes tipos de excitação térmica: estimulação de calor por pulso e aquecimento por área. Na simulação numérica foi utilizado o método dos elementos finitos em 3D. Os resultados finais confirmam que a simulação numérica apresenta a mesma tendência dos resultados experimentais, porém apenas para o caso de aquecimento por área. Utilizando os conceitos da termografia infravermelha pulsada foi possível ainda estimar a profundidade dos danos.



**Figura 4.7 – Simulação de diferentes defeitos em bloco de concreto: (a) antes da colagem do PRFC; (b) depois da colagem de PRFC (DUMOULIN et al., 2010).**

A aderência PRF/concreto pode ser prejudicada, não apenas por falha de colagem, mas também por delaminação. Sendo assim a termografia infravermelha pode auxiliar também a identificar este tipo de defeito. Nesta linha segue o estudo de Vaghefi et al. (2011), no qual discutiu-se a viabilidade do uso de imagens termográficas realizando uma inspeção em ponte de concreto e experiências de laboratório, com o

objetivo de calcular a percentagem de delaminações sobre uma laje de concreto, já que a percentagem de delaminação e deficiência de cada elemento pode ajudar no processo de tomada de decisão para reparação e manutenção, além de fornecer aos inspetores uma melhor compreensão dos elementos individuais e estado geral de uma ponte.

Pode-se citar também o estudo de Halabe; Klinkhachorn e Sazonov (2002) que apresenta os resultados experimentais sobre o uso de termografia infravermelha para avaliação de delaminações subsuperficiais entre concreto e PRF em tabuleiros de pontes e pilares de concreto encamisados por manta de PRF. Amostras exemplares de tabuleiro da ponte foram construídos no laboratório com diferentes tipos de delaminação. As imagens infravermelhas a partir dos espécimes desagregados foram comparadas com amostras não danificadas para estudar o efeito de delaminações subsuperficiais nas imagens infravermelhas. Além disso, testes em campo foram conduzidos utilizando termografia infravermelha em elementos estruturais reforçados por compósitos em três pontes localizadas em *West Virginia*, nos Estados Unidos.

Na tese de Vadesudevan (2004), investiga-se o uso de termografia infravermelha em tabuleiros de pontes de PRF tanto em condições de laboratório e de campo. Além de inserir defeitos artificiais de ar e água simulando defeitos de colagem entre concreto e PRF, foram também analisadas delaminações subsuperficiais simuladas (de diversos tamanhos e espessura) que foram criadas na junção em forma de flange. A técnica de termografia infravermelha foi usada para detectar estes defeitos subsuperficiais incorporados. Ainda como parte da pesquisa, dois testes de campo foram conduzidos. Em um deles, objetivou-se localizar o descolamento do PRF em um tabuleiro da ponte enquanto no outro o inspecionou-se e localizou-se o descolamento do reforço de PRF envolto em madeira. Os resultados mostraram que a termografia infravermelha é uma ferramenta útil para a detecção de defeitos nestes casos.

A partir dos estudos citados, observa-se a preocupação com alguns fatores principais relacionados a avaliação da aderência concreto/PRF por termografia infravermelha:

- Tipo, tempo e modos de excitação térmica;
- Detecção de diferentes defeitos subsuperficiais por falhas de colagem;
- Análise de delaminação.

Por isso, este trabalho foca a análise nestes fatores de maneira mais aprofundada, conforme mostram os experimentos e seus respectivos resultados apresentados na sequência.

O ineditismo desta Tese está relacionado principalmente à criação de um método de cálculo das dimensões de defeitos subsuperficiais baseado em análises experimentais de termografia infravermelha passiva, independentemente de se conhecer as características térmicas do reforço ou do defeito.

## **CAPÍTULO 5 - TIPOS DE EXCITAÇÃO TÉRMICA PARA DETECÇÃO DE FALHAS NA ADERÊNCIA CONCRETO/PRF POR TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA ATIVA**

Apresentam-se neste momento experimentos relacionados à análise termografia infravermelha ativa quando submetida a diferentes fontes de calor. Em específico, são estudados os diferentes padrões de imagens térmicas para detectar os defeitos subsuperficiais entre concreto e PRF quando submetidos a diferentes fontes de calor.

### **5.1 Introdução**

A radiação térmica emitida por uma superfície pode variar de acordo com a natureza e a temperatura da superfície emissora. De acordo com Weil (2004), esta variação depende de três fatores: a configuração de subsuperfície, as condições da superfície, e o ambiente. Os efeitos da configuração de subsuperfície se baseiam no princípio de que o calor flui das áreas mais aquecidas para as mais frias, ou seja, o calor só pode ser movido em diferentes taxas pelos efeitos de isolamento dos materiais através do qual ele está a fluir. Além dos três fatores citados, em se tratando de um ensaio de termografia infravermelha ativa, o tipo de fonte de calor que fará a excitação térmica externa, também possui influência na radiação térmica emitida pela superfície.

A estimulação térmica externa provoca fluxos de calor no interior do material. Logo, adotando como exemplo a detecção de defeitos subsuperficiais na aderência entre concreto e PRF, observa-se que estes fluxos são alterados pela presença de anomalias no interior da peça, ocasionando assim contrastes no mapa térmico da superfície em questão (RODRÍGUES, 2010). Isso ocorre já que vários tipos de materiais de construção têm condutividade térmica ou habilidades isolantes diferentes. Além disso, diferentes tipos de defeitos têm diferentes valores de condutividade térmica.

Alguns autores evidenciam diferenças no resultado da análise por termografia infravermelha ativa quando adotados diferentes tipos de aquecimento para detecção de danos utilizando-se os polímeros reforçados com fibras (PRF).

Na pesquisa de Almeida (2010), foram impressos danos por impacto em amostras de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) cuja análise foi realizada com a utilização da termografia infravermelha, após submetê-las a dois tipos de aquecimento:

convectivo por fluxo de calor controlado e radiação, com emprego de lâmpadas incandescentes. O autor concluiu que o aquecimento convectivo das amostras por fluxo controlado de ar mostrou resultados mais eficazes do que aquele que empregou lâmpadas incandescentes. Além disso, pôde observar que tempos mais longos de aquecimento favoreceram a visualização de danos.

Zi et al. (2008) fizeram simulações experimentais para estudar as condições ótimas de uso da técnica da termografia infravermelha na detecção de defeitos em concreto reforçado com PRF. Consideraram dois tipos de defeitos: vazios localizados poucos centímetros abaixo da superfície e o descolamento entre a superfície de concreto e o laminado de PRF (delaminação) utilizado para reforçar o concreto. Para atingir este objetivo, amostras foram aquecidas por três fontes de calor diferentes: lâmpadas infravermelhas, lâmpadas halógenas e ainda aquecimento solar. Após o aquecimento foi aplicada a termografia infravermelha para a detecção dos defeitos. Concluiu-se que os vazios foram bem identificados em todos os casos e que quando seus diâmetros eram maiores que sua profundidade, estes vazios eram detectados com mais clareza. Além disso, observou-se que a detecção do vazio foi mais fácil, quando foi utilizada no aquecimento da lâmpada infravermelha, em comparação com a lâmpada halógena. No caso da detecção de delaminação simulada tanto a lâmpada infravermelha quanto a lâmpada halógena foram efetivas, com exceção do aquecimento solar.

Sim et al. (2009) também testaram a eficiência de fontes de calor artificiais para a melhoria da identificação de defeitos em concreto. O objetivo foi encontrar uma fonte de calor eficiente para amplificar a temperatura de superfície em análise por termografia infravermelha. Para isto foram adotadas duas fontes de calor: lâmpadas infravermelhas e lâmpadas halógenas. Os defeitos simulados eram: vazio interno no concreto e descolamento do PRF envolvido em concreto. Verificou-se que a lâmpada infravermelha foi mais eficiente do que a lâmpada halógena para atingir este objetivo.

Logo, no caso de haver uma estimulação térmica artificial, observa-se que também o tipo de fonte de calor que incide em um objeto influencia na emissão da radiação térmica da superfície e conseqüentemente na detecção do dano na imagem infravermelha, sendo este, portanto, o principal fator abordado neste capítulo.

Em algumas aplicações, a análise dos termogramas é apenas conduzida de maneira qualitativa por interpretação visual da distribuição de temperatura na superfície da amostra uma vez que identificar e

localizar o dano pode ser suficiente em casos simples de inspeção (TANAKA; TOTTORI; NIHEI, 2006) (CHOI et al., 2014).

Nesta etapa experimental, busca-se uma análise qualitativa por inspeção visual para comparar as imagens infravermelhas de corpos de prova de concreto e aderidas por chapa pultrudada de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), porém submetidos a diferentes tipos de aquecimento, diferentes dimensões do dano e ainda diferentes profundidades em que o dano pode se encontrar.

## **5.2 Materiais e características das amostras**

As amostras foram divididas em dois grupos cujas características estão dispostas na Tabela 5.1.

A aderência, entre o concreto e a chapa pultrudada de PRFV, foi executada, da mesma forma para os dois grupos, com a utilização de adesivo estrutural bi componente à base de resina epóxi. Este produto possui as seguintes características: massa específica 1,7 kg/litro; consumo 1,7 kg/mm<sup>2</sup>/mm; aderência maior que 18,6 MPa; resistência à compressão (a partir de 1 dia) de 60 MPa. Misturando a resina epóxi (A) ao endurecedor amínico (B) a relação (A:B) em peso é de 1:1,18.

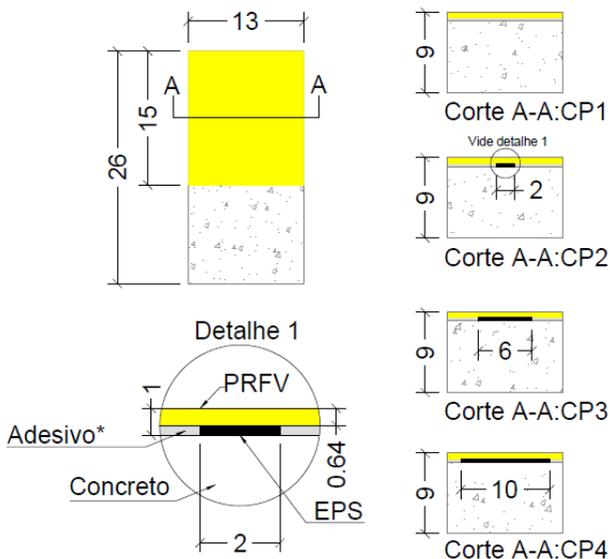
O grupo 1 é formado por quatro corpos de prova, todos de iguais dimensões: 26,0 x 13,0 cm e 9,0 cm de espessura. Estes são de concreto e na metade de cada uma das faces está colada, com adesivo biestrutural, uma chapa pultrudada de PRFV de dimensão 15,0 x 13,0 cm e 0,635 cm de espessura, com sentido multidirecional das fibras. O primeiro grupo é formado pelos corpos de prova já utilizados por Canalli (2010), que testou a aderência entre concreto e PRFV com a utilização do eco-impacto.

**Tabela 5.1 – Características dos grupos de corpos de prova.**

<b>Características</b>	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>
Quantidade de CPs (un.)	4	6
Resistência à compressão (MPa)	30	9,06
Material	Concreto	Argamassa
Traço	1:1,95:2,62:0,51	1:3,26*:0,63
Dimensões em planta (cm)	26 x 13	15 x 13
Espessura (cm)	9	7; 6; 5; 4; 3 e 2
Superfície aquecida	PRFV	Argamassa
Tipo de aquecimento	Lâmpada incandescente (200 W)	Lâmpada incandescente (200 W)
	Estufa	
	Lâmpada mista de mercúrio de alta pressão (250 W)	
	Aquecedor convectivo (termoventilador)	
	Aquecedor halógeno	
	Soprador Térmico	

\* 40% areia natural, 60% areia artificial.

Em um dos blocos do grupo 1, a chapa pultrudada de PRFV foi totalmente aderida ao concreto e nos outros 3 foram inseridos discos de poliestireno expandido (EPS) entre o PRFV e o concreto para simular a ausência de aderência. Estes discos possuem diâmetros de 2 cm, 6 cm e 10 cm e menos de 1 cm de espessura. A Figura 5.1 mostra os detalhes dos corpos de prova do grupo 1.

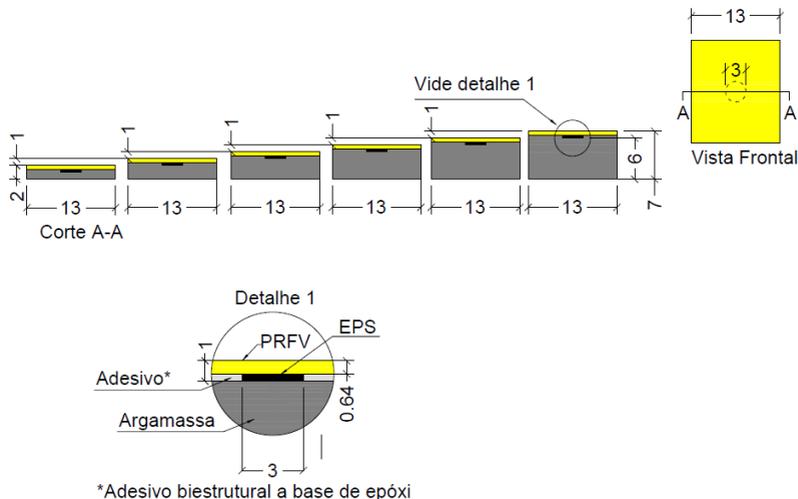


\*Adesivo biestrutural a base de epóxi

**Figura 5.1 – Corpos de prova do grupo 1 (medidas em cm).**

Os corpos de prova do grupo 2 são, no total, seis unidades com dimensão 15,0 x 13,0 cm porém com diferentes espessuras: 7; 6; 5; 4; 3 e 2 cm. Em cada um deles foi inserido um disco de EPS (de menos de 1cm de espessura) de 3 cm de diâmetro na interface concreto-PRFV. Nas Figuras 5.2 e 5.3 observa-se o esquema dos corpos de prova no qual percebe-se que o conjunto EPS/PRFV somam uma espessura efetiva de 1 cm.

Os corpos de prova do grupo 1 foram utilizados para avaliar a capacidade e precisão da câmera infravermelha em captar imagens da falta de aderência para diferentes tipos de aquecimento, enquanto os corpos de prova do grupo 2 testaram a capacidade de alcance quanto à profundidade do defeito simulado.



\*Adesivo biestrutural a base de epóxi

**Figura 5.2 – Corpos de prova do grupo 2 (medidas em cm).**



**Figura 5.3: Imagem dos corpos de prova do grupo 2 com a face de PRFV virada para baixo.**

### 5.3 Aquecimento das amostras

As amostras foram submetidas a aquecimento artificial prévio antes de serem captadas as imagens infravermelhas e os tipos de aquecimento utilizados para o grupo 1 foram: 1 lâmpada incandescente de 200 Watts, estufa, 1 lâmpada de mercúrio de alta pressão de 250 Watts, termoventilador (1500 Watts), aquecedor halógeno (1200 Watts) e soprador térmico (1500 Watts).

Na estufa a 32°C, foi definido a princípio um período de 24 horas de permanência dos corpos de prova e observou-se que com este período a temperatura superficial estava uniforme, portanto adotou-se este tempo de aquecimento para esta situação.

No caso de aquecimento por lâmpada incandescente, lâmpada de mercúrio de alta pressão, aquecedor halógeno e também para o termoventilador, o aquecimento ocorreu durante 5 minutos com o

posicionamento perpendicular dos equipamentos em relação à face frontal do corpo de prova no ponto onde havia o dano, distanciados de 12 cm. Salienta-se que o termoventilador não ficou perpendicularmente centralizado ao ponto do dano simulado, pois, de acordo com os testes, percebeu-se que a concentração de calor não ocorre na parte central do aparelho.

Em relação ao aquecimento por soprador térmico, a saída de ar quente ficou posicionada bem rente à superfície aquecida, sem, contudo, tocá-la e então manualmente o soprador térmico foi movimentado em linhas, revezando o sentido direta-esquerda e também de baixo para cima, por todo o corpo de prova. Esse aquecimento durou 5 minutos.

Para o grupo 2, o aquecimento foi realizado apenas com a lâmpada incandescente de 200 Watts por ter apresentado uma boa eficácia nos resultados com os corpos de prova do grupo 1, por ser de mais fácil manuseio e também por se adequar melhor ao aquecimento da área de corpos de prova menores.

Em todos os casos, após o aquecimento esperou-se o tempo de 1 minuto de resfriamento, pois dessa forma era possível identificar melhor o dano, segundo os testes realizados.

Para cada novo aquecimento, aguardou-se um período de 24 horas para os corpos de prova atingirem sua condição de equilíbrio térmico com o ambiente e assim serem novamente submetidos ao aquecimento de outra fonte de calor.

As amostras dos dois grupos possuem uma das faces frontais colada com uma chapa pultrudada de PRFV, porém, enquanto os corpos de prova do grupo 1 tiveram a superfície do PRFV aquecida, os corpos de prova do grupo 2 foram aquecidos na face de argamassa.

## **5.4 Instrumentação**

As imagens dos ensaios foram obtidas fazendo uso da câmera infravermelha da marca FLIR, série específica para inspeções em edificações (*Infrared Camera for Building*), tipo B400, conforme mostra a Figura 5.4, disponível no Grupo de Pesquisa em Ensaios não Destrutivos (GPEND) da UFSC. As características técnicas da câmera estão descritas na Tabela 5.2.



**Figura 5.4: Câmera FLIR B400, utilizada nesta etapa experimental.**

Na câmera é devem ser inseridos alguns ajustes para melhor captação das imagens, como por exemplo a distância da lente ao objeto, a temperatura e umidade relativa do ambiente, além da emissividade da superfície do material. Portanto, a temperatura ambiente e a umidade relativa foram ajustadas de acordo com a temperatura e umidade no dia e na hora do início do ensaio, utilizando-se um relógio termo-higrômetro e a lente da câmera estava distante 1 m da superfície do material.

**Tabela 5.2 – Características da câmera infravermelha FLIR B400.**

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Resolução espacial	320 x 240 pixel
FOV	25° x 19°
IFOV	1,36 mrad
Sensibilidade Térmica	50 mK (0,05°C)
Taxa de repetição de quadros ( <i>Frame Rate</i> )	30 Hz
Faixa de temperatura do objeto sob inspeção	-20°C a 120°C

Para a medição da emissividade, foram adotados procedimentos semelhantes aos sugeridos pelo Manual do Utilizador FLIR (2010), ou seja, o manual da câmera. Primeiramente, foi colada ao PRFV uma fita isolante de emissividade elevada conhecida ( $\epsilon = 0,97$ ) e esperou-se o período de aproximadamente 1 hora para que a fita e a superfície da amostra entrassem em equilíbrio térmico. Então, ajustou-se a emissividade da câmera de acordo com a emissividade da fita isolante. Tomou-se a temperatura da fita isolante definindo a função de medição de um ponto. Depois de anotada esta temperatura, deslocou-se o mesmo ponto para a superfície da amostra (PRFV) 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 ( $\varepsilon = 0,96$ ).

Alguns cuidados foram requeridos para este procedimento:

- O ambiente não estava sujeito à convecção forçada;
- Procurou-se uma área termicamente estável, para não gerar pontos de reflexão;
- Foi utilizada fita isolante de acordo com as especificações da ASTM E1933-99a (2010) – *Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers* – não transparente e com elevada emissividade.

Salienta-se que este procedimento para medição da emissividade foi executado para todos os experimentos deste trabalho.

## **5.5 Resultados e Análises**

### ***5.5.1 Amostras do grupo 1 com aquecimento por lâmpada incandescente***

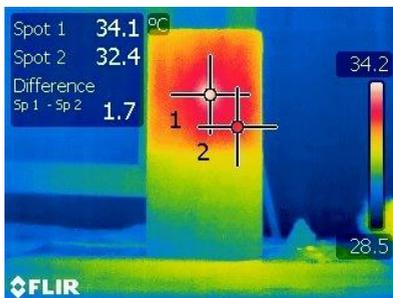
As imagens infravermelhas captadas para o grupo 1, empregando aquecimento com lâmpada incandescente (Figuras de 5.5 a 5.8), mostram com clareza a localização e o formato do dano.

Um ponto importante a ser destacado é que a diferença de temperatura entre o local do dano e outro mais distante, aumenta quanto maior for sua extensão.

Pela observação das imagens do primeiro grupo dos corpos de prova, aquecidos por lâmpada, percebe-se que as temperaturas mais altas estão exatamente nos pontos onde foi simulada a falta de aderência. Isto ocorre, pois, o EPS, por ter condutividade térmica mais baixa quando comparado ao PRFV, funciona como um empecilho para troca de calor que está sendo aplicado pela lâmpada, no sentido PRFV/concreto. Logo, a superfície imediatamente acima da região da simulação de descolamento (EPS) ganha calor com mais facilidade do que a superfície que apresenta boa aderência.



**Figura 5.5 – CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por lâmpada incandescente.**



**Figura 5.6 – CP2, grupo 1, EPS D=2 cm, aquecido por lâmpada incandescente.**



**Figura 5.7 – CP3, grupo 1, EPS D=6 cm, aquecido por lâmpada incandescente.**



**Figura 5.8 – CP4, grupo 1, EPS D=10 cm, aquecido por lâmpada incandescente.**

### **5.5.2 Amostras do grupo 1 com aquecimento por estufa**

Utilizando o aquecimento em estufa, observou-se certa dificuldade de observação dos danos com a função comum infravermelha normal da câmera. Então, foi necessário utilizar uma de suas funções especiais, chamada “fusão”. No momento da retirada dos corpos de prova da estufa, foram captadas duas imagens para o mesmo corpo de prova: a primeira (imagem à esquerda) mostra em imagem infravermelha apenas as temperaturas mais altas em relação àquela marcada na escala à direita da imagem, já a segunda imagem (à direita) captada apresenta as temperaturas mais baixas, conforme mostram as Figuras de 5.9 a 5.16.

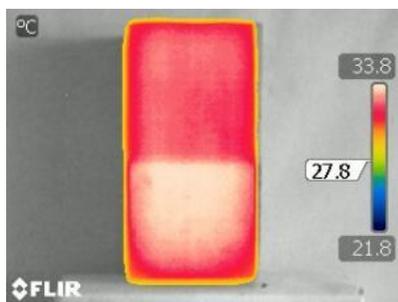


Figura 5.9 – CP1, grupo1, aderência completa, estufa, temp. mais altas.

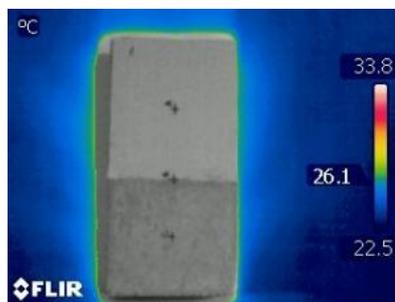


Figura 5.10: –CP1, grupo1, aderência completa, estufa, temp. mais baixas.

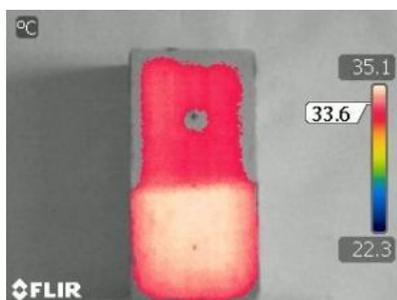


Figura 5.11 – CP2, grupo1, EPS D = 2 cm, estufa, temp. mais altas.

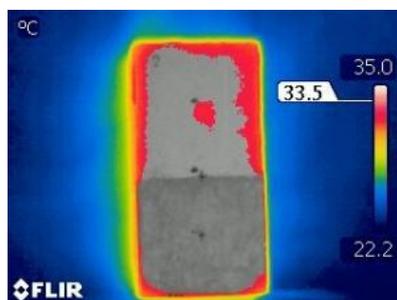


Figura 5.12 – CP2, grupo1, EPS D = 2 cm, estufa, temp. mais baixas.

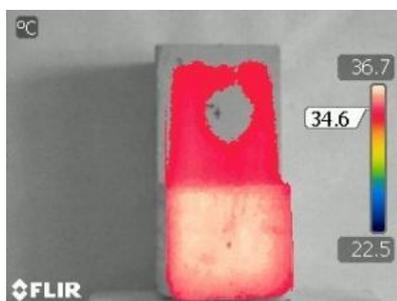


Figura 5.13 – CP3, grupo1, EPS D = 6 cm, estufa, temp. mais altas.

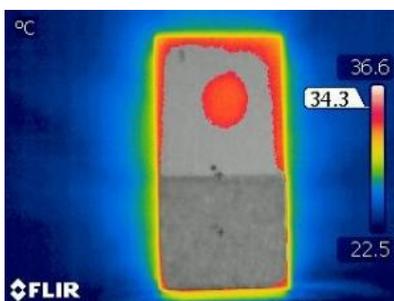
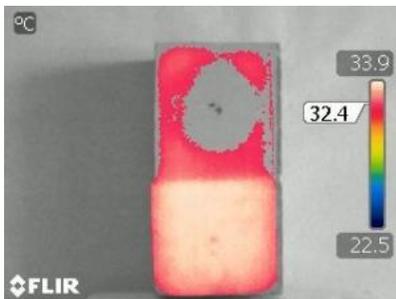
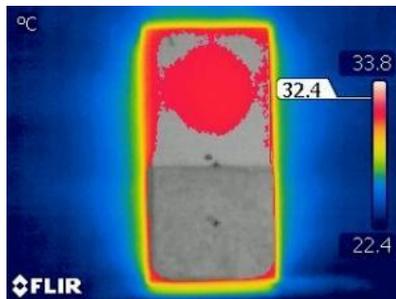


Figura 5.14 – CP3, grupo1, EPS D = 6 cm, estufa, temp. mais baixas.



**Figura 5.15 – CP4, grupo1, EPS D = 10 cm, estufa, em fusão, temperaturas mais altas.**



**Figura 5.16 – CP4, grupo1, EPS D = 10 cm, estufa, em fusão, temperaturas mais baixas.**

Nota-se que é possível visualizar o dano, porém estes se apresentam nas imagens nos pontos de temperaturas mais baixas. Isto ocorre porque, após o início da troca de calor do corpo de prova com o ambiente, percebe-se que o ponto onde há a simulação de falta de aderência, se resfria mais rápido que o restante do bloco pois há perda de calor para o ambiente (ao contrário do que ocorre quando utilizado o aquecimento com a lâmpada incandescente). Como o fluxo de calor está no sentido concreto/PRFV, o EPS impede a passagem do calor do concreto para o PRFV, facilitando assim o resfriamento da superfície de PRFV. Observou-se que neste caso, o contorno não é tão nítido quanto o observado nas imagens em que os danos aparecem como pontos quentes e isto talvez pudesse ser um pouco melhorado se fosse aumentada a temperatura da estufa. Entretanto, deve-se notar que, comparando o aquecimento em estufa com o aquecimento por lâmpada infravermelha, a graduação de variação de temperatura nas imagens não varia entre esses aquecimentos. Isso significa que os corpos de prova atingiram praticamente a mesma temperatura, o que permite concluir que para uma melhor visualização do defeito é mais favorável que o aquecimento seja realizado por fluxo de calor no sentido PRFV/concreto.

### **5.5.3 Amostras do grupo 1 com aquecimento por termoventilador**

A próxima situação avaliada foi o aquecimento das amostras do grupo 1 por termoventilador, observadas nas Figuras de 5.17 a 5.20.

Este equipamento mostrou grande potencial em aquecer as amostras, o que faz com que o dano possa ser visualizado com clareza. Contudo, o aquecimento se deu de forma desigual, o que pode induzir a

erros na interpretação da imagem. Por exemplo, poder-se-ia inferir que há um dano na parte inferior esquerda do CP1 (Figura 5.17). Nas demais imagens o canto superior esquerdo também mostra pontos de maior aquecimento, o que, talvez, poderia ser considerado como um dano menor, porém sabe-se que isso não representa a realidade. Entretanto, pode-se afirmar que quanto maior o dano, posicionando-se essa fonte da maneira correta na área analisada, melhor o resultado, já que nas Figuras 5.19 e 5.20 o contorno do disco de EPS aparece melhor delineado e o acúmulo de aquecimento do lado esquerdo superior é menos visível.

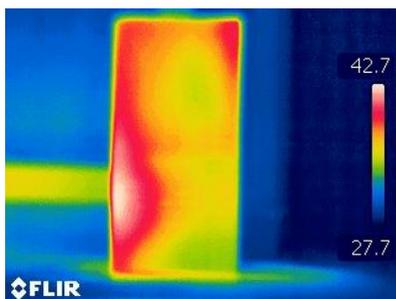


Figura 5.17 – CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por termoventilador.

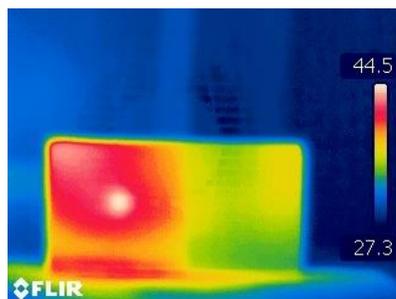


Figura 5.18 – CP2, grupo 1, EPS D = 2 cm, aquecido por termoventilador.

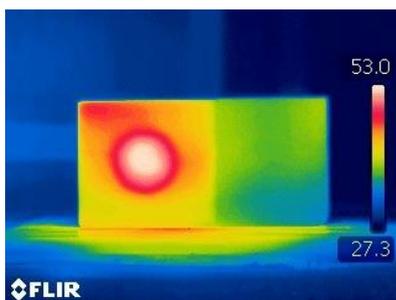


Figura 5.19– CP3, grupo 1, EPS D = 6 cm, aquecido por termoventilador.

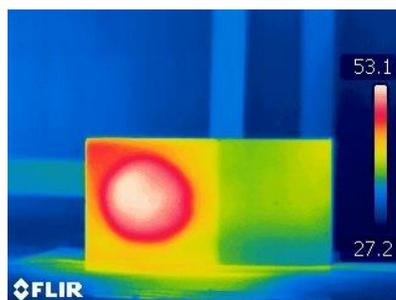
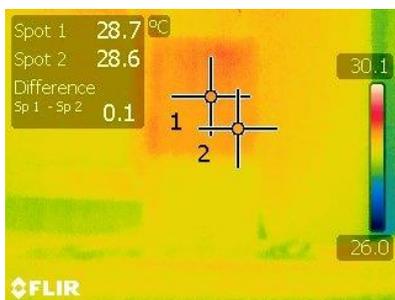


Figura 5.20 – CP4, grupo 1, EPS D=10 cm, aquecido por termoventilador.

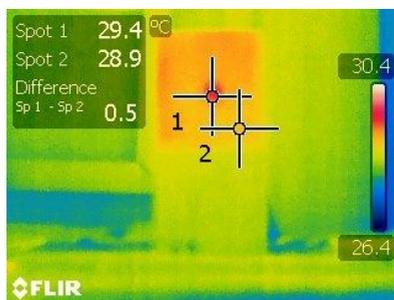
#### 5.5.4 Amostras do grupo 1 com aquecimento por lâmpada mista de mercúrio

Os testes para o aquecimento por lâmpada mista de mercúrio de alta pressão, são apresentados nas Figuras de 5.21 a 5.24.

Neste caso, a diferença de temperatura entre o ponto onde há o dano e o ponto externo a ele é pequena, e aumenta muito pouco conforme aumenta a dimensão do dano na amostra. Além disso, como sua emissão de calor não é muito alta, a imagem do dano perde um pouco de nitidez se comparada às imagens obtidas para as outras fontes de calor estudadas.



**Figura 5.21 – CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por lâmpada mista.**



**Figura 5.22 – CP2, grupo 1, EPS D = 2 cm, aquecido por lâmpada mista.**



**Figura 5.23 – CP3, grupo 1, EPS D = 6 cm, aquecido por lâmpada mista.**

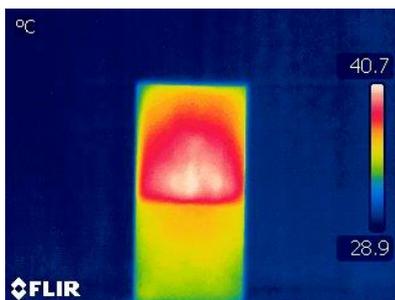


**Figura 5.24 – CP4, grupo 1, EPS D = 10 cm, aquecido por lâmpada mista.**

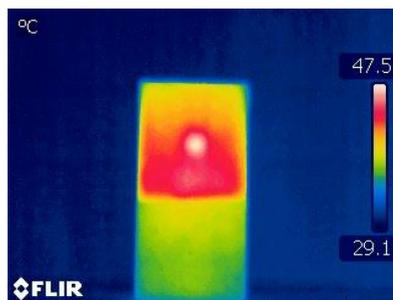
### **5.5.5 Amostras do grupo 1 com aquecimento por aquecedor halógeno**

O aquecimento das amostras por aquecedor halógeno, de acordo com Figuras 5.25 a 5.28, proporcionou a visualização do dano nas imagens infravermelhas muito semelhante àquela referente ao aquecimento com lâmpada incandescente. Entretanto, como estes equipamentos de aquecimento possuem formas diferentes a distribuição de calor variou um pouco como pode ser observado comparando as

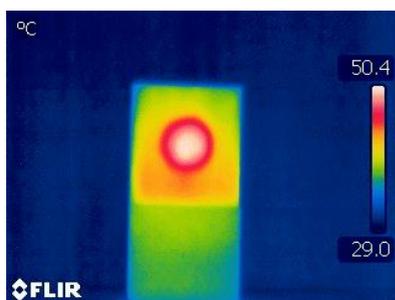
Figuras 5.25 e 5.26 com as Figuras 5.5 e 5.6. Devido a forma dos desses dois tipos de aquecimento, considera-se a lâmpada incandescente um fluxo mais direcionado ao ponto de inspeção, ou seja, em uma pequena área enquanto que o aquecedor halógeno abrange uma área maior.



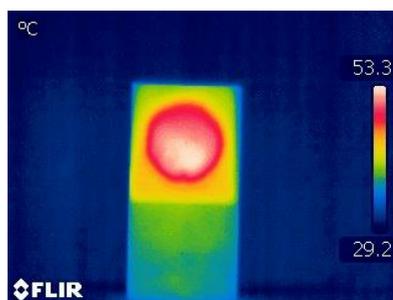
**Figura 5.25 – CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por aquecedor halógeno.**



**Figura 5.26 – CP2, grupo 1, EPS D = 2 cm, aquecido por aquecedor halógeno.**



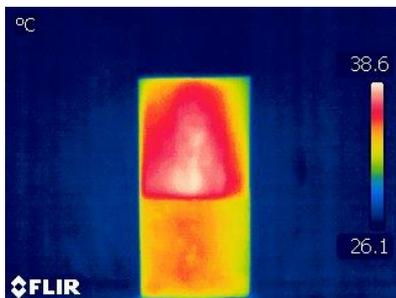
**Figura 5.27 – CP3, grupo 1, EPS D = 6 cm, aquecido por aquecedor halógeno.**



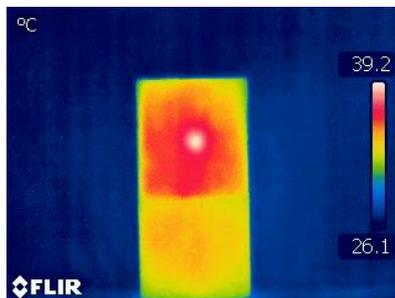
**Figura 5.28 – CP4, grupo 1, EPS D = 10 cm, aquecido por aquecedor halógeno.**

### ***5.5.6 Amostras do grupo 1 com aquecimento por soprador térmico***

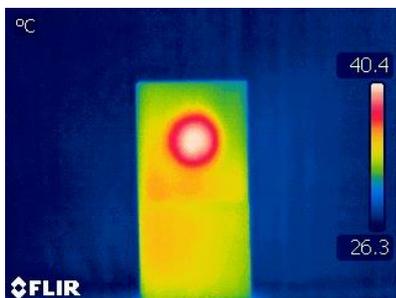
Já o aquecimento por soprador térmico também se caracteriza por ser do tipo localizado, porém neste caso, foi adotado o movimento linear (tipo “zig-zag”) em toda área da amostra a fim de proporcionar um aquecimento mais uniforme. As imagens infravermelhas referentes aos resultados desse tipo de aquecimento podem ser vistas nas Figuras de 5.29 a 5.32.



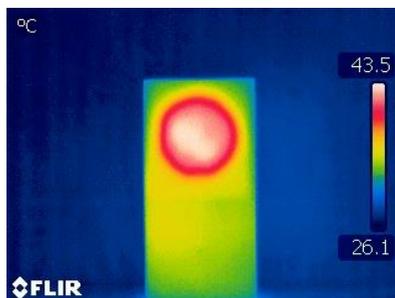
**Figura 5.29 – CP1, grupo 1, aderência completa, aquecido por soprador térmico.**



**Figura 5.30 – CP2, grupo 1, EPS D = 2 cm, aquecido por soprador térmico.**



**Figura 5.31 – CP3, grupo 1, EPS D = 6 cm, aquecido por soprador térmico.**

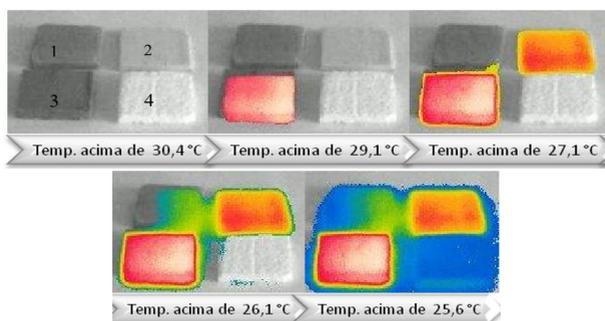


**Figura 5.32 – CP4, grupo 1, EPS D = 10 cm, aquecido por soprador térmico.**

Observa-se que em relação ao aquecimento, o aquecedor halógeno que também tem a proposta de aquecimento por área, mas o aquecimento por soprador térmico, além de ter aquecido menos a amostra, não permitiu visualizar a diferenciação notável entre a área de concreto e PRFV na amostra, como pode ser visto principalmente nas Figuras 5.32 e 5.33.

Analisando-se de maneira geral todos estes tipos de aquecimento para detecção de danos de aderência, a visualização dos pontos quentes (ou frios, no caso de aquecimento por estufa) no local da simulação de falta de aderência possui uma relação direta com as características térmicas dos materiais envolvidos no experimento. Sendo assim, para identificar de forma qualitativa a variação das características térmicas existente entre os materiais foram captadas imagens infravermelhas de pequenas pastilhas produzidas com cada um dos materiais envolvidos nos ensaios (resina epóxi, PRFV, argamassa, EPS) após o aquecimento por lâmpada incandescente durante 5 minutos. De acordo com a Figura

5.33, observa-se que a temperatura dos materiais varia mesmo tendo sido aquecidos de forma igual, o que aponta suas diferentes características térmicas. A resina epóxi mostrou uma maior capacidade de absorver o calor, em segundo lugar está o PRFV, em terceiro lugar a argamassa e por último o EPS. Como era esperado o EPS, sendo um isolante térmico, é o material com mais dificuldade de absorver calor.



**Figura 5.33 – Absorção de calor dos materiais 1) argamassa, 2) PRFV, 3) Resina epóxi, 4) EPS.**

**Tabela 5.3 – Características térmicas dos materiais do ensaio (INCROPERA et al.,2008)**

Material	Calor específico (c)	Condutividade térmica (k)
Argamassa	0,84-1,04 kJ/kgK	0,72-0,75 W/mK
Fibra de vidro*	0,67 kJ/kgK	0,036-0,048 W/mK
Resina epóxi	1,11-2,47 kJ/kgK	0,23 W/mK
EPS	0,38-1,10 kJ/kgK	0,025-0,038 W/mK

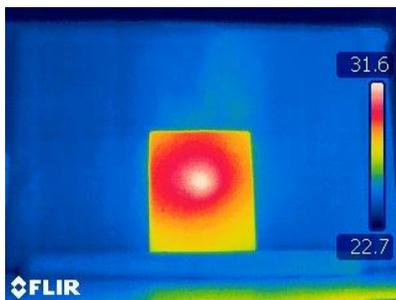
\*Material principal do PRFV

### ***5.5.7 Amostras do grupo 2 com aquecimento por lâmpada incandescente***

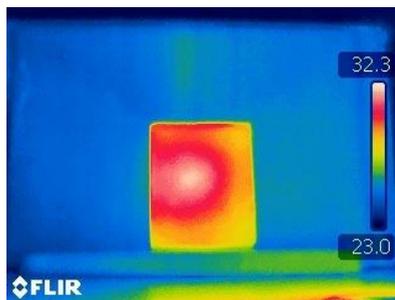
Para o grupo 2, foi utilizado apenas o aquecimento por lâmpada incandescente, por ter fornecido resultados bastante satisfatórios e por ser um tipo de aquecimento mais pontual ao local de inspeção o que é mais adequado para estes corpos de prova menores.

Os resultados para as amostras do grupo 2 estão expostos nas Figuras de 5.34 a 5.39. Observou-se que a partir da espessura efetiva de 4 cm (Figura 5.36) de argamassa (ou 5 cm de espessura total do corpo

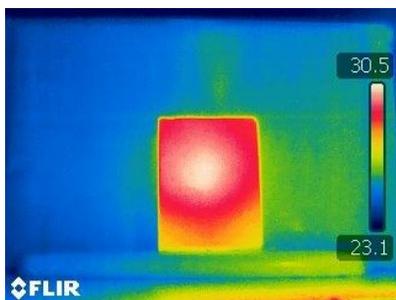
de prova), a imagem revelou-se menos nítida que as anteriores e esta falta de nitidez cresceu com o aumento da camada de argamassa (ou profundidade do dano). Entretanto, cabe ressaltar que este resultado é válido para as condições do experimento: aquecimento com lâmpada incandescente e período de aquecimento. Para um tempo de aquecimento maior, por exemplo, pode-se inferir que a imagem infravermelha mostrasse o dano em uma profundidade ainda maior. Contudo, isso não significa que se pode aumentar o tempo de aquecimento de maneira indiscriminada esperando-se alcançar a profundidade de visualização desejada, pois um aquecimento excessivo pode acarretar, por exemplo, danos ao sistema PRFV, prejudicando a aderência bem como a resistência desse material e, conseqüentemente, enfraquecendo ou anulando sua função estrutural (ROBERT; BENMOKRANE, 2010).



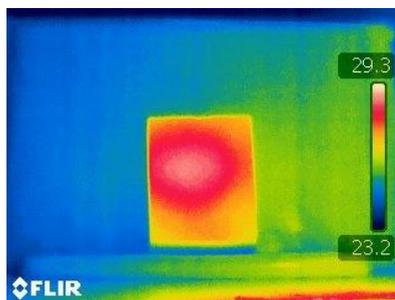
**Figura 5.34 – CP1, grupo 2, espessura 2 cm.**



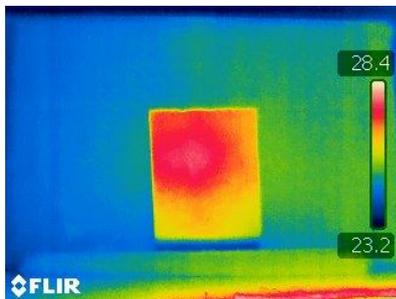
**Figura 5.35 – CP2, grupo 2, espessura 3 cm.**



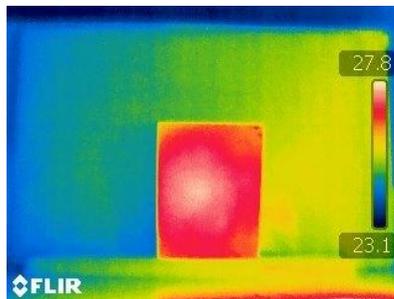
**Figura 5.36 – CP3, grupo 2, espessura 4 cm.**



**Figura 5.37 – CP4, grupo 2, espessura 5 cm.**



**Figura 5.38 – CP5, grupo 2, espessura 6 cm.**



**Figura 5.39 – CP6, grupo 2, espessura 7 cm.**

## 5.6 Análises finais

Neste experimento encontrou-se que a melhor maneira de detectar a falta de aderência entre o PRFV e concreto é utilizando-se da termografia infravermelha ativa no sentido do PRFV/concreto, uma vez que o grupo 1 foi aquele que apresentou imagens termográficas mais claras na identificação do dano. Isso ocorre porque o conjunto resina epóxi/PRFV possui uma condutividade térmica maior do que materiais como concreto ou argamassa (vide Figura 5.33). Sendo assim, a superfície de PRFV ganha calor mais facilmente do que a superfície de concreto e assim, pode ser melhor identificada por termografia infravermelha.

Comparando-se os diferentes tipos de aquecimento, observa-se que a lâmpada incandescente e o aquecedor halógeno são aqueles que melhor identificaram a falta de aderência simulada. Isto ocorre devido ao alto poder de aquecimento por radiação destes equipamentos e ao direcionamento direto da radiação em determinada área. Salienta-se, porém, que o aquecedor halógeno pode proporcionar uma investigação de uma área maior do que a da lâmpada incandescente e é um tipo de aquecimento bastante explorado em algumas pesquisas como citado anteriormente nos estudos de Zi et al. (2008) e Sim et al. (2009).

Deve-se ressaltar que a escolha do tipo de aquecimento, não necessariamente precisa levar em consideração apenas uma maior nitidez visual das imagens. Por exemplo, a lâmpada incandescente, apesar de apresentar imagens infravermelhas mais nítidas quando utilizada como fonte calor, comparada a lâmpada mista de mercúrio, possui a desvantagem de consumir muita energia e ter uma menor durabilidade. A escolha pode depender, por exemplo de como e onde o

ensaio será realizado. Em ambientes com temperaturas mais controladas, ou seja, para temperaturas mais constantes, sem vento, sem interferências de outras fontes de calor (como em túneis, por exemplo), a lâmpada mista de mercúrio pode ser uma opção de aquecimento viável, pois apesar de menos nítidas a identificação do dano ainda é notável.

Nota-se que o aquecimento por termoventilador não forneceu resultados precisos, provavelmente, devido a como as amostras foram aquecidas neste experimento já que, como anteriormente citado, Almeida (2010) obteve o melhor resultado para aquecimento convectivo com fluxo controlado. Sendo assim, espera-se que com um aquecimento de fluxo controlado não haja induções de erro de falsos locais de falta de aderência.

O soprador térmico, proporcionou bons resultados na visualização do dano, sem, contudo, fornecer uma visualização diferenciada da área de concreto da área de PRFV. Isto pode estar associado a movimentação manual do fluxo de calor do soprador térmico já que enquanto uma linha era aquecida a outra linha perdia calor para o ambiente até ser aquecida novamente e assim esta variação do fluxo de calor pode ter causado esta alteração.

É importante ressaltar que os resultados obtidos por Canalli (2010) para os mesmos corpos de prova do grupo 1 com o eco-impacto mostrou-se satisfatório para diâmetros maiores que 6 cm. Porém, neste experimento, foram obtidos excelentes resultados para todos os diâmetros simulados.

Estudados alguns tipos simples de aquecimento para a termografia infravermelha ativa, escolheu-se o aquecedor halógeno para fazer a análise do contraste térmico para avaliação de delaminações em vigas conforme será demonstrado no capítulo seguinte.

## **CAPÍTULO 6 - TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA ATIVA APLICADA À ANÁLISE DE CONTRASTE TÉRMICO PARA DELAMINAÇÃO ENTRE CONCRETO/PRF**

Neste capítulo, a termografia infravermelha ativa é utilizada para a detecção de delaminações em vigas de concreto armado reforçadas por diferentes tipos de PRF: chapa pultrudada de PRFC, chapa pultrudada de PRFV e laminado de PRFC. A partir das imagens infravermelhas, detectou-se a delaminação e avaliou-se o contraste térmico absoluto e o contraste térmico padrão destas imagens com o objetivo de escolher aquela que seria melhor aproveitada em um estudo quantitativo.

### **6.1 Introdução**

Delaminação é a separação de camadas de concreto que ocorre no interior da cobertura da camada superior da estrutura. Nesta pesquisa, as delaminações referem-se, especificamente, à ruptura (ou destacamento) entre o reforço de PRF e o concreto num plano aproximadamente paralelo à superfície da estrutura.

Como já previamente descrito no item 4.2 do Capítulo 4, em uma estrutura reforçada por PRF pode haver delaminação entre este compósito e o concreto devido, por exemplo, a fissuras na estrutura, o que prejudica seu funcionamento adequado.

Observa-se que, similarmente aos defeitos subsuperficiais entre concreto e PRF, este tipo de delaminação é geralmente invisível ao olho humano, logo, a termografia infravermelha tem-se mostrado um ensaio não destrutivo muito eficiente para análises qualitativas e quantitativas referentes a este tema (VAGHEFI, 2013).

Pesquisas científicas já vem sendo desenvolvidas no sentido de avaliar a delaminação utilizando-se da termografia infravermelha, o que é bastante comum em inspeções em pontes.

Para enfatizar este fato, pode-se citar o relatório da companhia *Donohue & Associates* (1982) que demonstra que este tipo de inspeção não é recente. Este estudo além de identificar delaminação nos tabuleiros de pontes inspecionadas, fornece uma discussão de equipamentos utilizados, procedimentos e méritos da técnica de inspeção infravermelha passiva.

Maser (2009) utiliza a termografia infravermelha passiva e o radar para avaliar 87 tabuleiros de pontes em Wisconsin, nos Estados

Unidos. Foram selecionadas visualmente as áreas mais críticas de delaminação para então serem aplicados os ensaios não destrutivos. Foram considerados os pontos fortes e limitações de cada método. O artigo apresenta a integração dos resultados obtidos com os dois tipos de pesquisas e conclui que a combinação de termografia infravermelha e radar é muito poderosa, pois maximiza as capacidades de cada método, compensando as limitações. Os resultados demonstram um alto grau de precisão na localização de áreas de delaminação.

No relatório de Pollock et al. (2008) apresenta-se a detecção da delaminações em ponte por termografia infravermelha ativa utilizando-se 2 métodos. No primeiro, um aquecedor foi colocado dentro da viga protendida de seção caixão e as imagens infravermelhas foram captadas a partir da superfície externa abaixo da ponte. O autor nota que a execução deste método não é sempre possível, uma vez que requer o acesso ao interior das vigas. No segundo método, as vigas foram aquecidas em sua superfície externa abaixo da ponte, utilizando-se uma plataforma, de uma a três horas antes de serem captadas as imagens. Ambos os métodos mostraram a promessa para a detecção de delaminações em vigas protendidas.

Em inspeções para detecção de delaminações utilizando-se a termografia infravermelha ativa, geralmente, são obtidas diversas imagens térmicas de uma mesma área, já que a melhor visualização do dano na imagem não é obtida necessariamente logo após cessar o aquecimento (CANNAS et al., 2012). Sendo assim, a escolha da melhor imagem termográfica para se proceder a uma avaliação quantitativa ou qualitativa é de extrema importância e para isso, é preciso utilizar-se dos conceitos de contraste térmico.

### **6.1.1 *Contraste térmico***

Quando relacionado com a sua evolução no tempo, o sinal da temperatura na imagem infravermelha é menos afetado pelo ruído e por isso o contraste térmico torna-se um tema de interesse para se efetuar cálculos a partir de experimentos termográficos, tanto para fins qualitativos quanto para fins quantitativos.

Para o cálculo do contraste térmico de um defeito em uma imagem termográfica, considera-se primeiramente uma superfície com uma emissividade  $\varepsilon \sim 1$  a uma temperatura inicial  $T_0$  e o ambiente a uma temperatura  $T_a$ . Supondo-se aquecer essa superfície de modo que a temperatura  $T_{def}$  é observada ao longo de um defeito e a temperatura  $T_s$  é

obtida ao longo de uma área não defeituosa, o sinal de radiação captado pelo termovisor e disponível em um formato de imagem é dado pelas Equações 6.1 e 6.2.

$$I_{img\_def}(T_{def}) = \varepsilon I_{def}(T_{def}) + (1 - \varepsilon)I_a(T_a) \quad (6.1)$$

$$I_{img\_s}(T_s) = \underbrace{\varepsilon I_s(T_s)}_{\text{Contribuição superfície}} + \underbrace{(1 - \varepsilon)I_a(T_a)}_{\text{Reflexões térmicas dos arredores}} \quad (6.2)$$

Antes do aquecimento, ou seja, no tempo  $t = 0$ , a superfície permanece a uma temperatura  $T_0$  e então pode-se substituir este termo nas Equações 6.1 e 6.2, resultando nas Equações 6.3 e 6.4.

$$I_{img\_def}(T_0) = \varepsilon I_{def}(T_0) + (1 - \varepsilon)I_a(T_a) \quad (6.3)$$

$$I_{img\_s}(T_0) = \varepsilon I_s(T_0) + (1 - \varepsilon)I_a(T_a) \quad (6.4)$$

Fazendo as subtrações: (Equação 6.1 – Equação 6.3) e (Equação 6.2 – Equação 6.4) para suprimir as condições adversas dos arredores do ambiente, resulta-se nas Equações 6.5 e 6.6:

$$I_{img\_def}(T_{def}) - I_{img\_def}(T_0) = \varepsilon[I_{def}(T_{def}) - I_{def}(T_0)] \quad (6.5)$$

$$I_{img\_def}(T_s) - I_{img\_s}(T_0) = \varepsilon[I_s(T_s) - I_s(T_0)] \quad (6.6)$$

A partir das Equações 6.5 e 6.6 obtém-se a razão na forma da Equação 6.7:

$$C'' = \frac{I_{def}(T_{def}) - I_{def}(T_0)}{I_s(T_s) - I_s(T_0)} \quad (6.7)$$

Os quatro termos da Equação 6.7 podem ser convertidos em temperaturas e assim obtém-se Equação 6.8:

$$C' = \frac{T_{def} - T_{0,def}}{T_s - T_{0,s}} \quad (6.8)$$

Podem-se adicionar ainda variações espaciais uma vez que o contraste térmico pode mudar para cada pixel  $(i,j)$  na imagem e ainda para a variação de tempo  $t$ , já que o contraste térmico modifica-se durante o experimento.

$$C(i, j, t) = \frac{\Delta T_{def}(i, j, t)}{\Delta T_s(t)} = \frac{T_{def}(i, j, t) - T_{def}(i, j, t=0)}{T_s(t) - T_s(t=0)} \quad (6.9)$$

$T_s(t)$ : temperatura média ao longo de toda a área sem defeitos

A Equação 6.9 fornece o contraste térmico, que é a temperatura diferencial normalizada pela temperatura diferencial ao longo de uma área não defeituosa. Uma unidade de valor será obtida ao longo de uma área sem defeito se os distúrbios de emissividade e reflexões térmicas permanecem constantes durante o experimento.

O objetivo da análise por contraste térmico é avaliar a visibilidade do defeito, além de realçar a qualidade da imagem e ainda realizar análises quantitativas mais precisas. A partir dos conceitos e equações anteriores, outras definições são também utilizadas para o cálculo do contraste térmico, como será descrito a seguir (MALDAGUE, 2001).

- Contraste absoluto:

$$C^a(t) = \Delta T(t) = T_{def}(t) - T_s(t) \quad (6.10)$$

$T_{def}$ : sinal de temperatura ao longo da área suspeita de defeito

$T_s$ : sinal de temperatura ao longo da área não defeituosa (área sã)

$t$ : variação de tempo

Em geral, a região não defeituosa na imagem é identificada pelo operador e então o contraste absoluto  $C^a$  pode ser calculado. A vantagem de se calcular  $C^a$  é uma melhor visualização dos defeitos em relação ao seu segundo plano. Por outro lado,  $C^a$  possui relação linear com a energia absorvida e isto limita a comparação entre os experimentos, como por exemplo para diferentes tipos de defeitos.

- Contraste de execução (*running contrast*):

$$C^r(t) = \frac{C^a(t)}{T_s(t)} = \frac{\Delta T(t)}{T_s(t)} \quad (6.11)$$

Este tipo de cálculo de contraste é menos afetado pelas propriedades óticas da superfície, pois os pontos suspeitos e os não defeituosos estão localizados sobre áreas de mesma emissividade. Esta definição depende menos da energia absorvida.

- Contraste Padrão (*Standard Contrast*)

A definição final de contraste térmico é o contraste padrão  $C^s$  que calcula antes do aquecimento a distribuição de temperatura no tempo  $t_0$  (para suprimir as contribuições adversas do entorno) e a normaliza por meio do comportamento da área não defeituosa, conforme apresenta a Equação 6.12.

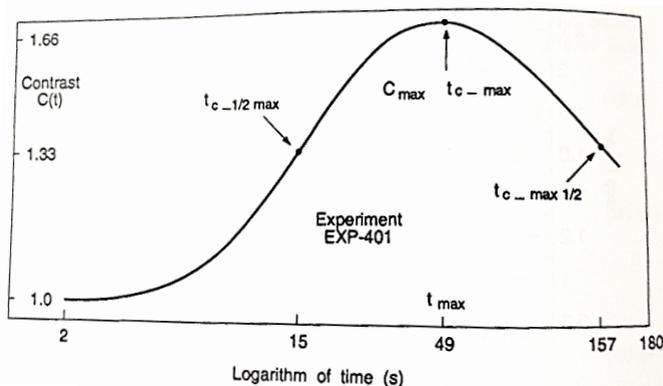
$$C^s(t) = \frac{T_{def}(t) - T_{def}(t_0)}{T_s(t) - T_s(t_0)} \quad (6.12)$$

O contraste absoluto ( $C^a$ ) e o contraste de execução ( $C^r$ ) podem ser calculados para um único termograma independentemente do procedimento de inspeção (ativo ou passivo). Nestes casos, a variável  $t$  não é relevante. O cálculo dos contrastes pode ser realizado como parte do procedimento da termografia infravermelha ativa pulsada tanto para um único termograma quanto para todos os termogramas de uma sequência temporal (variável de tempo  $t$ ).

Obtendo-se os valores de contraste térmico padrão é possível traçar um gráfico de forma a visualizar qual o melhor contraste de acordo com o tempo, conforme mostra a Figura 6.1.

Para elaboração dos gráficos de contraste térmico padrão em relação ao tempo é interessante utilizar a escala logarítmica de tempo por duas razões. Primeiramente, porque esta escala aumenta os intervalos de tempo iniciais. Isto permite avaliar eventos térmicos rápidos que ocorrem mais provavelmente no início da escala de tempo na evolução da curva. Segundo, porque com o passar do tempo o contraste térmico se enfraquece devido a difusão térmica que tende a uniformizar a distribuição de temperatura na superfície e então aumentam-se os ruídos dos dados. Intervalos de tempo mais largos contendo maior número de imagens, possibilitam o aumento da relação sinal-ruído sem, contudo, distorcer a curva de evolução de contraste

térmico, já que para esses grandes intervalos de tempo, os eventos térmicos mudam lentamente.



**Figura 6.1 – Exemplo de curva de evolução do contraste térmico experimental (MALDAGUE, 2001).**

Em relação ao uso do contraste térmico para avaliar imagens térmicas com o objetivo de detectar delaminações, pode-se citar o estudo de Poon et al. (2007). Os autores utilizaram a termografia infravermelha pulsada e o cálculo do contraste térmico a fim de escolher a melhor imagem térmica para estimar quantitativamente os limites e as áreas das delaminações simuladas em concreto reforçado com PRF, fazendo uso de uma sequência de termogramas temporizados e de algoritmos computacionais desenvolvidos.

Giron e Correa (2013) apresentaram um novo procedimento de realce de contraste térmico para imagens infravermelhas, adquiridas a partir de experimentos utilizando-se da termografia infravermelha ativa de lajes reforçadas com PRF. Esta técnica pôde compensar o efeito de vinheta<sup>2</sup>, bem como o aquecimento não uniforme produzido pelo esquema de excitação térmica. A técnica proposta não depende de qualquer modelo de propagação de calor, mas quase exclusivamente de dados experimentais. Os resultados mostram que os aquecimentos não uniformes real e aparente são efetivamente compensados com este método, resultando em melhores imagens de eventuais defeitos internos do que outros métodos clássicos como Contraste Absoluto Diferencial (CAD), e assim aumentando a probabilidade de detecção.

<sup>2</sup> Efeito de vinheta é um termo de fotografia definido pela redução da claridade nas extremidades da imagem.

No presente experimento, é utilizada a termografia infravermelha ativa para detectar delaminações em vigas reforçadas com diferentes tipos de PRF: laminado de carbono, chapa pultrudada de polímero reforçado de carbono e chapa pultrudada de polímero reforçado de vidro. As imagens foram analisadas e suas delaminações foram comparadas de acordo com seus contrastes térmicos para cada tipo de material.

## 6.2 Materiais e características das amostras

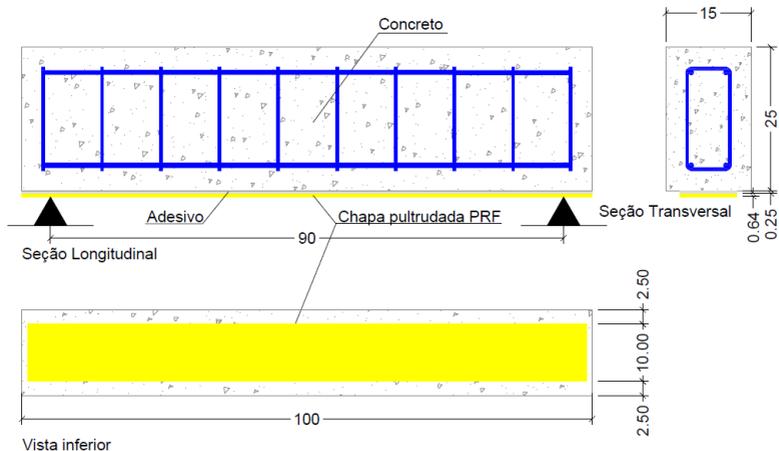
Para esta etapa experimental foram moldadas 8 vigas de concreto armado. Seis vigas foram reforçadas duas a duas com o mesmo tipo de reforço de PRF, são eles: laminado de PRFC, chapa pultrudada de PRFC e chapa pultrudada de PRFV, todos do tipo pré-fabricados. As duas vigas restantes não foram reforçadas. A cada duas vigas de mesmo reforço (e as não reforçadas), uma foi rompida parcialmente (ou seja, sem alcançar a ruptura total) e a outra ficou intacta. Sendo assim, foram definidos os códigos das vigas, de acordo com suas características, conforme descrito na Tabela 6.1.

O laminado de PRFC aderido à viga possui 10 cm de largura, 98 cm de comprimento e 0,12 cm de espessura. As chapas pultrudadas de PRFC e PRFV possuem mesma largura e comprimento, porém uma espessura de 0,64 cm. Outras informações sobre os reforços de PRF encontram-se na Tabela 6.2. Maiores detalhes sobre as vigas e seus reforços podem ser vistos nas Figuras 6.2 e 6.3.

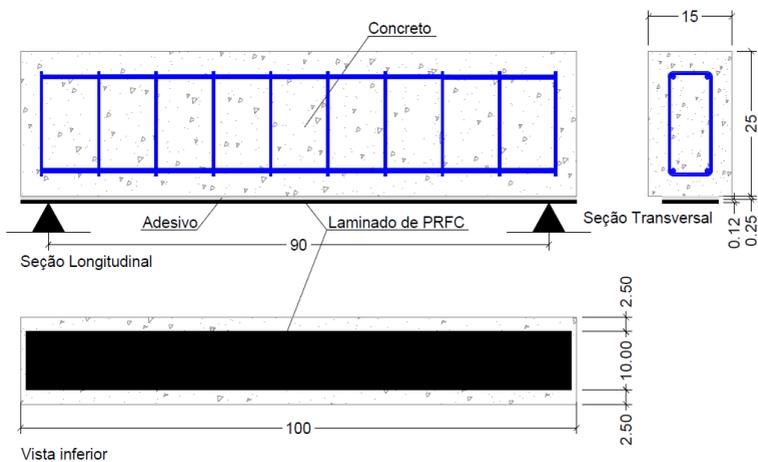
As fibras do laminado de carbono foram direcionadas longitudinalmente ao longo da viga.

**Tabela 6.1 – Código das vigas.**

<b>Tipo de reforço</b>	<b>Estado físico</b>	<b>Código da viga</b>
Laminado PRFC	Intacta	LCI
	Parcialmente rompida	LCR
Pultrudado de PRFC	Intacta	PCI
	Parcialmente rompida	PCR
Pultrudado de PRFV	Intacta	PVI
	Parcialmente rompida	PVR
Sem reforço	Intacta	SRI
	Parcialmente rompida	SRR



**Figura 6.2: Esquema de viga reforçada por chapa pultrudada de PRFC ou PRFV.**



**Figura 6.3 – Esquema de viga reforçada por laminado de PRFC.**

**Tabela 6.2 – Características dos reforços de PRF, segundo o catálogo dos fabricantes.**

<b>Característica</b>	<b>Laminado PRFC</b>	<b>Pultrudado PRFC</b>	<b>Pultrudado PRFV</b>
Quant.vigas reforçadas	2	2	2
Fabricante	<i>S&amp;P Clever Reinforcement</i>	<i>Stratus Compósitos</i>	<i>Stratus Compósitos</i>
Tipo	S&P Laminates CFK 150/2000	-	-
Espessura	1,2 mm	6,4 mm	6,4 mm
Direção das fibras	Unidirecional	Multidirecional	Multidirecional
Resistência a tração	60.000 N/mm <sup>2</sup>	206 N/mm <sup>2</sup>	381 kgf/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade	168.000 N/mm <sup>2</sup>	17.600 N/mm <sup>2</sup>	52.800 N/mm <sup>2</sup>

A colagem dos reforços foi executada com material fornecido pelo fabricante *S&P Clever Reinforcement* e conforme seu manual, sendo o mesmo tipo de adesivo tanto para o laminado quanto para os pultrudados. Para se proceder à colagem, primeiramente, com um pincel, foi aplicado na viga um imprimador primário epoxídico (líquido viscoso com mistura na composição 2:1 - Componente A:Componente B) que tem como objetivo penetrar nos poros do concreto, colmatando-os para que seja estabelecida uma ponte de aderência eficiente, sobre a qual será instalado o sistema. Depois disso, aplicou-se a massa regularizadora de superfície (pasta sólida com mistura na composição 2:1 - Componente A:Componente B) que é utilizada para a calafetação e/ou regularização das superfícies garantindo o estabelecimento de uma superfície desempenada contínua.

### **6.3 Instrumentação**

Após a confecção das vigas, o rompimento parcial das vigas LCR, PCR, PVR e SRR foi obtido pelo ensaio de flexão a 4 pontos, a uma velocidade constante de 10 kgf/s. Ao final do experimento, as vigas intactas (LCI, PCI, PVI e SRI) foram rompidas, apenas para comparação de cargas. Salienta-se que as vigas SRR e SRI não foram submetidas a ensaios termográficos e serviram apenas para comparação de cargas de

ruptura parcial e completa. A Tabela 6.3 mostra os valores das cargas para ruptura parcial (vigas LCR, PCR, PVR e SRR) e ruptura completa (vigas LCI, PCI, PVI e SRI) das vigas reforçadas, entre outras informações.

Como as vigas LCR, PCR e PVR foram reforçadas à flexão, o rompimento se dá por cisalhamento, porém estas não foram levadas a ruptura completa. O critério para que se cessasse o carregamento se deu por meio da medição das fissuras de cisalhamento, utilizando-se uma régua fissurômetro. Logo, quando a maior fissura no concreto atingia a abertura de 1,2 mm durante o carregamento, procedia-se ao descarregamento à velocidade constante e assim a delaminação ocorreu nas duas extremidades das vigas, desde o início da extremidade até antes de 1/3 de seu comprimento total.

**Tabela 6.3 – Informações de cargas de ruptura das vigas.**

<b>Viga</b>	<b>Carga ruptura parcial</b>	<b>Carga ruptura completa</b>	<b><math>f_{ck}</math> concreto</b>
Laminado Carbono	13.700 kgf	15.100 kgf	29 MPa
Pultrudado Carbono	13.380 kgf	14.800 kgf	29 MPa
Pultrudado Vidro	10.145 kgf	11.450 kgf	29 MPa
Sem reforço	9.025 kgf	10.500kgf	29 MPa

O aquecimento foi realizado para todas as vigas, mas apenas na área localizada a 1/3 das duas extremidades de cada uma delas, utilizando-se para isso o aquecedor halógeno (1200 W), já empregado no experimento anterior. Este tipo de aquecimento foi escolhido devido aos resultados satisfatórios obtidos nos experimentos descritos no capítulo 5.

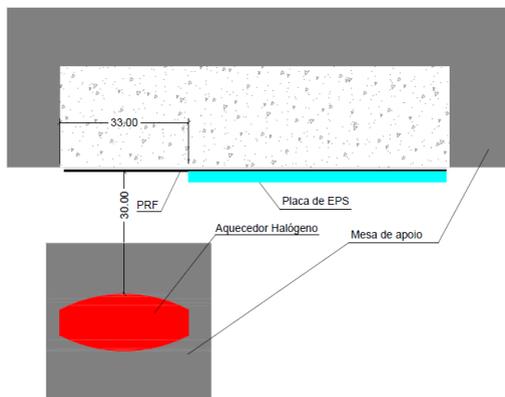
Todas as vigas foram pintadas na superfície reforçada com tinta spray preta de alta temperatura, de acabamento fosco a fim de evitar reflexões dos reforços de PRF, o que interfere na avaliação das imagens infravermelhas.

O aquecedor halógeno foi posicionado a 30 cm de distância e centralizado na área de 33 cm de comprimento da viga, sendo o restante da área da viga isolada com uma placa de EPS. As Figuras 6.4 e 6.5 demonstram com mais detalhes o posicionamento do aquecedor halógeno para o aquecimento.

Foram testados os seguintes tempos de aquecimento: 1 minuto e 30 segundos, 3 minutos, 5 minutos e 10 minutos. Para cada novo aquecimento, foi necessário esperar que a viga reestabelecesse o equilíbrio com o ambiente, o que era verificado por comparação com a

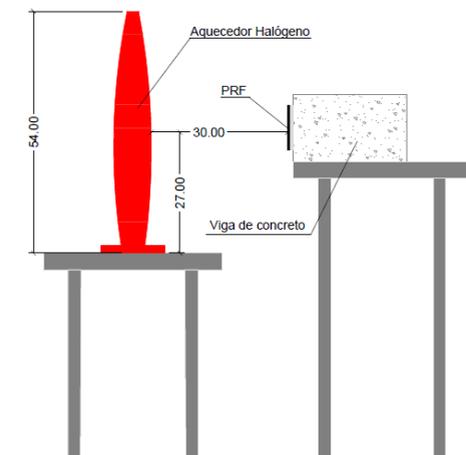
imagem infravermelha da viga antes do aquecimento. Os períodos de tempo foram escolhidos baseados na possibilidade de identificação do dano com o menor tempo possível de aquecimento. Dessa forma, garante-se uma inspeção mais rápida e menos sujeita a variações ambientais no caso de verificações *in loco*.

Vista Superior



**Figura 6.4 – Vista superior do esquema de aquecimento da extremidade esquerda da viga reforçada (medidas em cm)**

Vista Lateral Esquerda



**Figura 6.5: Vista lateral esquerda do esquema de aquecimento da extremidade da viga reforçada (medidas em cm).**

Finalmente, a captação das imagens foi realizada após cessar o aquecimento e durante 10 minutos, registrando-se uma imagem por minuto, a fim de avaliar a queda da temperatura. Entretanto, observou-se que após 6 minutos (360 segundos) a maioria das imagens já não apresentava mais o contorno da delaminação, sendo o tempo adotado nos gráficos apresentados nos resultados.

Após o aquecimento, removeu-se a placa de EPS e o aquecedor halógeno e então a câmera infravermelha foi acionada para captar as imagens. A câmera foi ajustada de acordo com a emissividade e dados ambientais e posicionada em um tripé de forma centralizada aos 33 cm de comprimento iniciais da extremidade da viga (assim como o aquecedor) a 1 metro de distância desta, de forma que a lente ficasse perpendicular à superfície da viga. O aquecimento e a captação das imagens foram executados da mesma forma, tanto para as vigas rompidas quanto para as vigas intactas.

A câmera infravermelha empregada para este procedimento foi a FLIR B400, a mesma utilizada na inspeção anterior (vide características na Figura 5.4 e Tabela 5.2)

Foi utilizado um termo-higrômetro para a medição da temperatura e umidade do ambiente no momento do ensaio, para que os dados fossem inseridos na câmera. A emissividade foi medida conforme descrito no capítulo 5, sendo utilizado o valor de  $\varepsilon = 0,96$  para todos os casos.

## 6.4 Resultados e análises

A partir das imagens infravermelhas, a delaminação nas duas extremidades foi analisada e escolheu-se visualmente aquela considerando-se a maior delaminação. Então, utilizando-se das imagens da extremidade delaminada escolhida, procedeu-se o cálculo do contraste térmico.

Nota-se que neste experimento o aquecimento não se deu de forma uniforme em toda a área inspecionada da viga, o que se atribui, por exemplo ao formato do aquecedor e a como as lâmpadas são distribuídas ao longo deste. Logo, a temperatura escolhida para a área não defeituosa não pode ser tomada em outro ponto da mesma viga. Por isso, foram comparadas as vigas de ruptura parcial (LCR, PCR, PVR) com as vigas intacta (LCI, PCI, PVI, respectivamente). Adotando-se como exemplo a viga reforçada por laminado de carbono, escolheu-se primeiramente o ponto de maior temperatura da área delaminada da viga LCR e então tomou-se o ponto de temperatura que correspondia à

mesma região da viga LCI, adotando-se para isso o programa *FLIR Quick Report*. Por este programa, a escolha de uma área na imagem infravermelha, fornece uma matriz de temperaturas no programa *MSExcels* e assim são extraídas as temperaturas desejadas.

Com estes dados de temperatura para cada aquecimento, foi realizada a avaliação com base no conceito de contraste térmico absoluto (Equação 6.10), porém com algumas diferenças. Adotou-se como  $T_{def}$  o ponto de maior temperatura na área delaminada das vigas LCR, PCR e PVR e como  $T_s$  a temperatura da mesma região correspondente ao ponto de maior temperatura de  $T_{def}$  nas vigas LCI, PCI e PVI, respectivamente. Esse procedimento minimiza o problema do aquecimento não uniforme, pois as áreas inspecionadas das vigas intactas e rompidas foram aquecidas de maneira igual e então, como estas possuem as mesmas características, o ponto de maior delaminação (consequentemente, o ponto de maior temperatura) correspondente na viga intacta possuiria a mesma temperatura da viga delaminada, caso esta estivesse intacta.

Entretanto, deve-se destacar que as vigas foram aquecidas em dias diferentes. Isto significa que a temperatura ambiente no dia do ensaio não era a mesma e assim, duas vigas, apesar de idênticas, não possuíam a mesma temperatura inicial, já que as temperaturas em seu equilíbrio térmico eram diferentes. Sabe-se que se uma viga está com a temperatura inicial maior do que a outra, um mesmo tempo de aquecimento pode fornecer temperaturas finais diferentes. Assim, para o cálculo do contraste térmico absoluto, neste caso, foi levado em consideração a temperatura inicial das vigas,  $T_{def}(t_0)$  e  $T_s(t_0)$ , e o cálculo foi efetuado conforme a Equação 6.13.

$$C^a(t) = [T_{def}(t) - T_{def}(t_0)] - [T_s(t) - T_s(t_0)] = \Delta T_{def} - \Delta T_s \quad (6.13)$$

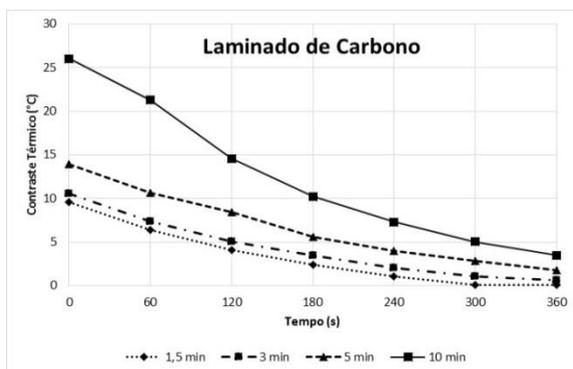
*t*: variação de tempo após cessar o aquecimento

$t_0$ : tempo inicial, antes do aquecimento

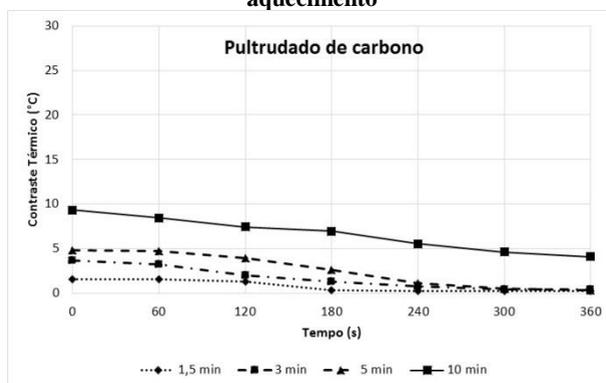
Sendo assim, a Equação 6.13 leva em conta apenas a elevação real da temperatura das vigas rompidas e das vigas intactas.

A seguir, nas Figuras de 6.6 a 6.8, são apresentados os gráficos referentes ao contraste térmico absoluto segundo a Equação 6.13, comparando os diferentes reforços e os diferentes tempos de aquecimento, sendo  $t$  o tempo despendido após cessar o aquecimento nas vigas, indicado em segundos.

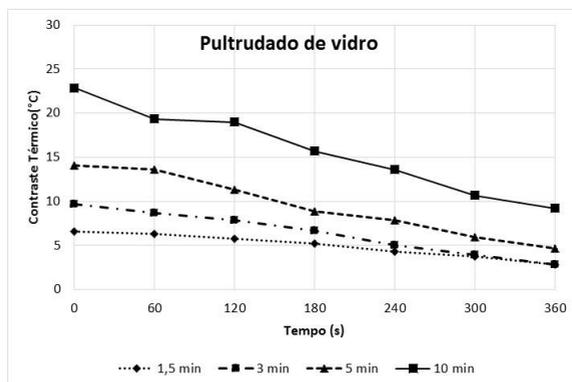
Observa-se em todos os gráficos a queda progressiva do contraste absoluto para todos os casos. Isso significa que a área delaminada apresentou uma elevação de temperatura maior do que a mesma área para uma viga idêntica e intacta e esta elevação de temperatura cai com o passar do tempo a partir de quando cessa o aquecimento na amostra.



**Figura 6.6 – Gráfico do contraste absoluto ao longo do tempo para vigas reforçadas por laminado de carbono submetidas a diferentes tempos de aquecimento**



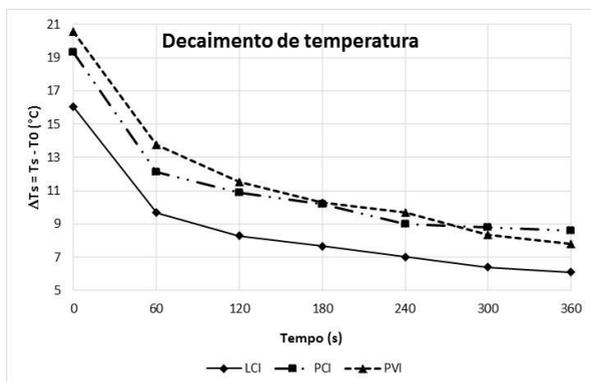
**Figura 6.7 – Gráfico do contraste absoluto ao longo do tempo para vigas reforçadas por pultrudado de carbono comparando diferentes tempos de aquecimento**



**Figura 6.8 – Gráfico do contraste absoluto ao longo do tempo para vigas reforçadas por pultrudado de vidro comparando diferentes tempos de aquecimento**

Outro ponto importante refere-se a comparação do contraste térmico entre os reforços. Observou-se que a viga reforçada com laminado de carbono apresenta uma maior elevação de temperatura nos locais de delaminação, em segundo lugar aparece o reforço de pultrudado de vidro e por último o pultrudado de carbono. É interessante notar que os dois materiais de composição de carbono, apresentam comportamentos distintos em relação ao contraste. Contudo, este comportamento está associado à profundidade e/ou extensão da delaminação.

No gráfico da Figura 6.9 é apresentada a variação da temperatura ( $\Delta T_s$ , vide segunda parcela da Equação 6.13) ao longo do tempo para as vigas reforçadas intactas (que se refere à área não defeituosa) e demonstra que o laminado de carbono possui uma curva apenas um pouco inferior à curva dos materiais pultrudados em se tratando de difusão de calor.

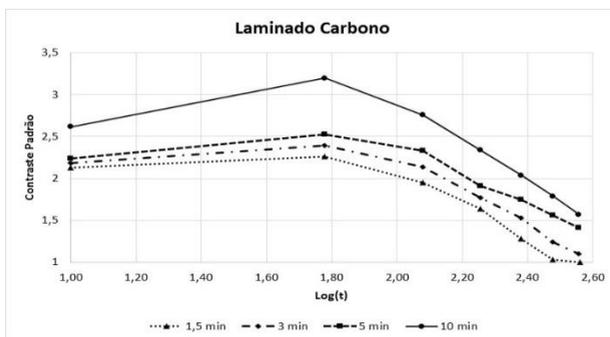


**Figura 6.9 – Gráfico do decaimento de temperatura ao longo do tempo para a vigas intactas (LCI, PCI e PVI).**

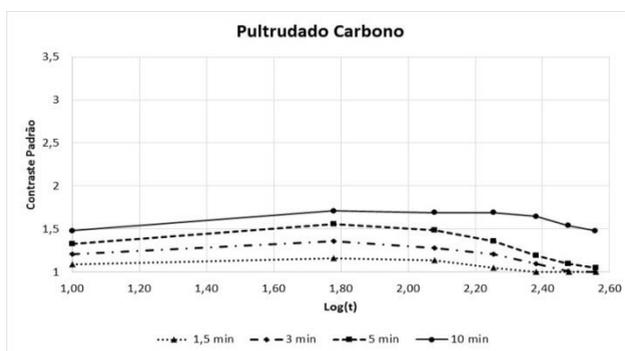
Isso indica que os três tipos de reforços analisados conseguem absorver e dispersar o calor de maneira quase similar e que, portanto, o resultado tão pouco expressivo do contraste térmico para a viga reforçada com pultrudado de carbono não se deve à composição do material, mas sim ao fato de a delaminação para a viga PCR ter sido em menor profundidade e extensão em comparação com as outras vigas, ou seja, o reforço de pultrudado de carbono está menos destacado da viga. Isso pode ter ocorrido já que a delaminação não pôde ser completamente controlada no experimento considerando a ruptura parcial das vigas.

Entretanto, como já apresentado no item 6.1.1, este tipo de contraste desconsidera problemas intrínsecos à captação da imagem térmica. Portanto, a fim de se obter maior confiabilidade, adota-se o cálculo do contraste padrão.

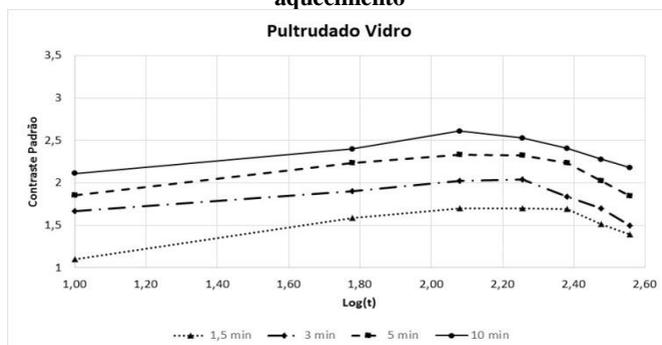
Nas Figuras de 6.10 a 6.12 são apresentados os gráficos de contraste padrão (*standard contrast*) pelo logaritmo do tempo em segundos para cada tipo de reforço e tempo de aquecimento.



**Figura 6.10 – Gráfico do contraste padrão ao longo do tempo para vigas reforçadas com laminado de carbono comparando diferentes tempos de aquecimento.**



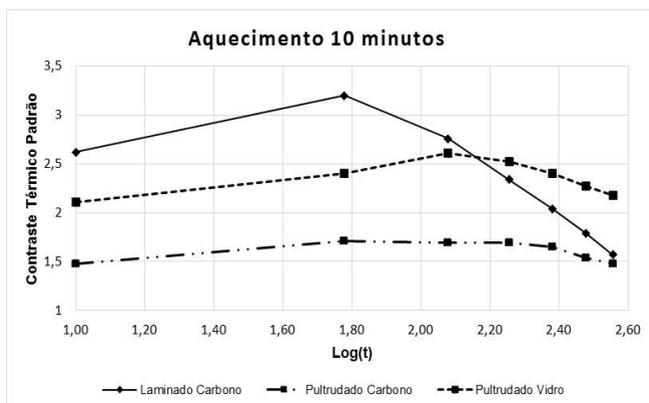
**Figura 6.11 – Gráfico do contraste absoluto ao longo do tempo para vigas reforçadas com laminado de carbono comparando diferentes tempos de aquecimento**



**Figura 6.12 – Gráfico do contraste absoluto ao longo do tempo para vigas reforçadas com laminado de carbono submetidas a diferentes tempos de aquecimento**

Pelos gráficos é possível notar que para todos os casos o maior contraste térmico padrão ocorre para o aquecimento de 10 minutos. Para a viga reforçada com laminado de carbono, o melhor contraste ocorre após o primeiro minuto em que cessa o aquecimento (Figura 6.10) e um comportamento semelhante é observado para reforço pultrudado de carbono (Figura 6.11). Já para o reforço pultrudado de vidro, o contraste térmico maior aparece para o segundo minuto após a retirada do aquecimento (Figura 6.12).

O gráfico da Figura 6.13 compara o contraste padrão para os diferentes tipos de reforços quando é aplicada uma excitação térmica durante 10 minutos e mostra que o laminado de carbono apresenta o maior contraste, porém a queda do contraste ao longo do tempo se dá mais rapidamente para este material do que para os materiais pultrudados.



**Figura 6.13 – Gráfico do contraste padrão ao longo do tempo para aquecimento de 10 minutos comparando os diferentes tipos de reforços.**

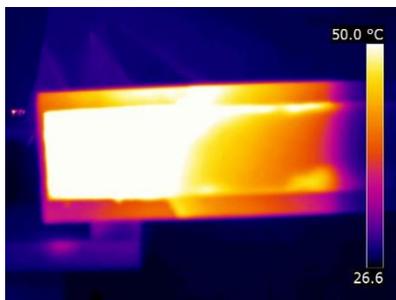
Com base nestas informações, conclui-se que para um estudo mais detalhado dessas delaminações, a partir dos dados obtidos, devem ser analisadas as seguintes imagens:

- Viga LCR: após 10 minutos de aquecimento por aquecedor halógeno, adotar a imagem após o primeiro minuto, cessado o aquecimento.
- Viga PCR: após 10 minutos de aquecimento por aquecedor halógeno, adotar a imagem após o primeiro minuto, cessado o aquecimento.

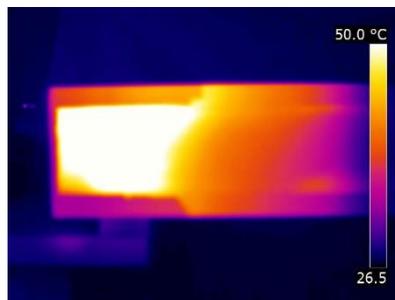
- Viga PVR: após 10 minutos de aquecimento por aquecedor halógeno, adotar a imagem após o segundo minuto, cessado o aquecimento.

Nas Figuras de 6.14 a 6.23, são apresentadas as imagens infravermelhas citadas anteriormente, nomeadas aqui de “imagens ideais”, comparando-as às imagens anteriores e posteriores em relação ao tempo.

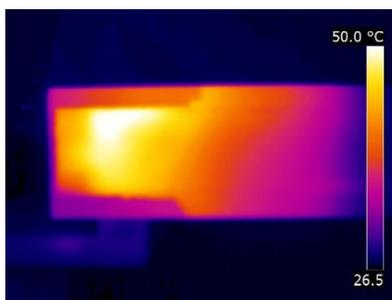
Nota-se que visualmente a diferença entre uma imagem infravermelha anterior e posterior à “imagem ideal” é praticamente nula em alguns casos e por isso o cálculo do contraste térmico é tão importante para a escolha correta da imagem, especialmente em análises quantitativas.



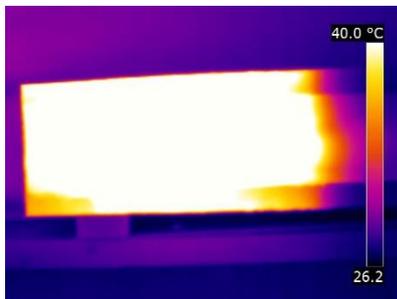
**Figura 6.14** – Imagem infravermelha da viga LCR imediatamente após cessar o aquecimento.



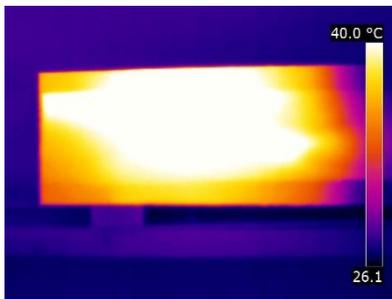
**Figura 6.15** – Imagem infravermelha da viga LCR 1 minuto após cessar o aquecimento (imagem ideal).



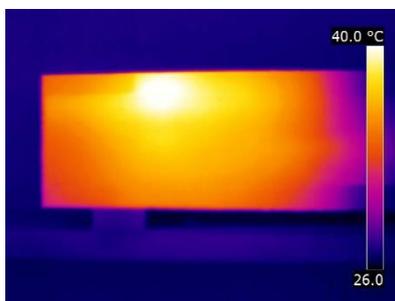
**Figura 6.16** – Imagem infravermelha da viga LCR 2 minutos após cessar o aquecimento



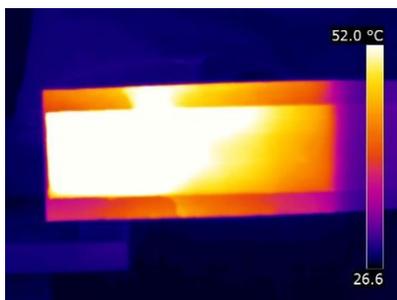
**Figura 6.17 – Imagem infravermelha da viga PCR imediatamente após cessar o aquecimento.**



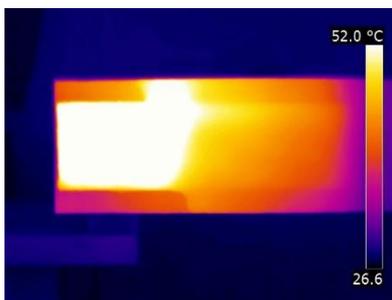
**Figura 6.18 – Imagem infravermelha da viga PCR 1 minuto após cessar o aquecimento (imagem ideal).**



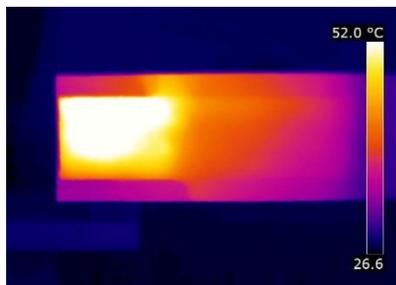
**Figura 6.19 – Imagem infravermelha da viga PCR 2 minutos após cessar o aquecimento.**



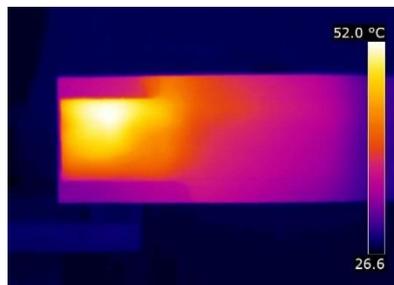
**Figura 6.20 – Imagem infravermelha da viga PVR imediatamente após cessar o aquecimento.**



**Figura 6.21 – Imagem infravermelha da viga PVR 1 minuto após cessar o aquecimento.**



**Figura 6.22 – Imagem infravermelha da viga PVR 2 minutos após cessar o aquecimento (imagem ideal).**



**Figura 6.23 – Imagem infravermelha da viga PVR 3 minutos após cessar o aquecimento.**

Tal como foi constatado pelo cálculo do contraste térmico, a delaminação para a viga PCR mostrou-se mais sutil quando comparada às delaminações das vigas LCR e PVR.

As imagens infravermelhas das Figuras de 6.14 a 6.23 demonstram com clareza a área de delaminação das vigas o que não pode ser visto a olho nu, conforme mostram as fotografias das Figuras 6.24, 6.25 e 6.26.



**Figura 6.24 – Imagem fotográfica da viga LCR, lado esquerdo, na qual não se visualiza a delaminação a olho nu.**



**Figura 6.25 – Imagem fotográfica da viga PCR, lado esquerdo, na qual não se visualiza a delaminação a olho nu.**



**Figura 6.26 – Imagem fotográfica da viga PVR, lado esquerdo, na qual não se visualiza a delaminação a olho nu.**

## **6.5 Análises finais**

Neste experimento, foram avaliados dois tipos de contraste térmico em imagens infravermelhas para detecção de delaminações em vigas reforçadas por diferentes tipos de PRF: contraste térmico absoluto e contraste térmico padrão.

O cálculo do contraste térmico absoluto foi um pouco modificado de forma a compensar a distribuição não uniforme de temperaturas, sendo utilizadas duas vigas para o cálculo, uma rompida e outra intacta, executadas com o mesmo tipo de reforço e submetidas à mesma excitação térmica. Porém, para se obter maior confiabilidade, utilizou-se o cálculo do contraste térmico padrão, já que este suprime as diversas contribuições adversas do ambiente e que também levou em consideração a viga rompida e intacta.

De acordo com Maldague (2001), o principal problema do cálculo do contraste térmico é a obtenção de um aquecimento uniforme e o conhecimento prévio da área não defeituosa. Contudo, em uma aplicação em campo, para conhecimento prévio da área não defeituosa, seria necessário já existirem ensaios desde que a estrutura foi construída (ou reforçada), o que não é uma regra geral. Em referência ao aquecimento uniforme da área, sabe-se que vários são os empecilhos para a obtenção de um aquecimento uniforme, tais como tamanho e posicionamento da fonte de calor, tamanho da área a ser inspecionada, entre outros (MULAVEESALA; VENKATA GHALI, 2011). Sendo assim, uma solução seria promover o aquecimento em estrutura semelhante, porém intacta, tal como foi adotado nesta etapa experimental.

Neste experimento, foram adotados tempos curtos de aquecimento, pois o objetivo é a demonstração de uma inspeção termográfica rápida, o que se mostrou bastante satisfatório para a

identificação das delaminações. Todavia, observou-se que na medida em que se aumentou o aquecimento, se aumentou também o contraste térmico padrão. Logo, espera-se que para tempos de excitação térmica superiores de 10 minutos sejam obtidos contrastes térmicos padrão ainda maiores. Porém, deve-se lembrar mais uma vez que o aquecimento do compósito não pode ser realizado indefinidamente uma vez que pode alterar configurações químicas do material do reforço, enfraquecendo-o, já que existe uma temperatura de serviço máxima para reforços de PRF recomendada pelo ACI 440.2R-08 (2008).

Além do contraste térmico, outro ponto essencial para se obter uma melhor imagem térmica e assim poder avaliá-la é o ajuste da câmera infravermelha por meio da inserção correta de seus parâmetros, conforme aponta sugestão do próprio manual da câmera. Neste sentido, o Apêndice A mostra a análise de como as imagens infravermelhas se comportam quando estes parâmetros são variados.

No próximo capítulo é iniciada a fase de análise de termografia infravermelha passiva e suas análises quantitativas referentes à detecção de danos subsuperficiais em estruturas reforçadas por PRF.



## **CAPÍTULO 7 - DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DE DEFEITOS SUBSUPERFICIAIS NA ADERÊNCIA CONCRETO/PRF POR TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PASSIVA**

Neste capítulo faz-se uma análise quantitativa de defeitos subsuperficiais entre concreto e mantas de PRF com a utilização da termografia infravermelha. A intenção é estimar a dimensão do dano a partir de avaliações matemáticas de gráficos resultados de imagens termográficas, que foram obtidos por programa computacional. Entraram na análise: diferentes dimensões e tipos de defeitos subsuperficiais (ar, água, madeira, cortiça, alumínio, poliestireno expandido), diferentes tipos de mantas de PRF (PRFV e PRFC) e ainda diferentes tipos de matrizes de colagem (epoxídica e cimentícia).

### **7.1 Introdução**

Como já apresentado anteriormente, a presença de elementos na interface de colagem concreto/PRF pode promover características indesejáveis ao objetivo do reforço.

Por isso, torna-se importante não apenas identificar onde está localizado este dano observando o termograma, mas também entender melhor suas características físicas, tais como dimensão e tipo. Isso significa que tão importante quanto a análise qualitativa da imagem é essencial proceder à sua análise quantitativa.

Em relação a análise qualitativa, se for necessário como condição inicial conhecer ou prever, por exemplo, características térmicas da superfície em questão tem-se então um problema direto. O problema direto pode modelar a transferência de calor por cálculos analíticos ou por técnicas numéricas, como elementos finitos ou diferenças finitas (MALDAGUE, 2000).

Neste contexto, podem-se citar alguns exemplos do estudo da termografia infravermelha na análise de defeitos subsuperficiais de aderência. Lai et al. (2009) utilizaram o modelo de diferenças finitas baseada na equação de Fourier para detectar vazios de diferentes tamanhos e profundidades em corpos de prova de concreto cobertos com reforço de laminado de carbono. A análise numérica foi comparada a experimentos laboratoriais e os valores obtidos foram em média maiores que os valores nominais. Essa diferença foi atribuída a dificuldade de

fixação do poliestireno durante a moldagem ou ao desvio sistemático entre os resultados experimentais e a teoria.

Outro estudo apresenta resultados de simulações numéricas 3D para fenômenos térmicos em material uniforme contendo defeito subsuperficial (GRYS; VOKOROKOS; BOROWIK, 2014). Dois defeitos de diferentes propriedades térmicas foram inseridos no material e analisados de acordo com a temperatura da superfície. Neste caso, os resultados da modelagem foram adequados quando utilizado o *step heating* como estimulação térmica.

A análise de um problema direto é baseada no conhecimento prévio da superfície térmica. Entretanto, não é sempre possível obter os parâmetros térmicos de superfície do material analisado, logo a abordagem por problema inverso pode ser utilizada para avaliar resultados experimentais. O problema inverso aplicado à termografia infravermelha pode ser descrito como a capacidade de caracterizar propriedades de uma área suspeita em um termograma utilizando-se da análise qualitativa, o que pode ser substituído, por exemplo, por ábacos que consistem em uma família de curvas ou equações empíricas estabelecidas a partir de um modelo direto (MALDAGUE, 2000).

Angiuli et al. (2015) utilizaram a termografia infravermelha ativa com a abordagem de problema inverso para identificar e quantificar defeitos subsuperficiais em alvenaria reforçada com polímeros, aquecidas por lâmpadas infravermelhas. Os cálculos forneceram medidas dos defeitos de dimensões equivalentes a um pixel que foram então “traduzidas” para dimensões reais. Os resultados mostraram que o erro foi maior para defeitos menores que 3 cm.

Outro trabalho científico usou uma diferenciação algorítmica espacial simples para analisar a aplicação da termografia infravermelha no limite e estimar a dimensão dos descolamentos de compósitos que reforçam altos edifícios residenciais (LAI; POON, 2012). Este método foi baseado na termografia infravermelha passiva. Neste estudo, as amostras foram submetidas a variações de fluxo de calor e intensidade solar. A validade da metodologia foi verificada pela comparação desta estimativa com a avaliação real dos defeitos. O erro encontrado foi menor que 16%.

Considerando agora a análise quantitativa (i.e., problema inverso) para resultados experimentais, é importante notar que neste caso o resultado preciso da medição não é obtido tão facilmente de forma experimental, se comparado às simulações numéricas. Sendo assim, sem rigorosas condições de temperatura e umidade impostas em laboratório e ainda para pequenos defeitos esta precisão pode diminuir e

estas são as condições comumente encontradas em campo (DUMOULIN et al., 2010) (GRYS; VOKOROKOS; BOROWIK, 2014). Portanto, estas foram as condições escolhidas para esta etapa experimental do trabalho, que foi desenvolvida durante um programa de doutorado sanduíche realizado na Universidade de Bolonha na Itália.

## 7.2 Materiais e características das amostras

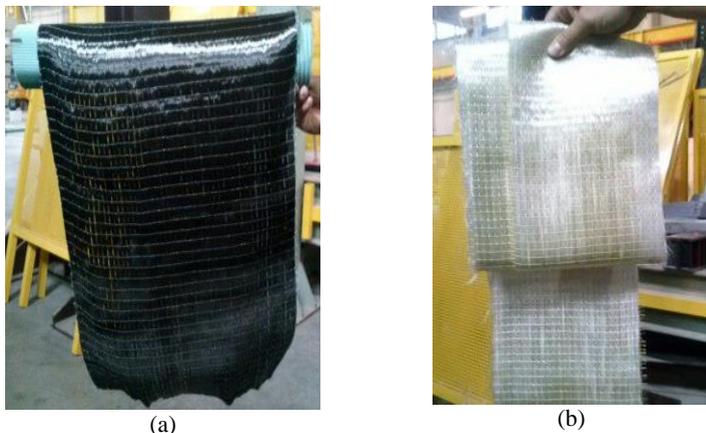
Para proceder ao experimento, oito amostras de concreto de 40 x 40 cm e 35 cm de espessura foram reforçadas por manta de polímero reforçado com fibras. Mantas unidirecionais de PRFC (polímero reforçado com fibras de carbono) e de PRFV (polímero reforçado com fibras de vidro) foram usadas como reforço (demonstradas na Figura 7.1) e como matrizes de colagem foram utilizadas a cimentícia e a epoxídica cujas características estão dispostas na Tabela 7.1.

Inclusões artificiais (que a partir desse ponto serão nomeadas por “danos”, “defeitos” ou “falhas”) de vários tipos e dimensões foram inseridos logo abaixo do conjunto PRF/Matrix a fim de representar falhas no concreto de diferentes características térmicas.

Estes danos artificiais foram feitos de água, ar, poliestireno expandido (EPS), cortiça e alumínio em forma quadrada. Todos possuem a mesma espessura de 0,5 cm e cinco dimensões diferentes: 0,5x0,5; 1,0x1,0; 2,0x2,0; 3,0x3,0 e 4,0x4,0 cm. Para cada duas amostras foram utilizados o mesmo tipo de reforço e o mesmo tipo de matriz para 6 tipos diferentes de defeitos, sendo que cada defeito possui 5 dimensões diferentes. Os defeitos foram distribuídos na superfície da amostra a ser monitorada (vide Figuras 7.2 e 7.3).

**Tabela 7.1 – Características das matrizes de colagem.**

<b>Características</b>	<b>Cimentícia</b>	<b>Epoxídica</b>
Mistura	4 x Componente A: 1 x Componente B	3 x Componente A: 1 x Componente B
Marca	Sikadur-330 - Sika	Master Brace - BASF
Aspecto	Cinza claro, pastoso	Transparente, viscoso
Densidade	1,3 kg/l	1.102 kg/m <sup>3</sup>
Resistência à compressão	≥ 30 MPa	28,3 MPa



**Figura 7.1 – Mantas unidirecionais: (a) Fibra de carbono; (b) Fibra de vidro.**

Os defeitos artificiais foram incluídos nas amostras antes da aplicação do reforço. Primeiramente, moldou-se uma camada de 0,5 cm de espessura de argamassa em cima de cada espécime. Sendo assim, foram inseridos na argamassa fresca os defeitos artificiais de madeira, EPS, cortiça e alumínio de forma que apenas sua superfície aparecesse atingindo o mesmo nível da superfície de argamassa. Esse procedimento assegura que a superfície fique plana para que assim, após a aplicação da manta, não haja saliências que permitam a identificação visual dos defeitos por inspeção visual.

Para a inserção de defeitos de água e ar, pedaços de borracha maleável de 5mm de espessura (segundo as dimensões propostas) foram inseridos na argamassa fresca assim como foram inseridos os demais defeitos. Após a secagem da argamassa, a borracha foi removida sendo criada então uma cavidade na superfície da argamassa. Depois desta etapa a preparação de defeitos de ar e água seguiram diferentes procedimentos:

- Os defeitos de ar foram representados por cavidades cobertas por fita adesiva transparente, cujas bordas foram seladas com resina epóxi.

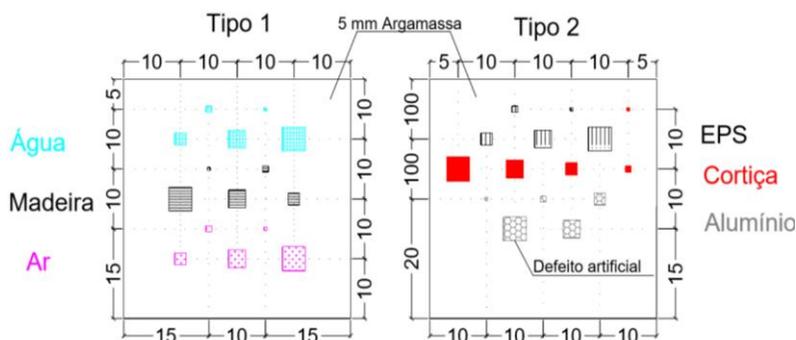
- Para os defeitos de água a cavidade deixada na argamassa foi previamente impermeabilizada e depois disso a água foi acrescentada. Para impermeabilizar as cavidades, primeiramente a resina epóxi foi espalhada dentro delas e então um plástico fino foi colado em cima da resina. Depois disso, água foi adicionada nas cavidades e finalmente

estas foram cobertas com fita adesiva transparente, cujas bordas foram seladas com resina epóxi.

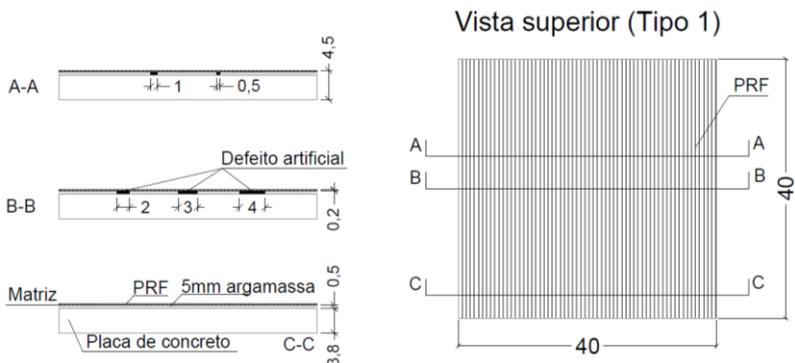
O arranjo e posição dos defeitos artificiais além de outros detalhes sobre as amostras antes e depois de inserido os defeitos são mostrados nas Figuras 7.2 e 7.3. A denominação de cada amostra está descrita na Tabela 7.2.

A colagem das mantas foi executada de acordo com o manual dos fabricantes das matrizes de colagem. Primeiramente, impregnou-se a manta com a matriz de colagem. Em seguida, esta foi espalhada por toda a área da amostra e então a manta impregnada foi sobreposta sobre esta superfície. Após a sobreposição, a superfície foi nivelada manualmente de forma a aperfeiçoar a aderência.

Apesar do rigoroso controle no procedimento para evitar o vazamento de água, os resultados indicaram que a água vazou completamente das amostras CE1, CC1, GE1 e parcialmente da amostra GC1, que foi a única na qual as bordas foram seladas duas vezes. A água que escapou das amostras influenciou os resultados como será mostrado a seguir.



**Figura 7.2 – Amostras em concreto moldadas na superfície com 5mm de espessura de argamassa antes de serem reforçadas pela mesma manta de PRF (dimensões em cm).**



**Figura 7.3 – Amostra após o reforço com PRF (usando como exemplo o Tipo 1). PRF podendo ser PRFC ou PRFV. Matriz podendo ser epoxídica ou cimentícia (dimensões em cm).**

**Tabela 7.2 – Códigos das amostras.**

<i>Código da amostra</i>	<i>Compósito</i>	<i>Matriz</i>	<i>Tipo</i>
CE1	Carbono	Resina Epóxi	1
CE2	Carbono	Resina Epóxi	2
CC1	Carbono	Cimentícia	1
CC2	Carbono	Cimentícia	2
GE1	Vidro	Resina Epóxi	1
GE2	Vidro	Resina Epóxi	2
GC1	Vidro	Cimentícia	1
GC2	Vidro	Cimentícia	2

### 7.3 Instrumentação e aquisição dos dados

As amostras foram divididas em dois grupos. O primeiro formado por amostras reforçadas por PRFC, duas foram coladas com matriz cimentícia (amostras CC1, CC2 – vide Tabela 7.2) e duas coladas por matriz epoxídica (amostras CE1, CE2 – vide Tabela 7.2). O segundo grupo era formado por amostras reforçadas por PRFV sendo duas coladas com matriz cimentícia (amostras GC1 e GC2 – vide Tabela 7.2) e duas por matriz epoxídica (amostras GE1 e GE2 – vide Tabela 7.2).

O procedimento experimental foi então iniciado colocando todas as amostras em uma câmara climática a 20°C e umidade relativa do ar de 61% com o objetivo de que isso aumente a diferença térmica entre a

amostra e o meio ambiente. Após remover as amostras da câmara climática cada grupo de amostras foi exposta a luz direta do sol durante 15 minutos. As amostras foram então rapidamente movidas para dentro do laboratório e dispostas em um painel de madeira inclinado. Este painel foi posicionado dentro de uma estrutura coberta para que as amostras fossem protegidas da reflexão externa no momento da captura das imagens infravermelhas. Maiores detalhes sobre este arranjo podem ser vistos na Figura 7.5. Imediatamente após posicionar o grupo de amostras, foi captada a imagem infravermelha e esta foi a imagem utilizada nas análises.

Neste experimento, tempo de aquecimento solar foi testado para 1, 5, 8, 15 minutos de exposição solar. Ao final, analisando-se as imagens pelo cálculo de contraste térmico padrão, escolheu-se o tempo de 15 minutos de aquecimento. A escolha dos tempos de exposição solar testados se baseou no objetivo de se avaliar uma breve exposição solar e, então, a primeira imagem captada após os 15 minutos foi aquela que mostrou o melhor contraste térmico quando comparado com os períodos de tempo mais curtos que foram testados.

A câmara infravermelha utilizada para captar as imagens era da marca FLIR, modelo P620, tal como ilustra a Figura 7.4, sendo suas características expostas na Tabela 7.3.



**Figura 7.4 – Câmera FLIR P620, utilizada nesta etapa experimental.**

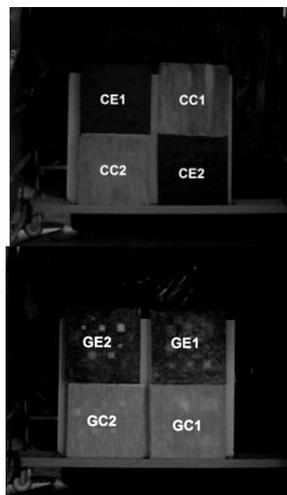
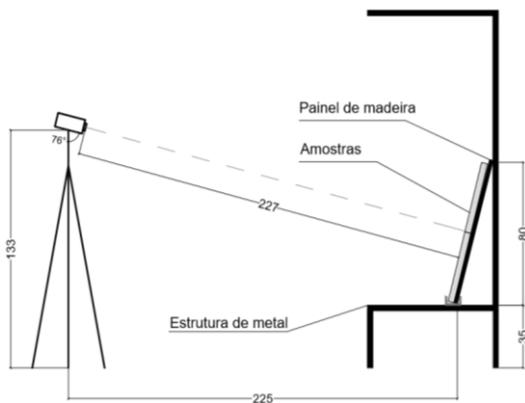
Como pode ser visto pela Tabela 7.3, esta câmara possui resolução mais alta do que a usada no experimento anterior, o que possibilita a análise de defeitos menores.

A câmara infravermelha foi posicionada em um tripé a uma altura de 1,33m e distante 2,25 m do painel de madeira inclinado, onde estava localizado o grupo de amostras. A Figura 7.5 mostra os detalhes do posicionamento.

**Tabela 7.3 – Características da câmera infravermelha FLIR P620.**

Característica	Valor
Resolução espacial	640 x 480 pixel
FOV	24° x 18°
IFOV	0,65 mrad
Sensibilidade Térmica	40 mK (0,04°C)
Taxa de repetição de quadros ( <i>Frame Rate</i> )	30 Hz
Faixa de temperatura do objeto sob inspeção	-40°C a 500°C

As imagens foram capturadas para cada grupo de amostras durante os dias ensolarados de verão no laboratório de Engenharia (LISG) da Universidade de Bolonha, na Itália. A Tabela 7.4 mostra as informações sobre o tempo no dia e horário em que as amostras foram expostas ao sol e as imagens foram capturadas.



**Figura 7.5 – Posição da câmera infravermelha à esquerda e imagens das amostras à direita (dimensões em cm).**

**Tabela 7.4 – Características sobre o dia do aquecimento solar**

<i>Grupo</i>	<i>Horário</i>	<i>Temp. Externa</i>	<i>Umidade do ar externo</i>	<i>Temp. Interna</i>	<i>Umidade do ar interno</i>
CFRP	12:11	34°C	57%	33°C	50%
GFRP	12:51	35°C	57%	33°C	50%

## 7.4 Resultados e análises

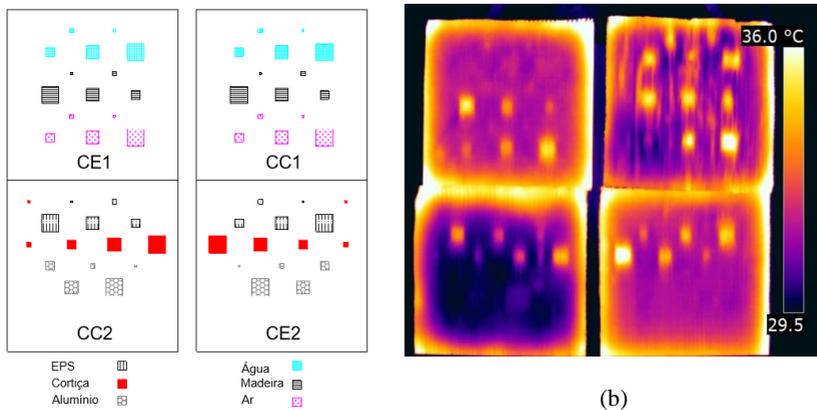
Primeiramente foi realizada uma análise qualitativa considerando os termogramas obtidos de modo que fossem identificadas as distribuições anormais de temperatura sobre a superfície das amostras.

O programa *FLIR Quick Report* foi utilizado para obtenção de melhores ajustes das imagens para a visualização dos defeitos.

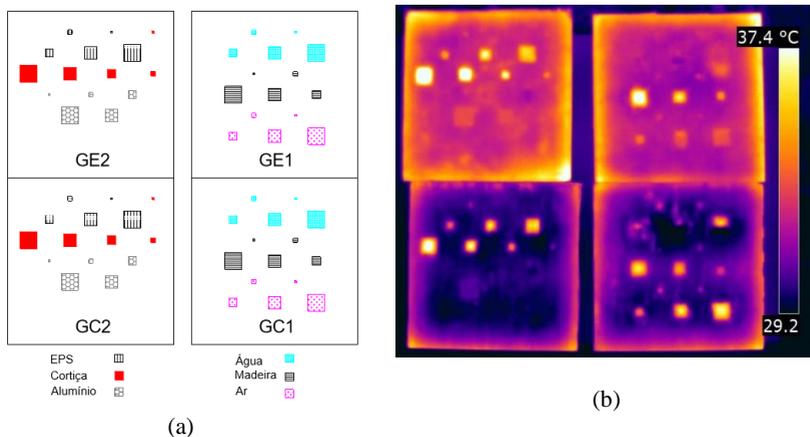
Pela observação das imagens infravermelhas, foi possível identificar na maioria dos casos onde se encontravam os defeitos artificiais (vide Figuras 7.6(b) e 7.7(b)).

Apenas as áreas suspeitas do termograma foram analisadas. As Tabelas 7.5 e 7.6 indicam quais os defeitos foram visualizados nas imagens infravermelhas.

Após a análise das imagens das Figuras 7.6(b) e 7.7(b) e Tabelas 7.4 e 7.5 observam-se algumas conclusões comuns aos dois grupos. Para ambos os grupos os defeitos artificiais em alumínio não foram detectados. Isto ocorre porque o alumínio é um material de alta condutividade térmica comparado aos outros materiais utilizados neste experimento. Tal fato possibilita uma condução de calor imediata através da amostra. Conseqüentemente, a superfície imediatamente acima do defeito não acumula calor e então a imagem infravermelha não acusa áreas com não homogeneidade de temperatura nestas áreas.



**Figura 7.6 – Amostras reforçadas com PRFC: (a) Posição dos defeitos. (b) Imagem infravermelha após o ajuste do nível de temperatura pelo programa *FLIR Quick Report*.**



**Figura 7.7 – Amostras reforçadas com PRFC: (a) Posição dos defeitos. (b) Imagem infravermelha após o ajuste do nível de temperatura pelo programa *FLIR Quick Report*.**

**Tabela 7.5 – Identificação visual de defeitos na imagem infravermelha considerando as amostras reforçadas com PFRV.**

<i>Amostra</i>	<i>Tipo de defeito</i>	<i>Dimensões reais das áreas suspeitas (mm)</i>
CE1	Água	Não detectado
	Madeira	20; 30 e 40
	Ar	20; 30 e 40
	EPS	10; 20; 30 e 40
CE2	Cortiça	20; 30 e 40
	Alumínio	Não detectado
	Água*	-
CC1	Madeira	20; 30 e 40
	Ar	20; 30 e 40
	EPS	20; 30 e 40
CC2	Cortiça	20; 30 e 40
	Alumínio	Não detectado

**Tabela 7.6 – Identificação visual de defeitos na imagem infravermelha considerando as amostras reforçadas com PFRV.**

<i>Amostra</i>	<i>Tipo de defeito</i>	<i>Dimensões reais das áreas suspeitas (mm)</i>
GE1	Água	Não detectado
	Madeira	Todos: 5, 10, 20; 30 e 40
	Ar	10, 20; 30 e 40
GE2	EPS	10, 20; 30 e 40
	Cortiça	10, 20; 30 e 40
	Alumínio	Não detectado
GC1	Água*	-
	Madeira	10, 20; 30 e 40
GC2	Ar	Todos: 5, 10, 20; 30 e 40
	EPS	10, 20, 30, 40
	Cortiça	10, 20; 30 e 40
	Alumínio	Não detectado

\*Água vazou.

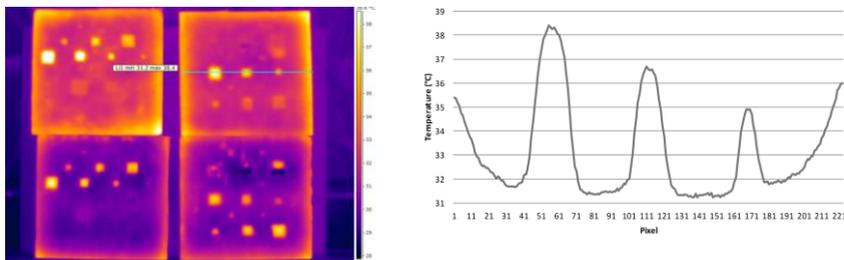
Apenas na amostra GC1 a água permaneceu dentro da cavidade, simulando o defeito artificial. Sendo assim, observando o defeito de água de 40mm na amostra GC1, pode-se dividir a imagem em duas partes: na parte de cima há um ponto mais aquecido (*hot spot*) enquanto que logo abaixo há uma área mais fria. A área mais quente representa o ar, enquanto a área mais fria representa a água. A água aparece como uma área fria pois a amostra estava situada previamente em um ambiente mais frio (câmara climática). Sabe-se que a água necessita de grande quantidade de calor para elevar sua temperatura devido a seu alto calor específico. Neste caso, os 15 minutos de insolação não foram suficientes para fornecer calor para que a água elevasse a temperatura.

Nesta mesma amostra (GC1), o defeito de água de 3 cm aparece como uma área mais fria sem definição de bordas (Figura 7.7 (b), segunda linha da amostra GC1), o que parece a fuga da água pelas bordas ficando aprisionada depois da secagem da resina epóxi.

Os defeitos de água nas amostras CE1 e GE1 não aparecem nas imagens infravermelhas. Neste caso, a água escapou completamente e assim a cavidade passou a ser apenas preenchida por ar. Entretanto, a cavidade ainda estava úmida e assim, quando a amostra foi aquecida a umidade do ar resfriou o aquecimento do ar quando a amostra foi exposta ao sol. Por isso, a imagem infravermelha ficou homogênea.

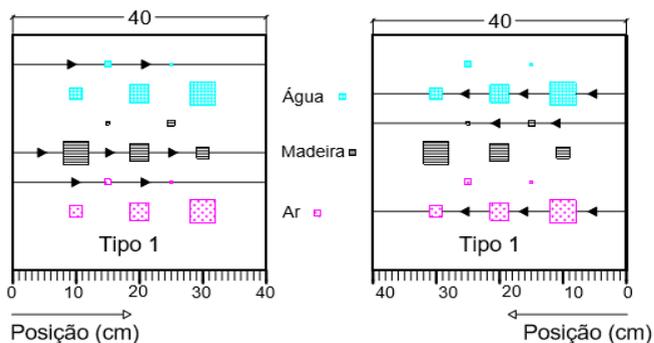
Por outro lado, alguns defeitos de água na amostra CC1 são evidentes no termograma mesmo estando vazios. Neste caso, observou-se que a matriz cimentícia absorveu a água o que diluiu sua colagem. O resultado são as áreas mais aquecidas em forma de tiras verticais que representam que o reforço não foi adequadamente aderido. Devido a esta mesma razão, os defeitos de 0,5cm e 1 cm da amostra GC1 não possuem água dentro e podem ser vistos assim como os defeitos de ar.

Examinando as áreas suspeitas e usando o programa *FLIR Quick Report* o perfil térmico de temperaturas foi obtido a partir das imagens infravermelhas. Então, foi possível calcular a temperatura linear para cada pixel da imagem. Considerando que cada pixel representa uma certa medida real, os dados do perfil de temperatura podem produzir um gráfico de Temperatura x Posição, como mostra a Figura 7.8.

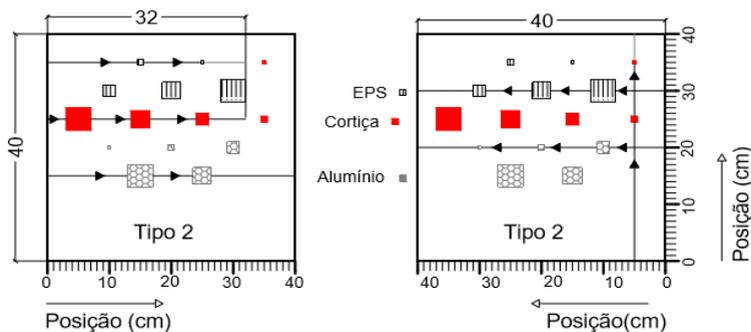


**Figura 7.8 – Perfil de temperatura sobre 3 defeitos de madeira na amostra GE1 (ao longo da linha à esquerda do termograma).**

As Figuras 7.9 e 7.10 apresentam a direção e a dimensão dos perfis de temperatura bem como a direção e posição dos defeitos nas amostras. A direção foi escolhida classificando os defeitos do maior para o menor.



**Figura 7.9: Direção e dimensão dos perfis de temperatura para amostras do Tipo 1.**



**Figura 7.10: Direção e dimensão dos perfis de temperatura para amostras do Tipo 2.**

Cada linha foi desenhada por todo o comprimento da amostra. Como se sabe que cada placa possui 40 cm de comprimento horizontal, a dimensão dos defeitos pode ser obtida simplesmente dividindo-se 40 cm pelo número de pixels que compreende o comprimento da linha na imagem infravermelha.

Os gráficos obtidos para cada defeito a partir dos perfis de temperatura são apresentados nas Figuras de 7.11 a 7.26, exceto para defeitos que não podem ser vistos nos termogramas e todos os defeitos de água cujas análises foram apenas visuais, assim como analisado anteriormente.

A maioria dos gráficos indicam o mesmo comportamento: há um aumento de temperatura nas bordas das placas e há uma elevação da curva dos gráficos, que representam um aumento na temperatura, onde estão localizados os defeitos artificiais. Além disso, considerando o mesmo material, observa-se que quanto maior a dimensão do defeito, maior é o pico do gráfico.

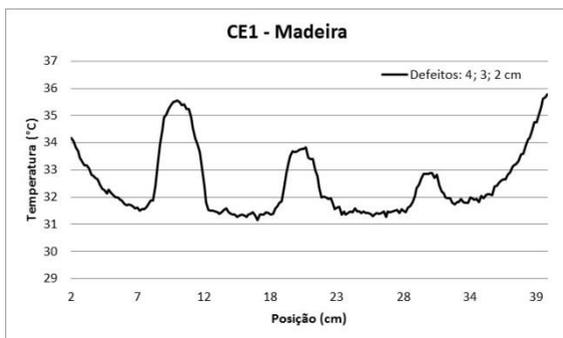


Figura 7.11 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de madeira, CE1

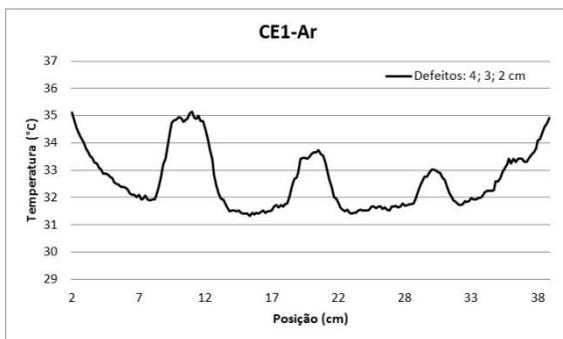
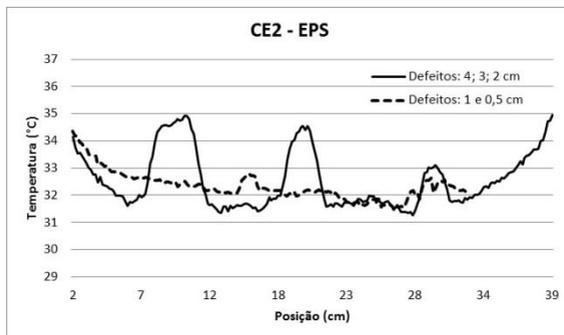
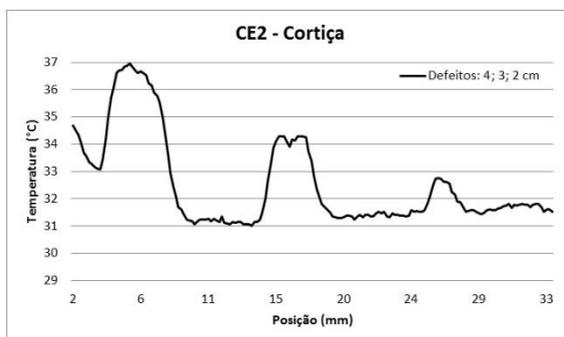


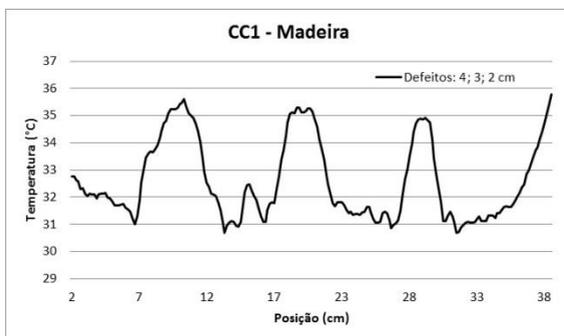
Figura 7.12 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de ar, CE1.



**Figura 7.13 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de EPS, CE2.**



**Figura 7.14 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de cortiça, CE2**



**Figura 7.15 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de madeira, CC1**

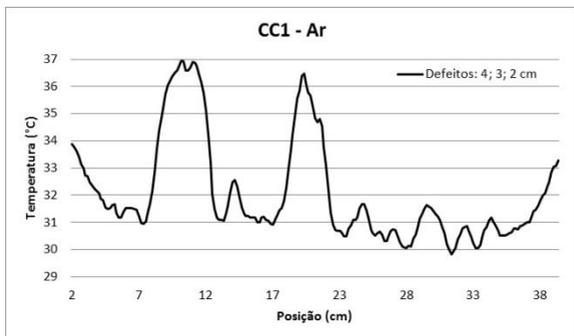


Figura 7.16 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de ar, CC1

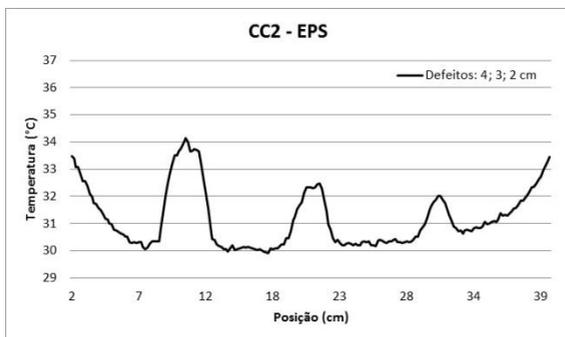


Figura 7.17 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de EPS, CC2

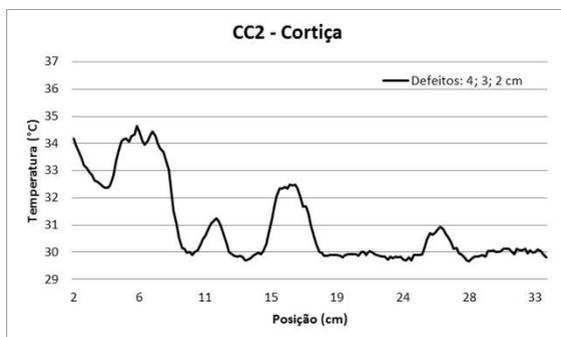


Figura 7.18 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de cortiça, CC2

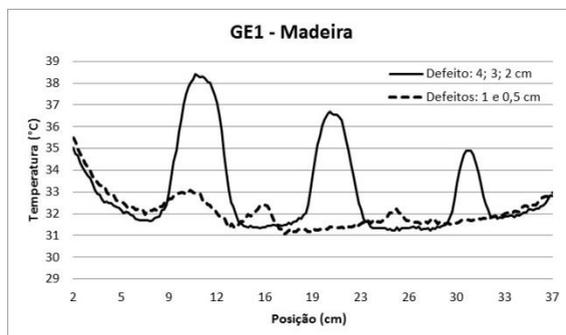


Figura 7.19 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de madeira, GE1

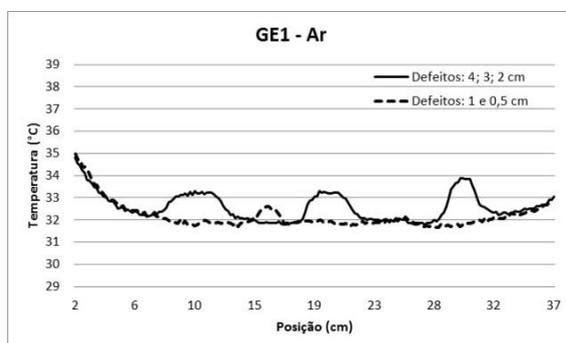


Figura 7.20 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de ar, GE1

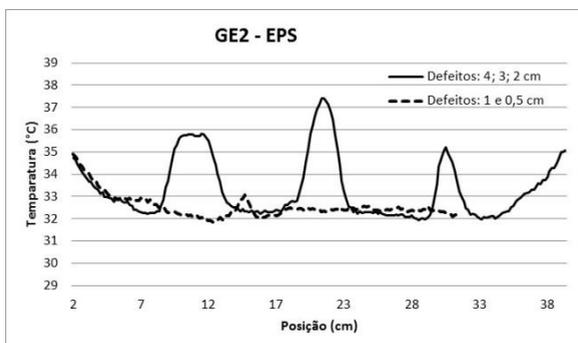


Figura 7.21 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de EPS, GE2

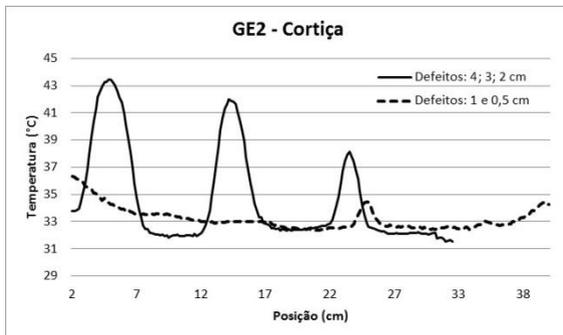


Figura 7.22 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de cortiça, GE2

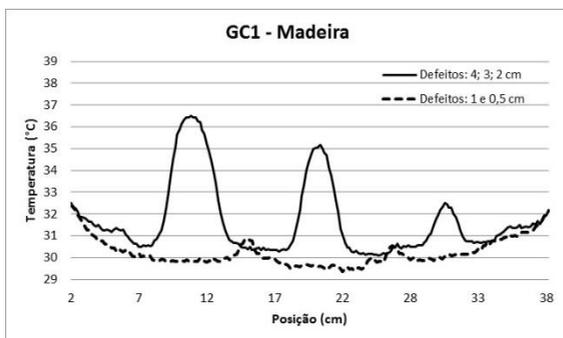


Figura 7.23 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de madeira, GC1

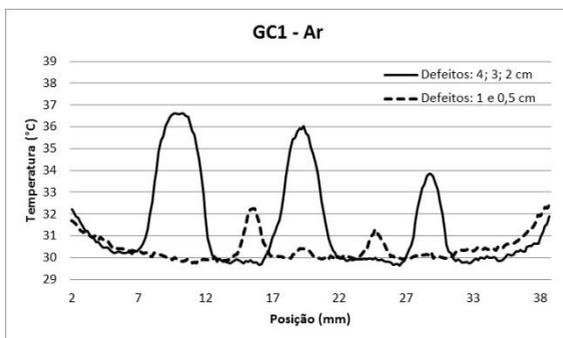


Figura 7.24 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de ar, GC1

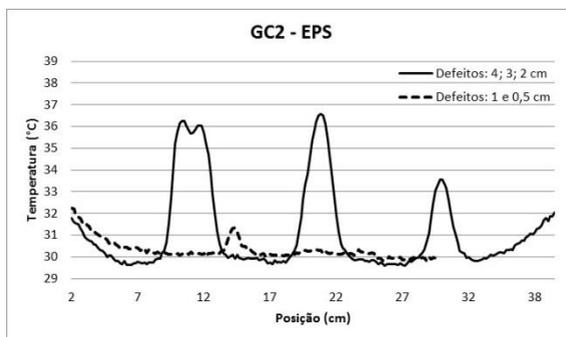


Figura 7.25 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de EPS, GC2

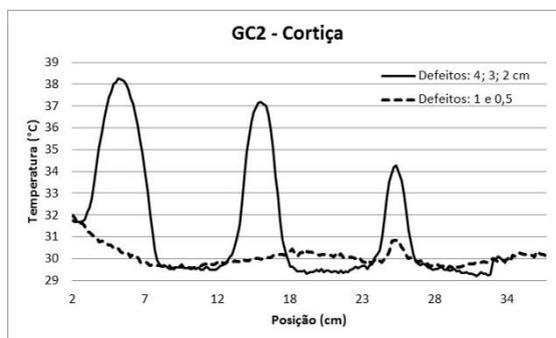


Figura 7.26 – Gráfico perfil de temperatura, defeitos de cortiça, GC2

Entretanto, alguns gráficos não seguem este padrão. Na Figura 7.15 (amostra CC1, defeito de madeira), os picos do gráfico alcançam a mesma altura. Isto pode ser explicado pelo vazamento de água na amostra CC1, de onde deveria ser o defeito de água. A água que vazou desta cavidade umedeceu os defeitos de madeira de 4, 3 e 2 cm. Como a água possui um alto calor específico, a mesma quantidade de calor faz com que a temperatura alcance aproximadamente o mesmo valor nestes defeitos de dimensões diferentes.

Na Figura 7.20 (amostra GE1, defeitos de ar), observa-se uma diminuição do pico no gráfico para os defeitos de 4 e 3 cm, o que pode ser atribuído às variações de espessura na cavidade do defeito artificial devido a imperfeições na argamassa.

Na Figura 7.21 (amostra GE2, defeito de EPS), o defeito de EPS de 4 cm apresentou um pico no gráfico mais baixo do que para o de 3 cm. A razão para o ocorrido se deve a fragilidade deste material, pois sua espessura pode diminuir quando manuseado. O mesmo pode ter

ocorrido no gráfico da Figura 7.25 (amostra GC2, defeito de EPS) para o defeito de 4 cm.

Além disso, os gráficos das Figuras 7.15, 7.17 e 7.18 apresentam picos em locais onde não foram inseridos defeitos inicialmente, então pode-se inferir que nestes pontos houve uma falha de colagem.

Contudo, observando os picos de temperatura nos gráficos, é possível estimar com pouca precisão a localização dos defeitos. Porém, as reais bordas do defeito não estão exatamente localizadas no ponto onde a temperatura inicia seu aumento. Existe uma área ao redor do dano, que aparece dentro da elevação da linha do gráfico como se fizesse parte do defeito e isso ocorre devido a distribuição de temperatura ao longo do defeito.

A Figura 7.27 mostra onde as reais bordas dos defeitos realmente estão.

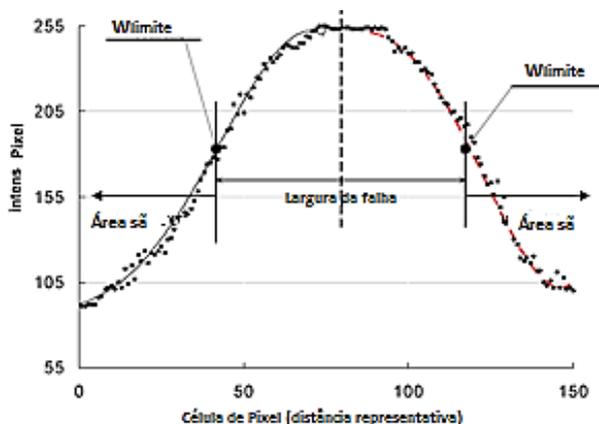


Figura 7.27: Largura real do defeito, baseando-se no pico do gráfico (LAI et al., 2009 - Adaptado).

Por isso, para que seja determinado o tamanho do defeito (ou a largura da falha, assim como indicado na Figura 7.27) a localização das bordas ( $w_{limite}$ ) deve ser determinada com precisão.

## 7.5 Determinação do tamanho dos defeitos

Neste estudo, a determinação do tamanho dos defeitos inicia-se isolando-se as áreas suspeitas do gráfico (elevações da curva). Então, cada uma pode ser analisada separadamente e assim será calculado o tamanho de um defeito por vez.

Para isolar as elevações nos gráficos, primeiramente são escolhidos os pontos desde quando a temperatura começa a se elevar até o ponto onde ela cai completamente. Esta escolha é determinada apenas pela observação do gráfico.

Dois vetores são então obtidos a partir deste procedimento:  $T$  (Equação 7.1) e  $P$  (Equação 7.2), representando respectivamente os pontos de temperatura e posição. A matriz  $P$  foi transformada, a partir da matriz de pixel, em valores de posição em centímetros.

$$T = \begin{bmatrix} t_1 \\ \dots \\ t_n \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

onde  $t$  = temperatura no pixel

$$P = \begin{bmatrix} p_1 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

onde  $p$  = posição em cm\*

$$i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$$

\*Seguindo a orientação das amostras das Figuras 7.9 e 7.10.

O primeiro passo do cálculo foi a obtenção dos vetores  $Tav$  (Equação 7.3) e  $Pav$  (Equação 7.4) que consistiu na criação de um filtro, a fim de minimizar os ruídos. Este filtro baseia-se no cálculo de médias de cada um dos pontos consecutivos de temperatura bem como de suas posições respectivas.

Após minimizados os ruídos, calculou-se a tangente entre os pontos dos vetores  $Tav$  e  $Pav$  obtendo assim o vetor  $TAN$  (Equação 7.5).

Quando a curva Temperatura *versus* Posição (ou *Pixel intensity versus Pixel Cell*, como na Figura 7.27) está aumentando, sua tangente começa positiva, atingindo o valor zero no máximo e finalmente tornando-se negativa na parte descendente. De acordo com este comportamento, o vetor  $TAN$  pode ser dividido em duas matrizes nomeadas aqui de  $TAN1$  (Equação 7.7) e  $TAN2$  (Equação 7.8).

(7.3)

$$Tav = \begin{bmatrix} tav_1 \\ \dots \\ tav_{(n-1)} \end{bmatrix} \quad \text{onde} \quad tav_{(n-1)} = \left( \frac{t_n + t_{(n+1)}}{2} \right)$$

$$Pav = \begin{bmatrix} pav_1 \\ \dots \\ pav_{(n-1)} \end{bmatrix} \quad \text{onde} \quad pav_{(n-1)} = \left( \frac{p_n + p_{(n+1)}}{2} \right) \quad (7.4)$$

$$i = 2, 3, 4, \dots, n$$

$$TAN_{(i-2)} = \begin{bmatrix} tan_1 \\ \dots \\ tan_a \\ \dots \\ tan_b \\ tan_{b+1} \\ \dots \\ tan_c \\ \dots \\ tan_{n-2} \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

$$\text{onde} \quad tan_{(n-2)} = \frac{(tav_{(n-1)} - tav_{(n-2)})}{(pav_{(n-1)} - pav_{(n-2)})} \quad (7.6)$$

$$i = 3, 4, 5, \dots, n$$

$$TAN1 = \begin{bmatrix} tan_a \\ \dots \\ tan_b \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

$$TAN2 = \begin{bmatrix} tan_{b+1} \\ \dots \\ tan_c \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

Condições:

- 1)  $(tan_a, tan_{a+1}, tan_{a+2}, \dots, tan_b) > 0$
- 2)  $(tan_{b+1}, tan_{b+2}, tan_{b+3}, \dots, tan_c) \leq 0$
- 3)  $tan_b \approx tan_{b+1} \approx 0$

Considerando as condições 1 e 2, a matriz **TANI** representa a elevação da curva (tangente positiva) enquanto que a matriz **TAN2** representa queda da curva (tangente negativa).

Sequencialmente, 3 valores absolutos máximos para a matriz **TAN 1** e para a matriz **TAN2** são escolhidos dando origem às matrizes **TAN1MAX** e **TAN2MAX** (Equações 7.9 e 7.10, respectivamente). Nota-se que para cada valor absoluto máximo da tangente estão associados 2 pontos da curva referentes a matriz **Pav** (vide Equação 7.6), são eles: **pav<sub>(n-1)</sub>** e **pav<sub>(n-2)</sub>**. Sendo assim, para o cálculo do posicionamento do defeito, referente à matriz **TAN1MAX** (ascendente) associam-se os valores **pav<sub>(n-2)</sub>** e para a matriz **TAN2MAX** (descendente) associam-se os valores **pav<sub>(n-1)</sub>**, originando as matrizes **P1MAX** e **P2MAX**, (Equações 7.11 e 7.12, respectivamente).

Os pontos associados a estes valores são assumidos como pontos de inflexão e assim representam a borda dos defeitos (LAI et al., 2009).

$$TAN1MAX = [tan1_j] \quad (7.9)$$

$$TAN2MAX = [tan2_j] \quad (7.10)$$

Onde:  $j = 1, \dots, 3$

$tan1_j =$  valores máximos da matriz **TAN1**

$tan2_j =$  valores máximos da matriz **TAN2**

$tan1_j > tan1_{j+1} > tan1_{j+2}$

$tan2_j > tan2_{j+1} > tan2_{j+2}$

$$P1MAX = \begin{bmatrix} pav_{(n-2)1} \\ pav_{(n-2)2} \\ pav_{(n-2)3} \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

$$P2MAX = \begin{bmatrix} pav_{(n-1)1} \\ pav_{(n-1)2} \\ pav_{(n-1)3} \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

De forma simplificada, para achar o posicionamento das bordas do defeito escolhe-se o menor valor da matriz **P1MAX** (onde se “inicia” o defeito) e o maior valor da matriz **P2MAX** (onde “termina” o defeito), e assim a diferença entre eles seria a dimensão do defeito. Entretanto, em se tratando de curvas referentes a ensaios experimentais, os ruídos podem interferir no resultado. Logo, tentando eliminar ainda mais os

ruídos, é preciso também levar em consideração o alinhamento entre os pontos da curva, já que pontos muito desalinhados podem ser tomados como espúrios.

Para isso, adotou-se o critério de que a diferença entre as tangentes consecutivas deve ser menor que a tangente de  $\pi/36$  (conforme Equações 7.13 e 7.14), caso não seja, o valor *pav* é eliminado e assim, finalmente, escolhe-se entre os valores restantes o menor valor da matriz P1MAX, nomeado *pav<sub>1min</sub>* e o maior valor da matriz P2MAX, nomeado *pav<sub>2max</sub>*.

$$\tan 1_j - \tan 1_{(j+1)} \leq \text{TAN} (\pi/36) \quad (7.13)$$

$$\tan 2_j - \tan 2_{(j+1)} \leq \text{TAN} (\pi/36) \quad (7.14)$$

Por fim, chega-se a uma simples subtração entre dois valores (posições) revela a extensão horizontal do defeito, conforme mostra a Equação 7.15.

$$S = pav_{2max} - pav_{1min} \quad (7.15)$$

Onde:

*S* = tamanho do defeito (cm)

*Pav<sub>1min</sub>* = posição do ponto de início do defeito

(cm)

*pav<sub>2max</sub>* = posição do ponto do final do defeito

(cm)

## 7.6 Resultados das medições dos defeitos

As Tabelas de 7.7 a 7.14 apresentam os resultados onde “Dimensões Reais” representam os valores padrões escolhidos previamente e “Dimensões Calculadas” representam os valores obtidos usando os procedimentos e as equações previamente apresentadas.

O erro foi calculado da seguinte forma:

$$\text{Erro} = [(\text{Dimensão Calculada} - \text{Dimensão Real}) \div (\text{Dimensão Real})] \times 100$$

As tabelas mostram que a maioria dos valores apresentou erros menores do que 15%, mas outros fugiram deste patamar. Por isso, algumas considerações devem ser discutidas.

**Tabela 7.7 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, CE1**

<i>Amostra</i>	<i>Defeito</i>	<i>Dimensão Real (cm)</i>	<i>Dimensão Calculada (cm)</i>	<i>Erro (%)</i>
<i>CE1</i>	<i>Madeira</i>	2,0	2,1	5,0%
		3,0	2,8	-6,7%
		4,0	3,9	-2,5%
	<i>Ar</i>	2,0	2,3	15,0%
		3,0	3,3	10,0%
		4,0	4,2	5,0%

**Tabela 7.8 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, CE2**

<i>Amostra</i>	<i>Defeito</i>	<i>Dimensão Real (cm)</i>	<i>Dimensão Calculada (cm)</i>	<i>Erro (%)</i>
<i>CE2</i>	<i>EPS</i>	1,0	1,4	<b>40,0%</b>
		2,0	2,1	5,0%
		3,0	3,0	0,0%
	<i>Cortiça</i>	4,0	4,0	0,0%
		2,0	2,2	10,0%
		3,0	3,2	6,7%
4,0	4,3	7,5%		

**Tabela 7.9 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, CC1**

<i>Amostra</i>	<i>Defeito</i>	<i>Dimensão Real (cm)</i>	<i>Dimensão Calculada (cm)</i>	<i>Erro (%)</i>
<i>CC1</i>	<i>Madeira</i>	2,0	3,1	<b>55,0%</b>
		3,0	3,7	<b>23,3%</b>
		4,0	5,0	<b>25,0%</b>
	<i>Ar</i>	2,0	2,3	15,0%
		3,0	3,1	3,3%
		4,0	4,5	12,5%

Tabela 7.10 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, CC2

<i>Amostra</i>	<i>Defeito</i>	<i>Dimensão Real (cm)</i>	<i>Dimensão Calculada (cm)</i>	<i>Erro (%)</i>
CC2	EPS	2,0	1,9	-5,0%
		3,0	2,7	-10,0%
		4,0	4,0	0,0%
	Cortiça	2,0	2,0	0,0%
		3,0	2,9	-3,3%
		4,0	4,1	2,5%

Tabela 7.11 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, GE1

<i>Amostra</i>	<i>Defeito</i>	<i>Dimensão Real (cm)</i>	<i>Dimensão Calculada (cm)</i>	<i>Erro (%)</i>
GE1	Madeira	0,5	1,5	<b>200,0%</b>
		1,0	2,4	<b>140,0%</b>
		2,0	2,1	5,0%
		3,0	3,3	10,0%
		4,0	4,0	0,0%
	Ar	1,0	2,2	<b>120,0%</b>
		2,0	2,2	10,0%
		3,0	3,4	13,3%
		4,0	4,1	2,5%

Tabela 7.12 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, GE2.

<i>Amostra</i>	<i>Defeito</i>	<i>Dimensão Real (cm)</i>	<i>Dimensão Calculada (cm)</i>	<i>Erro (%)</i>
GE2	EPS	1,0	1,2	<b>20,0%</b>
		2,0	1,7	-15,0%
		3,0	2,6	-13,3%
		4,0	4,0	0,0%
	Cortiça	1,0	1,4	<b>40,0%</b>
		2,0	1,9	-5,0%
		3,0	2,8	-6,7%
		4,0	3,8	-5,0%

Tabela 7.13 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, GC1.

<i>Amostra</i>	<i>Defeito</i>	<i>Dimensão Real (cm)</i>	<i>Dimensão Calculada (cm)</i>	<i>Erro (%)</i>
GC1	Madeira	1,0	1,2	20,0%
		2,0	2,1	5,0%
		3,0	2,9	-3,3%
		4,0	3,9	-2,5%
	Ar	0,5	1,2	140%
		1,0	1,5	50,0%
		2,0	2,2	10,0%
		3,0	3,3	10,0%
		4,0	4,1	2,5%

Tabela 7.14 – Dimensões reais e calculadas dos defeitos, GC2.

<i>Amostra</i>	<i>Defeito</i>	<i>Dimensão Real (cm)</i>	<i>Dimensão Calculada (cm)</i>	<i>Erro (%)</i>
GC2	EPS	1,0	1,0	0,0%
		2,0	1,9	-5,0%
		3,0	2,7	-10,0%
		4,0	3,5	-12,5%
	Cortiça	1,0	1,2	20,0%
		2,0	2,1	5,0%
		3,0	2,9	-3,3%
		4,0	4,1	2,5%

As medidas calculadas para defeitos de 2, 3 e 4 cm mostraram boa concordância com a medida real, em geral, exceto para os defeitos de madeira da amostra CC1 (Tabela 7.9). Como mencionado anteriormente, a água que vazou diluiu a matriz cimentícia acima dos defeitos de madeira o que causou descolamento do reforço. O PRFC descolou ao redor dos defeitos de madeira criando vazios (representados pelas áreas mais aquecidas na Figura 7.6) amentando a temperatura próximo às bordas dos defeitos. Este descolamento foi refletido como aumento de temperatura ao redor dos defeitos e consequentemente a curva dos gráficos também ficou alterada o que aumentou o valor calculado.

Outra importante consideração versa sobre o cálculo dos defeitos de dimensões de 0,5 e 1 cm, os quais não foram satisfatórios em nenhum dos casos, uma vez que apresentaram porcentagem alta de erro.

Sabe-se que quanto menor o defeito, menos acurada é a sua mensuração devido a precisão da câmera. Observa-se que os valores calculados são sempre maiores do que as medidas reais de 0,5 e 1 cm. Além disso, apesar do cuidado durante o procedimento de preparação das amostras e especialmente durante a colagem, bolhas de ar foram formadas especialmente ao redor dos pequenos defeitos e isso aumentou a medida do defeito. Observa-se que na Tabela 7.14, nota-se que o cálculo da dimensão para o defeito de EPS de 1 cm obteve boa precisão, segundo os cálculos. Porém, deve-se destacar que este material é frágil e pode ter perdido pequenos pedaços durante o manuseio. Isso significa que se o defeito passou a ser na realidade menor do que 1 cm, o cálculo aumentou este valor e assim, o valor de 1 cm calculado pode ser um aumento do valor real do defeito de EPS, como ocorreu com todos os outros defeitos de 0,5 e 1 cm.

## **7.7 Análises finais**

Os experimentos mostram que este método de cálculo do tamanho dos defeitos localizados abaixo do conjunto matriz/PRF em manta de reforço em concreto produz erros aceitáveis (menores que 15%) quando aplicados para defeitos de no mínimo 2 cm.

Apesar de não haver precisão no cálculo de defeitos menores do que 2 cm, os resultados são considerados satisfatórios uma vez que segundo as recomendações da CNR-DT 200 R1/2013, que definem critério de aceitação para defeitos de colagem de reforço em concreto, defeitos causados por descolamento ou falhas de colagem não podem ser maiores do que 25 mm de diâmetro.

Mesmo assim, estima-se que melhores resultados podem ser obtidos para defeitos menores de 2 cm de três formas: substituindo o equipamento por outro com melhor resolução, reduzindo a distância entre lente e objeto e ainda aumentando o tempo de aquecimento, uma vez que o tempo escolhido neste experimento foi de apenas 15 minutos de exposição solar.

Outro ponto que deve ser enfatizado se refere ao efeito da umidade na detecção dos defeitos por termografia infravermelha. Um defeito úmido requer uma grande quantidade de calor para mudar a temperatura devido ao alto calor específico da água. Logo, este método de medida mostrou-se confiável apenas quando aplicado a superfícies nas quais se sabe previamente que está completamente seca, ou seja, a superfície não deve possuir umidade superior à umidade ambiente.

Este experimento mostrou que é possível estimar a dimensão do dano quando utilizados diferentes tipos de material no reforço, sem levá-los em consideração no cálculo, uma vez que não importa a temperatura do defeito, mas sim o comportamento da elevação da curva do gráfico. Contudo, a elevação de temperatura do defeito também é um fator que deve ser avaliado, já que dele depende a visualização do dano. A temperatura do defeito pode se elevar de forma diferente para cada tipo de reforço, matriz, tempo de exposição solar e até mesmo tipo e dimensão de um defeito subsuperficial, pois estes materiais possuem características térmicas diferentes. Sendo assim, cabe-se avaliar se esses parâmetros podem influenciar significativamente na elevação da temperatura do dano, o que será estudado no capítulo a seguir.



## **CAPÍTULO 8 - TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PASSIVA NA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA TEMPERATURA DE DEFEITO SUBSUPERFICIAL ENTRE CONCRETO E PRF**

Nesta etapa experimental analisam-se alguns parâmetros que podem influenciar, isolados ou combinados, na detecção de defeito subsuperficial entre concreto e manta de PRF com a utilização da termografia infravermelha. Para atingir este objetivo é utilizada a Análise de Variância (ANOVA). Esta análise estatística considerou 5 fatores cujas variações foram analisadas duas a duas, enquanto os outros parâmetros permaneciam fixos. Os fatores estudados são: os diferentes tipos e dimensões de defeitos subsuperficiais (ar e madeira, cada uma com dimensões de 1x1cm, 2x2cm e 3x3 cm), diferentes tipos de mantas de PRF (carbono, vidro e basalto) e ainda, especificamente para a manta de Polímero Reforçado com Fibras de Basalto (PRFB), foram analisadas diferentes matrizes de colagem (epoxídica e cimentícia).

### **8.1 Introdução**

Considerando-se os princípios da termografia infravermelha, sabe-se que a inspeção de uma estrutura que possui problemas similares, mas contém diferentes materiais, fornece diferentes imagens infravermelhas (GRYS; VOKOROKOS; BOROWIK, 2014). Sendo assim, tomando como exemplo uma estrutura de concreto reforçada com manta de PRF, caso a termografia infravermelha fosse usada para a detecção de danos, é esperado que esta avaliação dependerá especialmente do tipo de compósito, do tipo da matriz de colagem e ainda do tipo e tamanho do defeito. Estes elementos apresentam características térmicas diferentes e por isso podem influenciar as temperaturas captadas pela câmera infravermelha.

Para se obter imagens infravermelhas nas quais os defeitos subsuperficiais apareçam o mais visível possível, uma premissa muito importante é que a alta condutividade térmica do conjunto PRF/matriz esteja aliada a uma baixa condutividade térmica dos defeitos. Além disso, quanto maior o defeito, sua definição na imagem infravermelha aumenta, já que a condutividade térmica do defeito diminui com o aumento da massa. (TAILLADE et al., 2009).

Naturalmente, não é sempre que a imagem infravermelha evidencia claramente o defeito, o que significa que as mais diversas

combinações de características térmicas podem ocorrer. Por exemplo, para diferentes tipos de defeitos subsuperficiais na interface concreto/PRF a imagem infravermelha pode evidenciar o defeito em um caso e não evidenciar em outro, mesmo que o restante das condições sejam idênticas (KLINKHACHORN et al., 2006) (DUMOULIN et al., 2010).

Os defeitos se tornam mais ou menos visíveis nos termogramas dependendo da diferença de temperatura em relação a área ílesa. Sendo assim, é possível comparar a resposta dos defeitos sob diferentes condições avaliando suas temperaturas no termograma. Entretanto, a comparação de diferentes temperaturas exige um exame detalhado de o que são valores significativamente diferentes ou não. Logo, para que sejam obtidos resultados confiáveis pode-se ter o auxílio da análise estatística (CORVAGLIA; LARGO, 2008).

Poucos artigos científicos foram encontrados tratando deste tipo de análise, tornando-se ainda mais raro quando considerado o Polímero Reforçado com Fibras de Basalto (PRFB). Uma das razões deve-se ao fato de o PRFB ainda ser um compósito em estudo no meio científico, especialmente em inspeções que adotam a termografia infravermelha como método não destrutivo (CARMISCIANO et al., 2011) (COLOMBO; VERGANI; BURMAN, 2012).

O objetivo principal desta etapa do estudo é investigar, por termografia infravermelha passiva (aquecimento solar), os defeitos subsuperficiais em amostras de concreto reforçadas por mantas de PRF para que se note a influência da temperatura do defeito na imagem infravermelha quando houver o uso de diferentes tipos de mantas, diferentes tempos de aquecimento solar, diferentes tipos e dimensões dos defeitos e ainda quando utilizadas diferentes matrizes de colagem, utilizando-se da análise estatística de variância (ANOVA).

### ***8.1.1 Análise estatística aplicada a termografia infravermelha.***

Em geral, não é sempre suficiente confiar na detecção de problemas na estrutura apenas pela variação de temperatura das imagens infravermelhas. Até mesmo uma superfície de concreto em boas condições tende a exibir um gradiente de temperatura dependendo da locação e orientação da fonte de calor usada, por exemplo, em termografia infravermelha ativa (WATASE, 2013). Sendo assim, para realizar uma análise qualitativa de dados provenientes de ensaios termográficos o uso da análise estatística pode ser uma ferramenta muito útil.

Akashi et al. (2006) realizaram uma análise estatística sobre a relação entre as características de variação da temperatura e danos inerentes do concreto a partir de uma base de dados histórica de inspeção. A partir disto, foi desenvolvido um sistema automático de classificação de danos que pode classificar a taxa de danos em três categorias: "Crítica" (fissuras causadas por delaminação atinge a superfície de concreto e é necessária atenção imediata), "Aviso" (fissura existe no interior do concreto em uma profundidade a partir de 2 cm abaixo de sua superfície e um monitoramento minucioso é recomendado) e "Indicação" (fissura no interior do concreto abaixo de 4 cm a partir de sua superfície e não exige intervenção). Os dados brutos de imagem infravermelha foram filtrados e classificados em três categorias que utilizam software para indicar e avaliar a gravidade de defeitos subsuperficiais em estruturas de concreto.

Em outro estudo, um teste de termografia infravermelha foi conduzido a fim de analisar a detecção de defeitos ocultos na interface PRFC/concreto, investigando a influência de dois parâmetros: tempo de aquecimento impulsivo (que foi o tempo utilizado para aquecer a amostra) e tempo de observação (que foi o tempo após a interrupção do aquecimento). Os autores selecionaram 4 períodos de tempo de aquecimento (30, 40, 50 e 60 segundos) e 6 níveis de tempo de observação (5, 7, 9, 15, 21 e 27 segundos). Eles usaram análise estatística de variância (ANOVA) para avaliar estes dois parâmetros e concluíram que o tempo de observação e o tempo de aquecimento não têm qualquer influência mútua na detecção de danos de subsuperfície em concreto armado reforçado por PRFC (GALIETTI et al., 2007).

### ***8.1.2 Análise de variância (ANOVA)***

A Análise de Variância (ANOVA) é o principal teste estatístico para se verificar a influência de um ou mais parâmetros na medida de uma certa propriedade ou característica de um processo, de modo a conseguir comprovar com uma certa confiabilidade a influência de um ou mais fatores na propriedade de interesse.

É importante observar que este tipo de análise é paramétrica, portanto, pressupõe que as amostras possuem o mesmo tamanho e ainda possuem comportamento normal.

Existem vários modelos estatísticos de projetos de experimentos. Uma delas é a análise *Two-way* que compreende a organização de dados para que se avalie simultaneamente a influência de dois parâmetros que

variam em um dado experimento. Considerando-se ainda a existência ou não da inter-relação entre estes dois parâmetros utiliza-se o experimento fatorial de dois fatores que pode ser descrito conforme a Equação 8.1.

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (0.1)$$

Onde:

$i$ : indica o nível do fator A (1,2,...,a)

$j$ : indica o nível do fator B (1,2,...,b)

$k$ : indica a  $k$ -ésima observação na célula de tratamento  $i, j$  (1,2,...,n)

$\mu$ : efeito médio global

$\alpha_i$ : efeito do  $i$ -ésimo nível do fator A

$\beta_j$ : efeito do  $j$ -ésimo nível do fator B.

$(\alpha\beta)_{ij}$ : efeito da interação entre o  $i$ -ésimo nível do fator A e  $j$ -ésimo nível do fator B.

$\varepsilon_{ijk}$ : componente do erro aleatório

Um fator de um experimento é uma variável independente controlada. Então:

- Fator A: Variável A cujos níveis são definidos pelo pesquisador.

- Fator B: Variável B cujos níveis são definidos pelo pesquisador.

Supõe-se ainda que as observações da variável de resposta são independentes, e normalmente distribuída com uma média que pode depender dos níveis dos Fatores A e B, mas com uma variância constante.

A soma total dos quadrados (SQ) de  $a \times b$  fatorial realizado com um número igual de observações por combinação de tratamento é apresentado como segue (Equação 8.2):

$$SQ(total) = SQ(A) + SQ(B) + SQ(AB) + SQE \quad (0.2)$$

$SQ(total)$ : total soma dos quadrados

$SQ(A)$ : soma dos quadrados, fator A

$SQ(B)$ : soma dos quadrados, fator B

$SQ(AB)$ : soma dos quadrados, interação dos fatores A e B (AB representa a interação entre A e B)

$SQ(AB) = SQ(trat.) - SQ(A) - SQ(B)$

Strat: soma dos quadrados entre os grupos de tratamento.

$SQE$ : soma dos quadrados dentro dos grupos de tratamento.

$$SQE = SQ(A) + SQ(B) + SQ(AB) - SQ(total)$$

A tabela ANOVA resultante para o experimento de fatores  $a \times b$  é mostrada na Tabela 8.1.

Para se conduzir a análise estatística, este método define 3 testes de hipótese apresentados a seguir:

1) Teste para o efeito do Fator A:

$H_0 : \alpha_i = 0$  para todo  $i$  (nenhum efeito principal do fator A)

$H_a : \text{no mínimo um } \alpha_i \neq 0$

2) Teste para o efeito do Fator B:

$H_0 : \beta_i = 0$  para todo  $i$  (nenhum efeito principal do fator B)

$H_b : \text{no mínimo um } \beta_i \neq 0$

3) Teste para interação de efeitos dos Fatores A e B:

$H_0 : (\alpha\beta)_i = 0$  para todo  $i$  (nenhuma interação entre os fatores A e B)

$H_b : \text{no mínimo um } (\alpha\beta)_i \neq 0$

**Tabela 0.1 – Tabela ANOVA para experimento de dois fatores  $a \times b$**

Fonte	$SQ$	$gl$	Média Quadrática ( $MQ$ )	$F$
Fator A	$SQ(A)$	$(a-1)$	$SQ(A)/(a-1) = MQ(A)$	$MQ(A)/MQ(E) = F(A)$
Fator B	$SQ(B)$	$(b-1)$	$SQ(B)/(b-1) = MQ(B)$	$MQ(B)/MQ(E) = F(B)$
Inter.	$SQ(AB)$	$(a-1)(b-1)$	$SQ(AB)/((a-1)(b-1)) = MQ(AB)$	$MQ(AB)/MQ(E) = F(AB)$
Erro	$SQE$	$(N-ab)$	$SQE/(N-ab) = MQ(E)$	
Total	$SQ(tot.)$	$(N-1)$		

$gl$ : graus de liberdade

N: número total de observações

Nesta etapa experimental, para a análise estatística, com o programa *FLIR Quick Report* foram tomadas medidas de temperatura dos defeitos captadas a partir do perfil de temperaturas que os cruza, já que este conjunto de dados apresenta um comportamento normal.

## 8.2 Materiais e características das amostras

Para realizar este experimento, foram moldadas 3 vigas de concreto reforçadas em uma das faces com mantas de PRFC, PRFV e PRFB coladas por resina epoxídica e ainda uma placa em concreto reforçada por PRFB colada por matriz cimentícia. Cada viga possui seção transversal de 10 x 10 cm e comprimento de 100 cm (Figura 8.2) enquanto a placa de concreto possui espessura de 3,8 cm e medidas de 40 x 22 cm (Figura 8.3). As matrizes de colagem bem como as mantas de PRFC e PRFV (Figura 7.1) possuem as mesmas características daquelas utilizadas no experimento do capítulo 7. A manta de PRFB está apresentada na Figura 8.1.



**Figura 0.1 – Manta unidirecional de PRFB**

Foram incluídos defeitos artificiais de dois tipos (ar e madeira) em formato quadrado com as seguintes dimensões: 3 x 3 cm, 2 x 2 cm, 1 x 1 cm, todos com 0,5 cm de espessura e posicionados abaixo do conjunto PRF/Matriz, representando as falhas de colagem com diferentes propriedades térmicas.

Semelhante ao experimento do capítulo 7, para inserir os defeitos artificiais, primeiramente foi moldada uma camada de argamassa 5mm de espessura acima da superfície das amostras. No caso das vigas, a camada de argamassa foi moldada na superfície cobrindo uma área de 30 x 10 cm em cada extremidade. Na placa de concreto, a argamassa cobriu toda a área de 40 x 22 cm, conforme mostra as Figuras 8.2 e 8.3, respectivamente.

Os defeitos artificiais em madeira foram inseridos na argamassa fresca, deixando apenas de suas faces a mostra e no mesmo nível da

argamassa. Este procedimento certifica que não há possibilidade de identificar a presença de defeitos na amostra reforçada por uma simples inspeção visual.

Com o objetivo de criar os defeitos de ar, pedaços de borracha com 0,5 cm de espessura (seguindo as dimensões propostas) foram inseridos na argamassa fresca da mesma maneira executada para os defeitos em madeira. Após a cura da argamassa, os pedaços de borracha foram removidos sendo deixada apenas as cavidades. Depois, cada cavidade foi coberta com fita adesiva transparente e suas bordas seladas com resina epóxi.

As mantas de PRFC, PRFV e PRFB nas vigas foram coladas com resina epóxi. Na placa de concreto, foi usada manta de PRFB colada com matriz cimentícia.

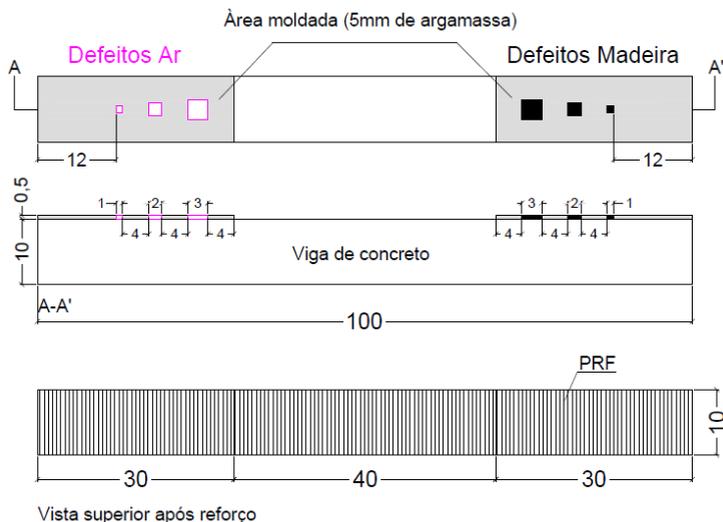
No total, foram confeccionadas 4 amostras e cada uma foi nomeada de acordo com o tipo de reforço (PRFC, PRFV e PRFB) e tipo de matriz (epoxídica ou cimentícia), tal como apresentado na Tabela 8.2.

Maiores detalhes sobre as amostras, bem como posicionamento dos defeitos artificiais, são apresentados nas Figuras 8.1, 8.2 e 8.3.

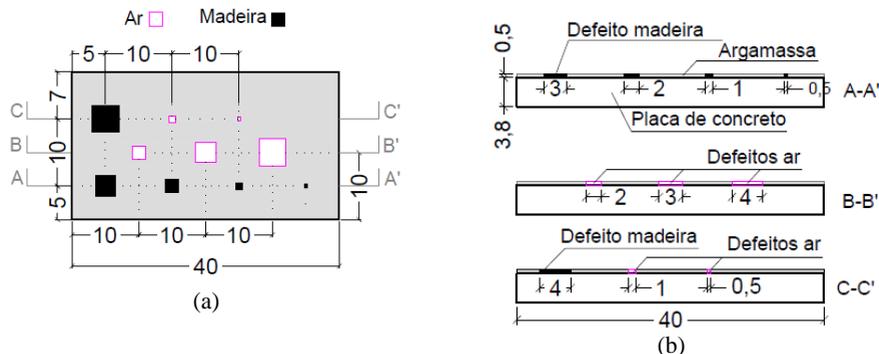
Salienta-se que, apesar de na amostra BC haver defeitos artificiais de 4 e 0,5 cm, estes não foram considerados, uma vez que as dimensões comparadas foram apenas as de 3, 2 e 1 cm.

**Tabela 0.2 – Códigos das amostras de acordo com sua composição.**

<i>Código das amostras</i>	<i>Tipo de compósito</i>	<i>Tipo de matriz</i>	<i>Tipo de amostra</i>
CE	Carbono	Epoxídica	Viga
GE	Vidro	Epoxídica	Viga
BE	Basalto	Epoxídica	Viga
BC	Basalto	Cimentícia	Placa



**Figura 0.2 – Vista superior e corte AA' da viga antes do reforço e vista superior após o reforço (viga CE, GE ou BE). Dimensões em cm.**



**Figura 0.3 – Amostra BC: (a) vista superior, (b) cortes AA', BB' e CC' da placa de concreto antes da colagem da manta de PRFB (dimensões em cm).**

As dimensões dos defeitos artificiais foram escolhidas para análise baseando-se nas recomendações da CNR-DT 200 R1/2013, que definem critério de aceitação para defeitos de colagem de reforço em concreto. De acordo com esta norma, o critério de aceitação para defeitos causados por descolamento ou falhas de colagem não podem ser maiores do que 25 mm de diâmetro e por isso as dimensões escolhidas estão entre 1 e 3 cm.

### 8.3 Aquisição de dados

Primeiramente, todas as amostras foram dispostas em uma câmara climática a 20° C e 60% de umidade do ar até atingir o equilíbrio térmico com este ambiente. Este procedimento foi adotado com o objetivo de aumentar o gradiente térmico quando as amostras fossem submetidas às condições ambientais. Após removidas da câmara climática, as amostras foram expostas ao ar livre diretamente sob a luz solar durante um período de tempo. Os períodos de tempo e as condições climáticas do ensaio estão expostos na Tabela 8.3.

Imediatamente, após retornar da exposição solar, as imagens termográficas foram capturadas. As amostras CE, GE e BE foram testadas em conjunto, enquanto a amostra BC foi testada separadamente. Após cada teste, as amostras eram novamente dispostas na câmara climática até atingirem o equilíbrio térmico, para então serem novamente testadas em exposição solar de tempo diferente.

**Tabela 0.3 – Dados meteorológicos no momento do ensaio.**

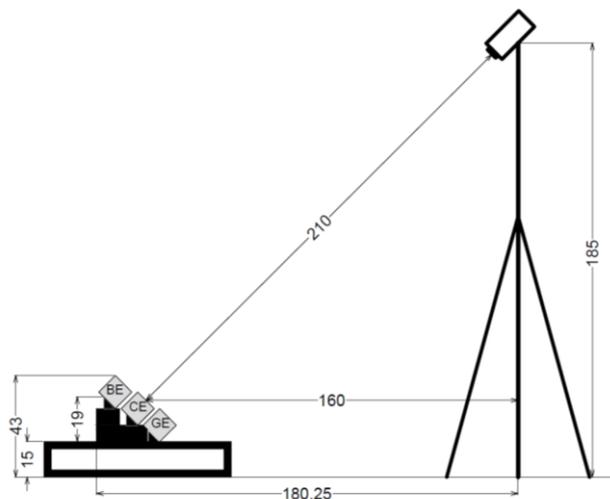
<i>Amostra</i>	<i>Tempo de exposição solar</i>	<i>Temp. Ext. (°C)</i>	<i>Umidade Ext. (%)</i>
BCE, BGE, BCE	5 min	27,8	31
BC	5 min	28,7	30
BCE, BGE, BCE	15 min	28,0	29
BC	15 min	29,1	28
BC	8 min	29,8	28
BCE, BGE, BCE	8 min	28,0	37

### 8.4 Instrumentação

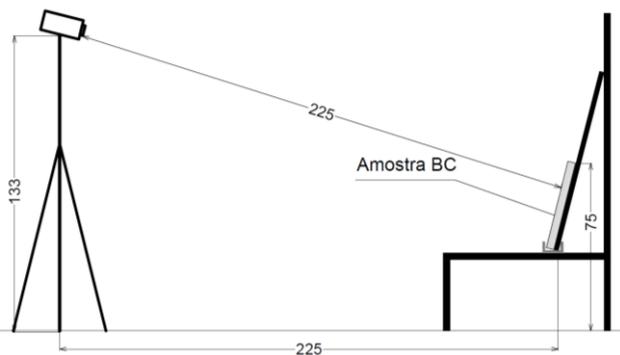
A câmera infravermelha utilizada para este experimento é a mesma do experimento do Capítulo 7, apresentada na Figura 7.3 e com características já descritas na Tabela 7.2.

A câmera foi disposta em um tripé com 1,85m de altura 2,10 metros de distância das vigas (amostras CE, GE e BE) que estavam posicionadas em um *pallet* de madeira. A amostra BC ficou apoiada em um painel de madeira apoiado em estrutura metálica e o tripé estava a

1,33m de altura e 2,25m de distância da amostra. Em ambas as posições, certificou-se que a câmera infravermelha estava com vista perpendicular às superfícies a serem inspecionadas (Detalhes apresentados nas Figuras 8.4 e 8.5, respectivamente).



**Figura 0.4 – Posição da câmera infravermelha em relação às vigas BE, CE e GE (dimensões em cm).**



**Figura 0.5 – Posição da câmera infravermelha em relação a amostra BC (dimensões em cm).**

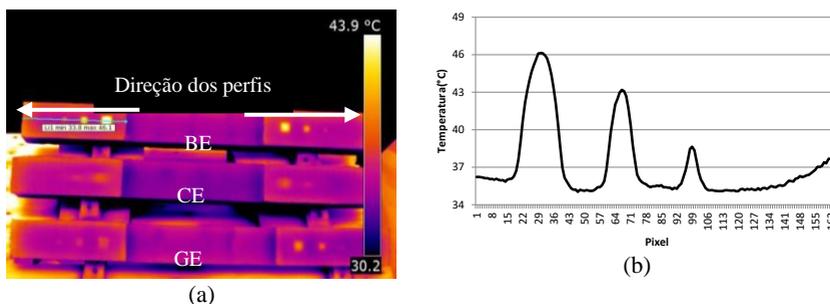
## 8.5 Resultados e Análises

### 8.5.1 Perfil de temperatura dos defeitos

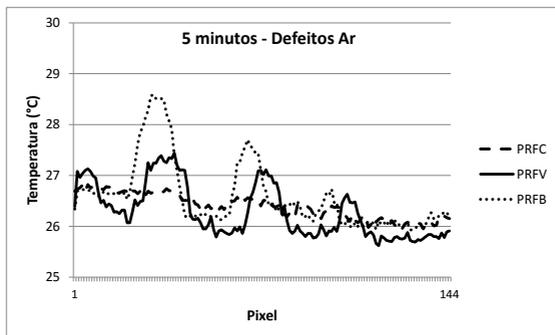
Iniciando-se a comparação dos dados experimentais obtidos, perfis de temperatura foram extraídos por meio do software *FLIR Quick Report* ao longo das linhas de interesse as quais cruzavam o centro dos defeitos no termograma (Figura 8.6(a)). A partir destes perfis, gráficos de temperatura foram obtidos utilizando-se o programa *MSEXcel* (Figura 9.6(b)).

Logo, uma análise prévia é inicialmente realizada a partir dos termogramas e o programa *FLIR Quick Report* foi utilizado também para reduzir a variação de temperatura e assim proporcionar um melhor discernimento dos defeitos artificiais inseridos na interface concreto/PRF.

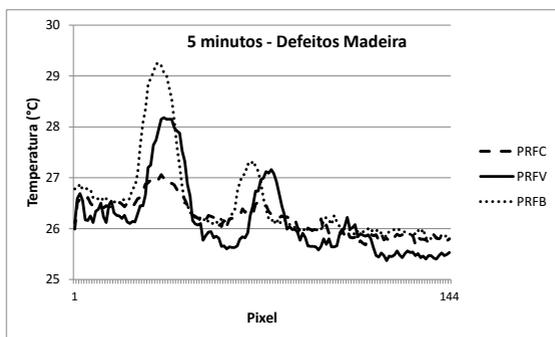
Os picos de temperatura nas curvas mostram a presença dos defeitos, e aparecem sempre no sentido do maior para o menor defeito: 3 x 3 cm, 2 x 2 cm e 1 x 1 cm, respectivamente, para as variadas combinações de reforços (vide gráficos das Figuras 8.7 a 8.17). É possível ler a temperatura de cada pixel ao longo de uma linha escolhida.



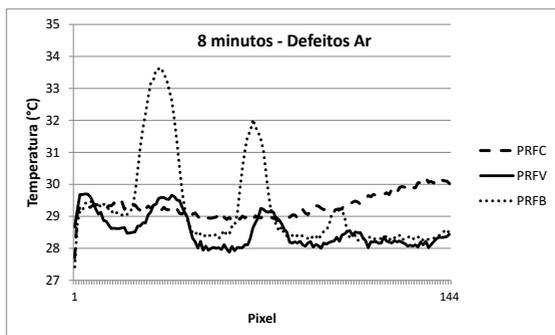
**Figura 0.6 – (a) Imagem infravermelha das vigas BE, CE e GE após 15 minutos de aquecimento solar apontando a direção tomada para as linhas do perfil de temperatura (do maior para o menor defeito). (b) Gráfico do perfil de temperatura sobre os 3 defeitos de ar (defeitos à esquerda da viga BE).**



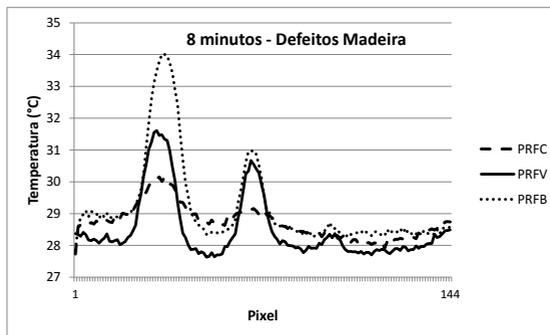
**Figura 0.7 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 5 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.**



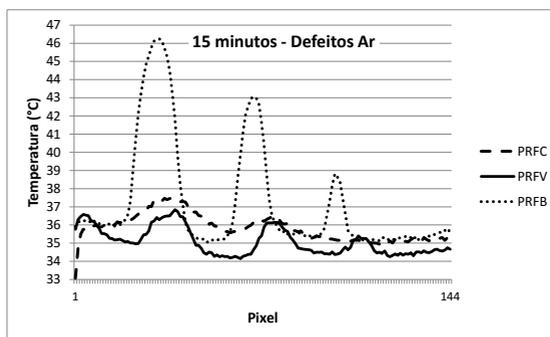
**Figura 0.8 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de madeira após 5 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE**



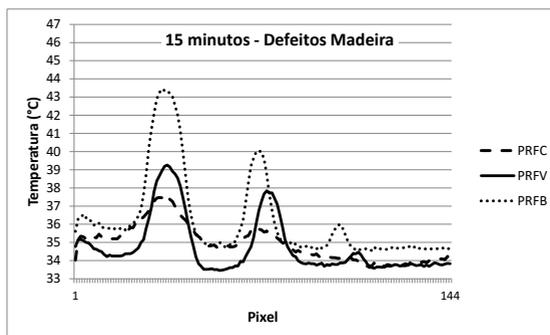
**Figura 0.9 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 8 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.**



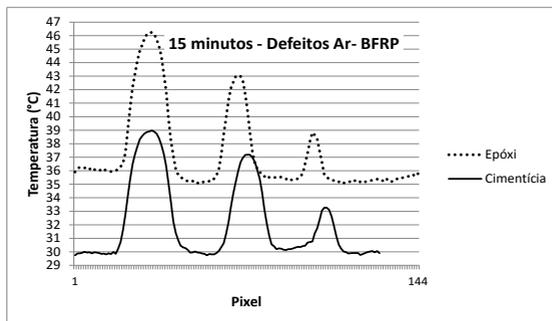
**Figura 0.10** – Perfil de temperatura sobre os defeitos de madeira após 8 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.



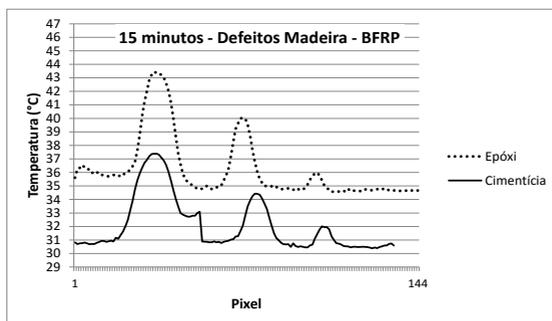
**Figura 0.11** – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.



**Figura 0.12** – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.



**Figura 0.13 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as amostras BE e BC.**



**Figura 0.14 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de madeira após 15 minutos de aquecimento solar para as BE e BC**

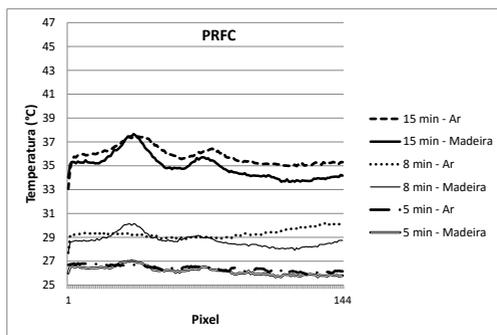
Os gráficos obtidos apresentam algumas características em comum. Por exemplo, os picos de temperatura dos defeitos sob a manta de PRFB (independentemente da matriz de colagem) são sempre maiores do que para os outros tipos de PRF, cujas curvas são mais suaves, o que indica que o PRFB possui características térmicas mais favoráveis a inspeção termográfica. A segunda melhor visualização considerando os picos das curvas pode ser atribuído ao PRFV.

Entretanto, as temperaturas nos defeitos sob a manta de PRFC não se destacam muito das temperaturas das áreas não defeituosas.

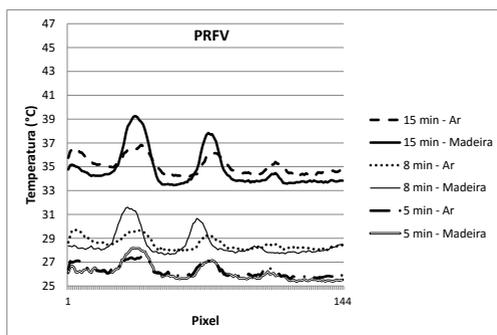
Percebeu-se que sempre que o tempo de exposição solar foi aumentado, os ruídos das curvas diminuíram consideravelmente, já que a curva se tornou mais suave e contínua.

Os gráficos das Figuras 8.13 e 8.14 mostram a temperatura considerando dois tipos de matriz para a manta de PRFB. Ambas as curvas são suaves com grandes picos, porém para o PRFB combinado

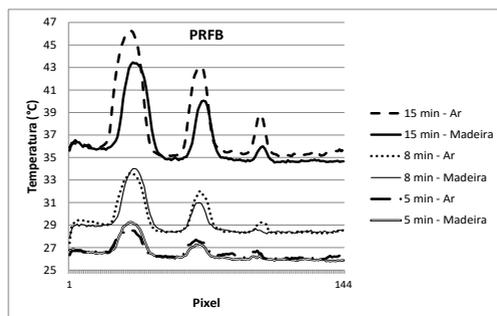
com a resina epóxi há uma maior absorção de calor do que para a combinação deste mesmo compósito com a matriz cimentícia.



**Figura 0.15 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.**



**Figura 0.16 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.**



**Figura 0.17 – Perfil de temperatura sobre os defeitos de ar após 15 minutos de aquecimento solar para as vigas CE, GE e BE.**

Nas Figuras de 8.6 a 8.14 optou-se por adotar uma mesma escala apenas quando houvesse um mesmo tempo de aquecimento. A intenção foi enfatizar a visualização dos defeitos. Porém, nas escalas das Figuras de 8.15 a 8.17 é possível uma melhor comparação do tempo de aquecimento, tipo de defeito e tipo de reforço para todos os casos.

Considerando-se o mesmo tipo de reforço, mas comparando os tempos de aquecimento solar e o tipo de defeito (Figuras de 8.15 a 8.17), apresentam-se os seguintes aspectos:

- Os defeitos em madeira são mais evidentes nos perfis já que seus picos nos gráficos são maiores do que para os defeitos de ar (Figuras 8.15 e 8.16). Contudo, sabe-se que a condutividade térmica da madeira é cerca de 4 vezes maior do que a condutividade térmica do ar. Logo, seria esperado que os defeitos de ar aparecessem de forma mais evidente nos termogramas, o que não ocorre. Neste caso, a inércia térmica dos materiais também deve ser considerada. Como a massa do defeito de madeira é muito maior do que a massa dos defeitos de ar, interrompido o aquecimento solar, os defeitos de madeira ainda retêm o calor enquanto o defeito de ar não possui a mesma capacidade.

- Apenas para a amostra BE, após 15 minutos de aquecimento solar (vide Figura 8.17, duas primeiras linhas acima), os picos para defeitos de ar aparecem maiores do que para os defeitos de madeira. Isto significa que 15 minutos de aquecimento solar sobre o PRFB são suficientes para aquecer a bolsa de ar e manter sua temperatura, isto é, há energia suficiente para manter a temperatura durante ao menos 1 minuto (que é o tempo necessário para mover as amostras de fora para dentro do laboratório e capturar a primeira imagem termográfica). Portanto, nesta situação, o defeito de ar torna-se mais evidente já que o PRFB permite maior transferência de calor através da manta do que o PRFC e o PRFV.

É importante, entretanto, notar que esta análise baseada em perfis de temperatura pode não mostrar objetivamente se a visualização dos defeitos é um efeito isolado ou combinado dos parâmetros impostos (tempo de aquecimento, tipo de reforço, dimensão e tipo de defeito, tipo de matriz de colagem). Logo, para se obter este discernimento, a análise estatística de variância (ANOVA) pode ser utilizada.

### ***8.5.2 Análise de Variância (ANOVA)***

A técnica estatística da ANOVA é utilizada para avaliar o nível de variação e sua significância para vários parâmetros de um estudo por comparação de diferentes conjuntos de dados.

Neste experimento, algumas comparações foram realizadas utilizando-se dois fatores por vez conforme esclarecem as Tabelas 8.4 a 8.7. Cinco fatores com possível influência no resultado foram convenientemente nomeados por A, B, C, D, E os quais correspondem respectivamente ao: tipo de reforço, tempo de aquecimento solar, tipo de matriz, tipo do material do defeito e tamanho do defeito.

Salienta-se que os dados foram previamente submetidos a teste de normalidade pelo método Komolgorov-Smirnov e também ao teste de espúrios. Quando um ponto espúrio era detectado, este era substituído pela média dos outros valores da amostra.

Considerou-se que a distribuição de temperaturas próximas ao centro de cada defeito segundo o perfil de temperatura obtido pelo programa (vide Figura 8.6) obedecem a um comportamento de distribuição normal, uma vez que se não houvesse influências do meio ambiente, dissipações irregulares de calor e o aquecimento fosse perfeitamente uniforme o defeito teria temperaturas constantes ao longo de toda sua área. Para explicar o uso da distribuição normal neste caso pode-se fazer um paralelo com a distribuição normal dos valores de resistência à compressão de um grupo de corpos de prova de concreto. Observa-se que se as condições de moldagem, de cura, de materiais e de ensaio fossem perfeitas, todos os corpos de prova teriam valores de resistência à compressão idênticos, porém na prática diferem um pouco segundo um desvio padrão e assim se encaixam na distribuição normal. Do mesmo modo, as variações de temperatura próximas ao defeito também obedecem a um comportamento normal.

Baseando-se neste fato, foram então tomados 3 valores de temperaturas contidos na curva que representa o defeito (elevações do gráfico), que foram utilizadas na análise. Os valores de temperatura adotados eram mais próximos ao centro do defeito, já que nestas faixas existe menor ruído, ou seja, possibilidade menor de pontos espúrios. Obtendo-se estas temperaturas, foram feitos os cálculos estatísticos, conforme apresentado no subitem 8.1.2, para cada situação.

A partir dos cálculos, foram testadas as hipóteses. Quando a hipótese nula é aceita, significa que não há diferença significativa observada entre os conjuntos de dados (temperaturas) comparados. A

hipótese nula significa que os resultados de diferentes conjuntos de dados pertencem a mesma população estatística e isso indica que o fator analisado não influencia nos dados.

Foi adotado 95% do nível de confiança ( $\alpha = 0.05$ ) para as comparações.

**Tabela 0.4 – Análise dos parâmetros: reforço (fator A) vs. tempo de aquecimento solar (fator B)**

<i>Matriz</i>	<i>Defeito</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Reforço (A)</i>	<i>Tempo de aquecimento solar (B)</i>
Resina Epóxi	Madeira	3 cm	PRFC x PRFV	8 min x 5 min
				15 min x 8 min
				15 min x 5 min
Resina Epóxi	Madeira	3 cm	PRFC x PRFB	8 min x 5 min
				15 min x 8 min
				15 min x 5 min
Resina Epóxi	Madeira	3 cm	PRFV x PRFB	8 min x 5 min
				15 min x 8 min
				15 min x 5 min

**Tabela 0.5 – Análise dos parâmetros: matriz (fator C) vs. tempo de aquecimento solar (fator B)**

<i>Matriz (C)</i>	<i>Defeito</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Reforço</i>	<i>Tempo de aquecimento solar (B)</i>
Epóxi x Cimentícia	Madeira	3 cm	PRFB	8 min x 5 min
				15 min x 8 min
				15 min x 5 min

**Tabela 0.6 – Análise dos parâmetros: defeito (fator D) vs. tempo de aquecimento solar (fator B)**

<i>Matriz</i>	<i>Defeito (D)</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Reforço</i>	<i>Tempo de aquecimento solar (B)</i>
Resina Epóxi	Ar x Madeira	3 cm	PRFV	8 min x 5 min
				15 min x 8 min
				15 min x 5 min
Resina Epóxi	Ar x Madeira	3 cm	PRFB	8 min x 5 min
				15 min x 8 min
				15 min x 5 min

**Tabela 0.7 – Análise dos parâmetros: dimensão (fator E) vs. Reforço (B)**

<i>Matriz</i>	<i>Defeito</i>	<i>Dimensão (E)</i>	<i>Reforço (B)</i>	<i>Tempo de aquecimento solar</i>
Resina Epóxi	Ar	3 cm x 2 cm	PRFV x PRFB	15 min
		3 cm x 1 cm		
		2 cm x 1 cm		
Resina Epóxi	Madeira	3 cm x 2 cm	PRFV x PRFB	15 min
		3 cm x 1 cm		
		2 cm x 1 cm		

Na sequência, serão apresentados dois a dois quais os parâmetros influenciam a temperatura dos defeitos subsuperficiais na termografia infravermelha.

#### 8.5.2.1 Tipo de reforço x Tempo de aquecimento solar

Na primeira comparação ANOVA, o defeito de madeira de 3 x 3 cm e manta colada com resina epóxi foi considerado como parâmetro fixo, de acordo com o que mostra a Tabela 8.4. Nesta etapa, analisa-se a influência de 2 parâmetros na temperatura do defeito subsuperficial: diferentes tipos de reforços (fator A) e diferentes tempos de aquecimento solar (fator B). Os resultados obtidos são apresentados pela tabela ANOVA (Tabela 8.8).

Nas tabelas que apresentam os resultados, “sim” significa que o parâmetro possui influência significativa na temperatura detectada pela termografia infravermelha enquanto “não” significa que o parâmetro não influencia em tal temperatura.

**Tabela 0.8: Resultados da comparação de tipo de reforço (fator A) e o tempo de aquecimento solar (fator B)**

<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Parâmetros de influência</i>		
<i>Reforço</i>	<i>Tempo de aquecimento solar</i>	<i>Tempo de aquecimento solar</i>	<i>Reforço</i>	<i>Interação</i>
PRFC x PRFV	8 min x 5 min	Sim	<b>Sim</b>	Não
	15 min x 8 min	Sim	Não	Não
	15 min x 5 min	Sim	Não	Não
PRFC x PRFB	8 min x 5 min	Sim	Sim	Não
	15 min x 8 min	Sim	Sim	Não
	15 min x 5 min	Sim	Sim	Não
PRFV x PRFB	8 min x 5 min	Sim	Não	Não
	15 min x 8 min	Sim	Não	Não
	15 min x 5 min	Sim	Não	Não

Os resultados mostram que o tempo de aquecimento solar possui influência isolada (independentemente do PRF utilizado) na temperatura do defeito para todos os testes. Por outro lado, a interação entre os fatores A e B não possui influência para nenhum caso.

Caso se considere apenas o reforço, a comparação entre PRFC x PRFB indica que o tipo de reforço possui uma influência isolada na mudança de temperatura do defeito, já comparando PRFV x PRFB o tipo de reforço não influenciará esta temperatura.

Entretanto, considerando a comparação de aquecimento solar de 8 min x 5 min (apenas 3 minutos de diferença no aquecimento) e comparando os reforços PRFC x PRFV, o tipo de reforço possui uma influência isolada, mas isto não prevalece conforme a diferença de tempo aumenta, isto é, para as comparações de 15 min x 8 min (7 minutos de diferença) e 15min x 5min (10 minutos de diferença). Logo, quando o tempo de aquecimento solar aumenta, a influência isolada entre os reforços PRFC x PRFV desaparece. Isto significa que comparando períodos de aquecimento de maior diferença, a influência do aumento de temperatura no defeito se deve apenas ao tempo de aquecimento solar e o reforço passa a não exercer efeito significativo. Pode-se inferir que entre o PRFC x PRFV o ganho de calor após 15 min de aquecimento solar aumenta a temperatura destas mantas de tal forma que as características térmicas passam a ser inexpressivas na temperatura do defeito.

#### *8.5.2.2 Tipo de matriz x Tempo de aquecimento solar*

Nesta etapa, a comparação considera como parâmetro fixo o defeito de madeira de dimensão 3 x 3 cm e a manta de PRFB como reforço, de acordo com o descrito na Tabela 9.5.

A Tabela 8.9 representa uma tabela ANOVA que mostra quais parâmetros possuem ou não influência na temperatura no centro do defeito subsuperficial, considerando diferentes tipos de matriz (fator C) e diferentes tempos de aquecimento solar (fator B).

Neste caso, a influência isolada do parâmetro “tempo de aquecimento solar” é novamente observado, tal como esperado.

A influência isolada da matriz pode ser notada apenas quando o tempo de aquecimento é entre 8 e 5 minutos. Aumentando a diferença entre os tempos de aquecimento solar, (15min x 8min e 15min x 5min) a temperatura do defeito não é afetada pelo tipo de matriz utilizada na

colagem. Isto significa que comparando períodos de aquecimento de maior diferença, a influência do aumento de temperatura no defeito se deve apenas ao tempo de aquecimento solar e a matriz passa a não exercer efeito significativo isolado. Pode-se inferir que entre a matriz cimentícia e a epoxídica o ganho de calor após 15 min de aquecimento solar aumenta a temperatura da superfície da amostra de tal forma que as características térmicas das matrizes passam a ser inexpressivas de forma isolada na temperatura do defeito de madeira de dimensão 3 x 3 cm.

**Tabela 0.9 – Resultado da tabela ANOVA comparando o tipo de matriz (fator C) e o tempo de aquecimento solar (fator B)**

<i>Fator C</i>		<i>Fator B</i>	<i>Parâmetros de influência</i>		
<i>Reforço</i>	<i>Matriz</i>	<i>Tempo aquecimento solar</i>	<i>Tempo aquecim. solar</i>	<i>Matriz</i>	<i>Inter.</i>
PRFB	Epóxi x Cimentícia	8 min x 5 min	Sim	Sim	Não
		15 min x 8 min	Sim	Não	Sim
		15 min x 5 min	Sim	Não	Sim

Porém, considerando agora a interação dos fatores C e B a situação é inversa: quando a diferença entre os tempos aumenta a interação se torna significativa, concluindo-se que o tipo de matriz não exerce efeito isolado no aumento da temperatura do defeito, mas sim associado a tempos de aquecimento maiores. Portanto é a matriz de colagem um fator importante a ser considerado na análise termográfica de defeitos subsuperficiais entre concreto e PRFB.

#### 8.5.2.3 Tipo de defeito x Tempo de aquecimento solar

Esta comparação considera fixo o defeito de 3 x3 cm e resina epóxi como matriz, de acordo com o descrito na Tabela 8.6.

A Tabela 8.10 apresenta os resultados que mostram a influência da temperatura no centro do defeito considerando diferentes tipos de defeito (fator D) e diferentes tempos de aquecimento solar (fator B).

Observa-se que, apenas o PRFV e o PRFB são considerados uma vez que não foi possível visualizar os defeitos de ar quando o PRFC foi utilizado como reforço e a amostra CE foi aquecida durante 8 e 5 minutos.

**Tabela 0.10 – Resultado da tabela ANOVA comparando o tipo de defeito (fator D) e o tempo de aquecimento (fator B)**

<i>Fator D</i>		<i>Fator B</i>	<i>Parâmetros de influência</i>		
<i>Reforço</i>	<i>Defeito</i>	<i>Tempo aquecimento solar</i>	<i>Tempo aquecim. solar</i>	<i>Defeito</i>	<i>Inter.</i>
PRFV	Ar x Madeira	8 min x 5 min	Sim	<b>Sim</b>	Não
		15 min x 8 min	Sim	<b>Sim</b>	Não
		15 min x 5 min	Sim	Não	Não
PRFB	Ar x Madeira	8 min x 5 min	Sim	Não	Não
		15 min x 8 min	Sim	Não	Não
		15 min x 5 min	Sim	Não	Não

A Tabela 8.10 mostra que o parâmetro “tipo de defeito” (fator D) não possui influência isolada significativa na temperatura central do defeito quando utilizado o PRFB.

Contudo, utilizando-se o PRFV como reforço, este parâmetro passa a ser significativo quando a diferença entre os tempos de aquecimento solar é de 3 minutos (8 min x 5 min) e 7 minutos (15 min x 8 min) mas quando a diferença aumenta para 10 minutos (15 min x 5 min), a influência passa a não existir mais. Isto significa que para o período de aquecimento de maior diferença, a influência do aumento de temperatura no defeito se deve apenas ao tempo de aquecimento solar e o tipo de defeito passa a não exercer efeito significativo. Pode-se inferir que entre os defeitos de ar e madeira o ganho de calor após 15 min de aquecimento solar aumenta a temperatura da superfície da amostra de tal forma que as características térmicas dos defeitos passam exercer influência na temperatura do defeito.

#### 8.5.2.4 Tipo de reforço x Dimensão do defeito

Finalmente, uma última comparação considera como parâmetro fixo que a amostra foi aquecida pelo sol durante 15 minutos e teve como matriz a resina epóxi, tal como mostra a Tabela 8.7.

A Tabela 8.11 apresenta a tabela ANOVA, considerando diferentes tipos de reforços (fator A) e diferentes dimensões de defeitos (fator E).

Para o reforço de PRFC não foi possível visualizar os defeitos de ar e madeira de dimensão 1 x 1 cm, por isso a comparação foi efetuada apenas para os defeitos com dimensões 3 x 3 cm e 2 x 2 cm.

Os resultados mostram que não há diferença significativa quando considerada a interação entre os fatores A e E, mas a influência isolada do tipo de reforço é observada para todos os casos.

**Tabela 0.11 – Resultado da tabela ANOVA comparando o tipo de reforço (fator A) e o tipo de defeito (fator E)**

<i>Defeito</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator E</i>	<i>Parâmetros de influência</i>		
	<i>Reforço</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Reforço</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Inter.</i>
Ar	PRFV x PRFB	3 cm x 2 cm	Sim	Não	Não
		3 cm x 1 cm	Sim	<b>Sim</b>	Não
		2 cm x 1 cm	Sim	Não	Não
Ar	PRFC x PRFV	3 cm x 2 cm	Sim	Não	Não
		-	-	-	-
		-	-	-	-
Ar	PRFC x PRFB	3 cm x 2 cm	Sim	Não	Não
		-	-	-	-
		-	-	-	-
Madeira	PRFV x PRFB	3 cm x 2 cm	Sim	Não	Não
		3 cm x 1 cm	Sim	<b>Sim</b>	Não
		2 cm x 1 cm	Sim	<b>Sim</b>	Não
Madeira	PRFC x PRFV	3 cm x 2 cm	Sim	Não	Não
		-	-	-	-
		-	-	-	-
Madeira	PRFC x PRFB	3 cm x 2 cm	Sim	Não	Não
		-	-	-	-
		-	-	-	-

Para os defeitos de ar e comparando PRFV x PRFB, a dimensão do defeito possui influência isolada quando é aumentado de 1 x 1 cm para 3 x 3 cm (defeito 3 vezes maior). Entretanto, para defeitos em madeira, caso os defeitos aumentem de dimensão de 1 x 1 cm para 2 x 2 cm (defeito 2 vezes maior) já é suficiente para que este parâmetro seja influência isolada significativa na temperatura do defeito. A dimensão do defeito está relacionada com a capacidade térmica de impedir que o calor o ultrapasse e assim na comparação das mantas de PRFV e PRFB, os defeitos maiores exercem maior influência na temperatura do defeito.

## 8.6 Análises finais

Uma das conclusões importantes desta etapa experimental é que a manta de PRFB usada como material para reforço, mostrou a melhor

visualização dos defeitos subsuperficiais quando adotada a termografia infravermelha como ferramenta de inspeção.

Apesar de a manta de PRFC ser a mais frequentemente aplicada em estruturas de concreto, os resultados experimentais mostraram que este material não fornece uma boa visualização de defeitos subsuperficiais de ar e madeira nos termogramas. Este fato pode estar relacionado à alta condutividade térmica do carbono (1,9 W/mK segundo Ishiyama (2006)) que é aproximadamente 54 vezes maior do que a da fibra de basalto (0,035 W/mK, segundo Singha, (2012)).

Alguns estudos mostram as vantagens da utilização do PRFB utilizado como material compósito. Por exemplo, a fibra de basalto possui características de resistência mais altas do que as da fibra de vidro e apenas um pouco inferiores às da fibra de carbono em diversos aspectos (ARTEMENKO; KADYKOVA, 2008). Além disso, como já pôde ser observado nesta etapa, a inspeção por termografia infravermelha produziu excelentes resultados.

Sabe-se que o defeito subsuperficial localizado na interface PRF/concreto pode enfraquecer a colagem deste conjunto, levando-o até mesmo ao completo destacamento do PRF (BENGAR; MAGHSOUDI, 2010). Isso significa que se na prática o PRFB for utilizado como reforço, a inspeção infravermelha pode fornecer melhores resultados e assim um diagnóstico mais seguro pode ser obtido no caso deste tipo de detecção.

Em relação a análise estatística pôde-se observar que o tempo de aquecimento solar foi o parâmetro mais importante na comparação das temperaturas do defeito, sendo o parâmetro com influência isolada em todos os casos.

Observou-se ainda que em relação aos tipos de reforço o PRFB e o PRFV apresentaram um comportamento mais similar comparando as temperaturas dos defeitos ao contrário das comparações entre PRFB e PRFC, quando comparados com o tempo de aquecimento.

Comparando-se os tipos de matriz para o PRFB, observou-se a influência mútua do tempo de aquecimento e tipo de matriz (cimentícia e epoxídica) para alguns casos.

Em alguns casos também houve a influência dos tipos de defeitos (ar e madeira) para a manta de PRFV quando comparados com o tempo de aquecimento.

Finalmente, em relação à variação de dimensão dos defeitos e o tipo de reforço utilizado, observou-se influência significativa isolada da variação do reforço em todos os casos e a influência significativa isolada

da dimensão do defeito apenas em alguns casos da comparação de PRFC e PRFB.



## **CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

### **9.1 Conclusões específicas**

Para a utilização da termografia infravermelha ativa, este estudo demonstrou que equipamentos simples de aquecimento, podem fornecer resultados satisfatórios para a visualização de danos na interface concreto/PRF de estruturas reforçadas. A utilização de aquecimentos realizados por lâmpada incandescente e aquecedor halógeno apresentaram resultados bastante expressivos. Para estes equipamentos, o calor é transmitido por radiação, que é um tipo de transferência de calor que ocorre por ondas eletromagnéticas e assim não sofre perdas para o meio, o que beneficia, portanto, a excitação térmica do corpo e consequentemente o resultado de visualização do dano.

O contraste térmico analisado neste trabalho compreendeu a delaminação em vigas e apresentou um comportamento gráfico diferente para cada material testado como reforço e para cada diferente tempo de aquecimento artificial. Para vigas reforçadas por laminado de carbono, o contraste térmico padrão cai bruscamente após passado um curto espaço de tempo cessado o aquecimento, enquanto que para os materiais pultrudados (de vidro e carbono) o contraste térmico demora mais a diminuir. Este comportamento está relacionado às características térmicas dos materiais de reforço.

Para a termografia infravermelha passiva por aquecimento solar, foram analisados, primeiramente, os perfis de temperatura (gráficos) obtidos pelos termogramas de cada amostra que continha defeitos artificiais subsuperficiais. A partir dos gráficos, foi então elaborado um novo método de cálculo para se estimar a extensão dos danos na interface concreto/PRF independentemente de se conhecer o tipo de reforço (carbono ou vidro), matriz de colagem (cimentícia ou epoxídica) ou tipo de defeito (ar, madeira, EPS e cortiça). Os resultados foram bastante satisfatórios com erros abaixo de 15%.

Continuando a análise quantitativa de defeitos subsuperficiais em estruturas reforçadas por termografia infravermelha passiva, buscou-se comparar os componentes de amostras reforçadas com mantas de PRF (de carbono, vidro e basalto) e ainda o tempo de exposição térmica solar a que eram submetidas, por meio da avaliação das temperaturas centrais que o defeito demonstrou nas imagens infravermelhas, utilizando-se para isso a estatística. Os resultados mostraram que o basalto é o

material que propiciou as melhores visualizações dos defeitos subsuperficiais, enquanto o carbono, apesar de tão comumente utilizado em reforços, forneceu uma visualização precária dos danos. A análise estatística mostrou que o tempo de exposição solar influencia na análise termográfica em todos os casos. Observou-se ainda que os reforços com PRFB e o PRFV apresentaram um comportamento similar entre si, comparando-se as temperaturas dos defeitos.

## 9.2 Conclusões gerais

A visualização de defeitos subsuperficiais em estruturas de concreto reforçadas com PRF mostrou-se mais evidente para a termografia infravermelha ativa do que para passiva como demonstram também os trabalhos de Corvaglia e Largo (2008) e de Maierhofer e Roellig (2009). Esta visualização se intensifica quando os materiais do defeito simulado possuem baixa condutividade térmica, que é uma situação comum encontrada em campo, já que geralmente são avaliados descolamentos, bolhas de ar ou, mais raramente, pedaços de madeira ou EPS que podem estar aderidos por acidente na colagem.

Nota-se que a utilização de fontes de calor artificiais exige uma maior elaboração do procedimento e é limitada a alguns tipos de inspeções em campo. Por exemplo, no relatório de Pollock et al. (2008) obteve-se sucesso no uso da termografia infravermelha ativa para vigas de seção caixão, uma vez que estas permitem o acesso interno à viga.

Entretanto, a termografia infravermelha passiva apesar de mostrar os defeitos de forma menos evidente é muito utilizada em campo especialmente em estruturas de pontes e ainda possui a vantagem de um aquecimento mais uniforme, o que facilita análises quantitativas.

A escolha do método bem como os tipos de equipamentos a serem utilizados ou mesmo o tempo de exposição da superfície ao aquecimento, seja ele solar ou artificial, está diretamente relacionada ao tipo, forma e materiais da estrutura e deve ser avaliada caso a caso.

Por fim, este trabalho mostra a termografia infravermelha (ativa e passiva) como ótima opção de inspeção de defeitos na interface entre PRF e concreto e então, espera-se que este tema continue a ser explorado para que haja mais aplicações em laboratório e principalmente em campo, para que assim possa ser difundida especialmente no Brasil, onde estruturas reforçadas por PRF ainda não são avaliadas por este ensaio não destrutivo.

### 9.3 Sugestões para trabalhos futuros

Sugerem-se como pesquisas futuras:

- Elaboração de dispositivos para excitação térmica que promovam um aquecimento uniforme de uma área para o uso em inspeções por termografia infravermelha ativa.
- Estudo da influência da variação de fluxos de calor para termografia infravermelha passiva na avaliação de danos em estruturas reforçadas com PRF.
- Análise quantitativa de delaminação entre PRF e concreto com a utilização de termografia infravermelha ativa.
- Simulações em laboratório de fatores que influenciam na captação de imagens infravermelhas em se tratando de aplicações em campo, tais como o vento e ângulo de incidência da câmera na superfície inspecionada.
- Estudo de imagens infravermelhas variando-se a emissividade da superfície inspecionada pela inserção de rugosidades, saliências, tipos diferentes de pinturas, entre outros acabamentos.
- Comparações de experimentos em laboratório com simulações em programas computacionais de transferência de calor baseados em métodos dos elementos finitos.



## REFERÊNCIAS

ADVISORY COMMITTEE ON TECHNICAL RECOMMENDATIONS FOR CONSTRUCTION. **CNR-DT 200 R1/2012 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures**Roma, 2013.

AKASHI, K. et al. **Development of Inspection Method Using Infrared Thermography Technology and its Technical Consideration**61st JSCE Annual Meeting. **Anais...**2006

ALMEIDA, E. G. DE. **Inspeção Termográfica de Danos por Impacto em Laminados Compósitos Sólidos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras de Carbono**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2010.

ALTOÉ, L.; FILHO, D. O. Termografia Infravermelha Aplicada à Inspeção de Edifícios. **Acta Tecnológica**, v. 1, p. 55–59, 2012.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R-08: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems**Farmington Hills, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. **Recommended Practice No. SNT-TC-1A Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing**, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1933-99a Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers**, 2010.

ANGIULI, R. et al. Defect identification and acceptance of FRP and FRCM masonry reinforcement by Infrared Thermography. **Key Engineering Materials**, v. 624, p. 80–87, 2015.

ARAÚJO, R. A.; BARBOSA, L. C.; SINISCALCHI, R. T. **Os Impactos da Aplicação da Termografia na Operação do Sistema Elétrico de Furnas e as Ações Adotadas para Buscar a máxima Operacionalidade, Produtividade e Confiabilidade do Sistema**X EDAO - Encontro para Debates de Assuntos de Operação. **Anais...**São Paulo: 2008

ARQUEZ, A. P. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2010.

ARTEMENKO, S. E.; KADYKOVA, Y. A. Polymer composite materials based on carbon, basalt, and glass fibres. **Fibre Chemistry**, v. 40, n. 1, p. 37–39, 1 jul. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15424:2006 - Ensaios não Destrutivos - Termografia - Terminologia**, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15572:2008 - Ensaios não Destrutivos - Termografia - Guia para Inspeção de Equipamentos Elétricos e Mecânicos**, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15718:2009 - Ensaios não Destrutivos - Termografia - Guia para verificação de termovisores**, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15763:2009 - Ensaios não Destrutivos - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência**, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15866:2010 - Ensaios não Destrutivos - Termografia - Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos**, 2010.

BARREIRA, E. S. B. M. **Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios**. Porto: Universidade do Porto, 2004.

BAUER, E. et al. Infrared thermography – evaluation of the results reproducibility. **Structural Survey**, v. 31, n. 3, p. 181–193, 2015.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

BENGAR, H. A.; MAGHSOUDI, A. A. Experimental investigations and verification of debonding strain of RHSC continuous beams strengthened in flexure with externally bonded FRPs. **Materials and Structures**, v. 43, n. 6, p. 815–837, 22 set. 2010.

BERG, A. C. et al. Construction and cost analysis of an FRP reinforced concrete bridge deck. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 8, p. 515–526, out. 2006.

BISON, P. G. et al. **Fresco thermographic inspection by convective heating technique** (D. O. Thompson, D. E. Chimenti, Eds.) Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. **Anais...**New York: 1998

BIZINDAVYI, L.; NEALE, K. W. Transfer Lengths an Bond Strengths. **Journal of Composites for Construction**, v. 3, n. 4, p. 153–160, 1999.

BOLLENI, N. K. **Environmental Effects on Subsurface Defect Detection in Concrete Structures Using Infrared Thermography**. Columbia: University of Missouri - Columbia, 2009.

BURWELL, C. M.; HOOPER, J. D.; ANDERSON, R. D. **Seismic Strengthening of Harborview Medical Center Using FRP Reinforcement** 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. **Anais...**San Francisco: 2006

BUYUKOZTURK, O.; GUNES, O.; KARACA, E. Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 1, p. 9–19, fev. 2004.

CAGGIANO, A.; MARTINELLI, E. **Fracture-based Interface Formulation for FRP-to-concrete Debonding Mechanisms in Mixed Cracking Mode** 11th International Symposium on Fiber Reinforcement Polymers for Reinforced Concrete Structures. **Anais...**Guimarães: FRPRCS11, 2013

CANALLI, I. C. **Estudo do Comportamento de Estrutura Mista de Concreto e Perfil Pultrudado de PRFV sob Flexão**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

CANNAS, B. et al. **Modeling of Active Infrared Thermography for Defect Detection in Concrete Structures** COMSOL Conference. **Anais...**2012

CAO, S. Y. et al. ESPI Measurement of Bond-Slip Relationships of FRP-Concrete Interface. **Journal of Composites for Construction**, v. 11, n. 2, p. 149–160, 2007.

CARMICHAEL, B. M.; BARNES, R. W. **Repair of the Uphapee Creek Bridge with FRP Laminates**. Montgomery: [s.n.].

CARMISCIANO, S. et al. Basalt woven fiber reinforced vinylester composites: Flexural and electrical properties. **Materials & Design**, v. 32, n. 1, p. 337–342, jan. 2011.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4<sup>a</sup> Edição ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 2012.

CHEN, J. F.; TENG, J. G. Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete. **Journal of Structural Engineering**, v. 127, n. 7, p. 784–791, 2001.

CHOI, M. Y. et al. **Defects Detection in GFRP Composites by using Transmission Method of Infrared Thermography** 12<sup>th</sup> International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. **Anais...**Bordeaux: 2014

CHRZANOWSKI, K. **Non-Contact Thermometry - Measurement Errors**. 7. ed. Warsaw: Polish Chapter SPIE, 2001. v. 7

COLOMBO, C.; VERGANI, L.; BURMAN, M. Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites. **Composite Structures**, v. 94, n. 3, p. 1165–1174, fev. 2012.

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**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CORTIZO, E. C.; BARBOSA, M. P. Estado da arte da termografia.

**FÓRUM PATRIMÔNIO: ambiente construído e patrimônio sustentável**, v. 2, n. 2, p. 158–193, 2008.

CORVAGLIA, P.; LARGO, A. **IRT survey for the quality control of FRP reinforced r . c . structures**9 th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. **Anais...**Krakow: 2008

CRAVEIRO, M. A. C. **Desenvolvimento de um sistema para avaliação dos fatores de influência sobre análises termográficas em subestações desabrigadas**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2008.

CURTY, L. A. **Estudo Experimental dos Consoles Curtos de Concreto Armado Reforçados com Compósitos de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.

DE FREITAS, S. S.; DE FREITAS, V. P.; BARREIRA, E. Detection of façade plaster detachments using infrared thermography - A nondestructive technique. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 80–87, 2014.

DONOHUE & ASSOCIATES, I. **Bridge Deck Delamination Study Infrared Inspection**. Iowa: [s.n.].

DUMOULIN, J. et al. **Evaluation of FRP Gluing on Concrete Structures by Active Infrared Thermography**10 Conference on Qualitative InfraRed Thermography. **Anais...**Quebec: 2010

FAVRO, L. D. et al. **IR Thermal wave tomographic studies of structural composites** (D. O. Thompson, D. E. Chimenti, Eds.)Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. **Anais...**1998

FAVRO, L. D.; HAN, X. **Thermal wave material characterization and thermal wave imaging** (G. Birnbaum, B. A. Auld, Eds.)Sensing for Materials Characterization, Processing, and Manufacturing. **Anais...**ASNT TONES, 1998

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J.; LORIGGIO, D. D. Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono : mecanismos de incremento de ancoragem. **Acta Scientiarum**, v. 24, n.

6, p. 1783–1791, 2002.

FORTES, A. S. **Estruturas de concreto submetidas à flexão reforçadas com laminados de CFRP colados em entalhes Estruturas de concreto submetidas à flexão reforçadas com laminados de CFRP colados em entalhes**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

GALIETTI, U. et al. Non-destructive defect characterization of concrete structures reinforced by means of FRP. **Infrared Physics & Technology**, v. 49, n. 3, p. 218–223, jan. 2007.

GHOSH, K. K.; KARBHARI, V. M. Use of infrared thermography for quantitative non-destructive evaluation in FRP strengthened bridge systems. **Materials and Structures**, v. 44, n. 1, p. 169–185, 2011.

GIRON, A. D. R.; CORREA, H. L. Non-uniform heating compensation for sequences of thermal images using median filtering. **Dyna**, v. 80, n. 2013, p. 74–82, 2013.

GRINZATO, E.; VAVILOV, V.; KAUPPINEN, T. Quantitative infrared thermography in buildings. **Energy and Buildings**, v. 29, n. 1, p. 1–9, 1998.

GRYS, S.; VOKOROKOS, L.; BOROWIK, L. Size determination of subsurface defect by active thermography – Simulation research. **Infrared Physics & Technology**, v. 62, p. 147–153, jan. 2014.

GUNTER, M. **The Blister-test to Determine the Bond Strength Between Polymer Coatings and Concrete** (Y. Ohama, M. Puterman, Eds.) Second International RILEM Symposium on Adhesion between Polymers and Concrete. **Anais...RILEM Publications SARL**, 1999

HADIGHEH, S. A.; GRAVINA, R. J.; SETUNGE, S. **Experimental and Analytical Identification of Interfacial Bond Characteristics in Adhesively Bonded Joints** 11th International Symposium on Fiber Reinforcement Polymers for Reinforced Concrete Structures. **Anais...Guimarães: FRPRCS11**, 2013

HALABE, U. B.; DUTTA, S. S.; GANGARAO, H. V. S. **NDE of FRP Wrapped Columns Using Infrared** 34 Annual Review of Progress in

Quantitative Nondestructive Evaluation. **Anais...**Golden: American Institute of Physics, 2008

HALABE, U. B.; KLINKHACHORN, P.; SAZONOV, E. **Nondestructive evaluation of FRP composite bridge components using infrared thermography** 28th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. **Anais...**Brunswick: 2002Disponível em: <<http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/10.1063/1.1472946>>

HOLLAWAY, L. C. Development and review of advanced polymer/fibre composites used in the European construction industry. **The Official Newsletter of the International Institute for FRP in Construction**, v. 1, n. 1, p. 10–20, 2004.

HOLST, G. C. **Common Sense Approach to Thermal Imaging**. 1. ed. Winter Park: JDC Publishing, 2000.

IMPOSA, S. Infrared thermography and Georadar techniques applied to the “ Sala delle Nicchie” (Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy). **Journal of Cultural Heritage**, v. 11, n. 3, p. 259–264, 2010.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9712:2012 Non-destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel**, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18436:2014 Condition monitoring and diagnostics of machines - Requirements for qualification and assessment of personnel - Part 7: Thermography**, 2014.

ISHIYAMA, T. **Thermal Solutions**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.nssmc.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9318.pdf>>.

JUNGES, P. **Análise de Vibrações de uma Laje Mista de Concreto e Perfis de PRFV Induzidas por Atividades Humanas**. Florianópolis:

Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de CFRP**. Porto: Universidade do Porto, 1999.

JUVANDES, L. F. P. **Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP**. Porto: Universidade do Porto, 2002.

KLINKHACHORN, P. et al. Real Time detection of Defects in GFRP Bridge Decks Using Infrared Thermography. **Review of Quantitative Nondestructive Evaluation**, v. 25, p. 1640–1648, 2006.

LAI, W. L. et al. Characterization of Flaws Embedded in Externally Bonded CFRP on Concrete Beams by Infrared Thermography and Shearography. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 28, n. 1, p. 27–35, 5 mar. 2009.

LAI, W. L.; POON, C. S. **Boundary and size estimation of debonds in external wall finishes of high-rise buildings using Infrared thermography** 11 th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. **Anais...Naples: QIRT**, 2012

LARGET, M. et al. Use of Passive Infrared Thermography Measurements to Quantify Geometrical Anomalies of Concrete. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 15, n. 5, p. 759–772, 2011.

LESKO, J. J. et al. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction - State-of-the-Art Review. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, n. 2, p. 73–87, 2002.

MADDING, R. P. **Emissivity Measurement and Temperature Correction Accuracy Considerations** (D. H. LeMieux, J. R. Snell, Jr., Eds.) **Thermosense XXI. Anais...SPIE**, 19 mar. 1999 Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=987186>>

MADDING, R. P.; LYON, B. R. **Wind effects on electrical hot spots - some experimental IR data** **Thermosense XXII. Anais...Orlando: SPIE**, 2002

MAIERHOFER, C.; ROELLIG, M. **Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures** Non-Destructive Testing in Civil Engineering. **Anais...**Nantes: 2009

MALDAGUE, X. P. V. **Theory and Praice of Infrared Technology for Nondesructive Testing**. New York: John Wiley & Sons, 2001.

MALDAGUE, X. Applications of Infrared Thermography. In: **Trends in Optical Nondestructive Testing**. Quebec: [s.n.]. p. 591–609.

MANUAL DO UTILIZADOR FLIR, T. **Manual do utilizador FLIR B series FLIR T series**FLIR Systems, , 2010.

MARINETTI, S.; CESARATTO, P. G. Emissivity estimation for accurate quantitative thermography. **NDT and E International**, v. 51, p. 127–134, 2012.

MARINI, M. V. **Avaliação da aderência entre o concreto e o sistema de reforço com fibra de carbono**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2011.

MASER, K. R. **Integration of Ground Penetrating Radar and Infrared Thermography for Bridge Deck Condition Evaluation** **Résumé Keywords 1 Background** Non-Destructive Testing in Civil Engineering. **Anais...**Nantes: NDTCE'09, 2009

MATSUMOTO, M.; MITANI, K.; CATBAS, F. N. **NDE for Bridge Assessment using Image Processing and Infrared Thermography** Transportation Research Board 94th Annual Meeting. **Anais...**2015

MEIER, U. Strengthening of structures using carbon fibre / epoxy composites. **Construction and Building Materials**, v. 9, n. 6, p. 341–351, 1995.

MENDONÇA, L. V. Termografia por Infravermelhos: Inspeção de Betão. **Engenharia & Vida**, v. 16, p. 53–57, 2005.

MENON, N. V. **Estudo Experimental de Sistemas de Reforço ao Cisalhamento em Vigas de Concreto Armado Utilizando-se**

**Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC).** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

MITANI, K.; MATSUMOTO, M. **Innovative Bridge Assessment Methods Using Image Processing and Infrared Thermography Technology** 37th Conference on Our World in Concrete & Structures. **Anais...**Singapore: 2012

MONTI, G. **Seismic Upgrade of Reinforced Concrete Columns with FRP** Seismic Retrofitting of the South Tower. **Anais...**Teheran: Tarh va Afarinesh, 2003

MOROPOULOU, A. et al. Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. **Construction and Building Materials**, v. 48, n. NOVEMBER, p. 1222–1239, 2013.

MULAVEESALA, R.; VENKATA GHALI, S. Coded excitation for infrared non-destructive testing of carbon fiber reinforced plastics. **The Review of Scientific Instruments**, v. 82, n. 5, p. 054902–1–05492–4, maio 2011.

NAIK, B. T. R.; SINGH, S. S.; ZACHAR, J. A. **Application of Infrared Thermography Technique for Evaluating of Existing Concrete Structures** Seventh International Conference and Exhibition Structural Faults & Repair - 97. **Anais...**Edinburgh: Seventh International Conference and Exhibition Structural Faults & Repair - 97, 1997

NOKES, J. P.; HAWKINS, G. F. **Infrared Inspection of Composite-Reinforced Concrete Structures.** Columbus: [s.n.].

NUNES, A. DOS S. et al. **Materiais de Engenharia** Bauru Universidade Estadual Paulista, , 2006. Disponível em: <[http://wwwp.feb.unesp.br/renofio/materiais/1/MateriaisdeEngenharia\\_Equipe1.pdf](http://wwwp.feb.unesp.br/renofio/materiais/1/MateriaisdeEngenharia_Equipe1.pdf)>

OLIVEIRA, T. M. D. **Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com recurso a termografia.** Porto: Universidade do Porto, 2012.

OSHIRO, H. K. **Modelagem Numérica e Validação Experimental de**

**Ensaio Não Destrutivo por Termografia Infravermelha.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

PETTRES, R. **Reconhecimento de Padrões de Defeitos em Concreto a partir de Imagens Térmicas Estacionárias e Redes Neurais Artificiais.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2011.

POLLOCK, D. G. et al. **Detection of Voids in Prestressed Concrete Bridges using Thermal Imaging and Ground-Penetrating Radar.** Washington: [s.n.].

POON, C. S. et al. **A Quantitative Study on Bond Behavior Between Fiber-Reinforced Polymer (FRP) and Concrete Interface Using Infra-Red Thermography (IRT)** (S. T. Smith, Ed.)Asia-Pacific Conference on FRP in Structures. **Anais...**Internationa Institute for FRP in Construction, 2007

ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. Behavior of GFRP Reinforcing Bars Subjected to Extreme Temperatures. **Journal of Composites for Construction**, v. 14, n. 4, p. 353–360, 2010.

RODRÍGUES, F. DE J. L. **Detecção de Defeitos em Materiais Cerâmicos Usando Termografia.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

ROGALSKI, A.; CHRZANOWSKI, K. Infrared Devices and Techniques. **Opto-electronics Review**, v. 10, n. 2, p. 111–136, 2002.

SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. Fiber Composite Plates Can Strengthen Beams. **Concrete International: Design & Construction**, v. 12, n. 3, p. 66–70, 1991.

SANTOS, L. DOS. **Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas.** Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2006.

SANTOS, L. DOS. **Classificação e Modelagem de Fatores de Influência sobre Inspeções Termográficas em Ambientes Desabrigados.** Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2012.

SANTOS, L. DOS; ALVES, L. M.; BORTONI, E. DA C.

**Implementation of Thermographers' Certification in Brazil** (M. Safai, J. R. Brown, Eds.)Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIII. **Anais...SPIE**, 13 maio 2011Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.887406>>. Acesso em: 26 fev. 2013

SANTOS NETO, A. DA S. **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2006a.

SANTOS NETO, A. DA S. **Desenvolvimento de um Sistema de Laje Mista de Concreto com Perfis Pultrudados de Materiais Compostos Avançados**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006b.

SENA CRUZ, J. M.; BARROS, J. A. O.; FARIA, R. **Assessing the embedded length of epoxy-bonded carbon laminates by pull-out bending tests**International Conference on Composite in Construction. **Anais...Porto**: 2001

SHIN, P. H.; WEBB, S. C.; PETERS, K. J. **Nondestructive inspection in adhesive-bonded joint CFRP using pulsed phase thermography** (G. R. Stockton, F. P. Colbert, Eds.)Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV. **Anais...SPIE**, 22 maio 2013Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2018414>>. Acesso em: 1 jun. 2013

SIM, J.-G. et al. Concrete Structures and the Improvement of the Defect-identification. **Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection**, v. 13, n. 5, p. 169–179, 2009.

SINGHA, K. A short review on basalt fiber. **International Journal of Textile Science**, v. 1, n. 4, p. 19–28, 2012.

SMITH, S. .; TENG, J. . FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models. **Engineering Structures**, v. 24, n. 4, p. 385–395, abr. 2002.

SNELL, J. **Best Practices for using Infrared Thermography for Condition Monitoring of Oil-filled Utility Assets**MontpelierSnell Infrared, , 2005.

SOUTO FILHO, M. V. **Modelagem Numérica de Reforço Estrutural em Vigas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002.

SWENSON, K. S.; BARNES, R. W. **Design Procedure for FRP Strengthening of War Memorial Bridge**. Montgomery: [s.n.].

SWENSON, K. S.; BARNES, R. W. **Design Procedure for FRP Strengthening of War Memorial Bridge**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002b.

TAILLADE, F. et al. **Evaluation of bonded FRP strengthening systems for concrete structures using Infrared Thermography and Shearography** Non-Destructive Testing in Civil Engineering. **Anais...**Nantes: NDTCE'09, 2009

TAKEDA, K. et al. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre sheets. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 27, n. 10, p. 981–987, jan. 1996.

TAN, J.-H. et al. Infrared thermography on ocular surface temperature: A review. **Infrared Physics & Technology**, v. 52, n. 4, p. 97–108, jul. 2009.

TANAKA, H.; TOTTORI, S.; NIHEI, T. Detection of Concrete Spalling Using Active Infrared Thermography. **Railway Technical Research Institute/Tetsudo Gijutsu Kenkyujo**, v. 47, n. 3, p. 138–144, 2006.

TENG, J. G. et al. **FRP Strengthened RC Structures**. 1th. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2002.

TENG, J. G. et al. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. **Construction and Building Materials**, v. 17, n. 6-7, p. 447–462, set. 2003.

TITMAN, D. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. **NDT & E International**, v. 34, n. 2, p. 149–154, mar. 2001.

TOUTANJI, H. et al. Verifications of Design Equations of Beams Externally Strengthened with FRP Composites. **Journal of Composites**

**for Construction**, v. 10, n. 3, p. 254–264, 2006.

VAGHEFI, K. et al. **Application of Thermal IR Imagery for Concrete Bridge Inspection** Convention and National Bridge Conference. **Anais...** Salt Lake City: 2011

VAGHEFI, K. **INFRARED THERMOGRAPHY ENHANCEMENTS FOR.** [s.l.] Michigan Technological University, 2013.

VAN GEMERT, D. Force transfer in epoxy bonded steel/concrete joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, p. 67–72, 1980.

VASUDEVAN, A. **Application of Digital Infrared Thermography for Nondestructive Evaluation of Composite Bridge Components.** Morgantown: West Virginia University, 2004.

VAVILOV, V.; TAYLOR, R. **Theoretical and practical aspects of the thermal nondestructive testing of bonded structures** (R. S. Sharpe, Ed.) Research Techniques in NDT Testing. **Anais...** 1982

VIEIRA, D. V. **Comportamento Estrutural da Capa de Concreto Reforçado com Fibras de Polipropileno de um Sistema de Laje Mista sob Ação de Cargas Concentradas.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

WATASE, A. **Non Destructive Evaluation of Concrete Structures Using High Resolution Digital Image and Infrared Thermography Technology.** Orlando: University of Central Florida, 2013.

WEIL, G. J. Infrared Thermography Techniques. In: MALHOTRA, M. V.; CARINO, N. J. (Eds.). **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete.** 2. ed. Boca Raton London New York Washington D. C.: CRC Press LLC, 2004, p. 14.

WOO, S.-K.; LEE, Y. Experimental study on interfacial behavior of CFRP-bonded concrete. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 14, n. 3, p. 385–393, 8 maio 2010.

YUAN, H. et al. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints.

**Engineering Structures**, v. 26, n. 5, p. 553–565, abr. 2004.

ZI, G. et al. **Optimum NDT using infrared thermography for defected concrete** (H.-M. Koh, D. M. Frangopol, Eds.)Fourth International Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics. **Anais...**London: Taulor & Francis Group, CRC Press/Balkema, 2008



## APÊNDICE A - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE INSERÇÃO DA CÂMERA INFRAVERMELHA

Neste Apêndice avalia-se o comportamento das imagens térmicas quando a inserção dos parâmetros da câmera não é a correta, para detecção de defeitos subsuperficiais entre chapa pultrudada de PRFV e o concreto.

### A.1 Introdução

Segundo Barreira (2004), apesar da grande potencialidade da termografia infravermelha em detectar danos, já comprovada por diversos estudos, deve-se efetuar a captação e análise das imagens infravermelhas com bastante cuidado devido à complexidade dos elementos construtivos e também do próprio equipamento. Uma dessas complexidades consiste na regulagem da precisão da câmera infravermelha, que está associada a alguns ajustes manuais, ou seja, é necessária a inserção de alguns parâmetros medidos *in loco* para a correta captação das imagens.

Isto significa que estes parâmetros, se inseridos de forma incorreta, podem alterar significativamente o resultado do ensaio e, por isso, merecem especial atenção, pois podem induzir a erros e falsos diagnósticos.

Percebe-se, portanto, que a influência dos parâmetros que devem ser inseridos na câmera infravermelha é um fator muito importante e que interfere substancialmente na formação da imagem termográfica, uma vez que são estes dados que possibilitam o cálculo de temperatura e ajuste da imagem térmica obtida (TITMAN, 2001).

Entender sobre o funcionamento da câmera infravermelha, tal como já foi descrito no item 2.3 do Capítulo 2, se relaciona diretamente ao estudo dos parâmetros de sua calibração. Sendo assim, para compreender melhor as inspeções realizadas por termografia infravermelha para avaliação de danos na interface PRF/concreto e ainda tomando como base a Equação 2.13, é necessária uma análise da inserção de alguns parâmetros na câmera tais como: emissividade térmica, distância da lente ao objeto, temperatura e umidade do ambiente que são os principais parâmetros de configuração, os quais devem ser medidos e inseridos manualmente na câmera. Em relação a este assunto, os estudos científicos estão mais voltados para avaliação da emissividade térmica.

A dissertação de mestrado de Rodrigues (2010) trata sobre a detecção de defeitos em materiais cerâmicos utilizando a termografia infravermelha. Na conclusão desta pesquisa, o autor relata que a emissividade é uma das principais causas da diferença entre resultados teóricos e experimentais e sugere ainda que, em pesquisas futuras, se amplie a análise desse parâmetro bem como outras propriedades termofísicas do material.

Madding (1999) discute técnicas de medição de emissividade e ainda porque os valores de tabela muitas vezes não são válidos na utilização da câmera infravermelha, ou seja, porque é necessário medir a emissividade. Discute ainda como a precisão da medição de emissividade afeta a precisão da medição de temperatura.

No trabalho de Marinetti e Cesaratto (2012) é proposto um método de medição de emissividade que depende de funções de calibração individuais e baseia-se na resposta espectral de um sensor infravermelho específico. A temperatura refletida é mantida constante durante o teste não sendo necessário conhecê-la. Os resultados das medições sobre materiais comumente utilizados como referências de emissividade em termografia quantitativa são relatadas. Simulações computacionais e inspeções termográficas de interiores e exteriores mostram a influência diferenciada de emissividade e os arredores da temperatura sobre a precisão da medição. Discutem-se ainda os resultados experimentais de medidas absolutas e diferenciais de temperatura.

Os artigos científicos anteriormente citados demonstram a relevância do estudo dos parâmetros que devem ser inseridos na câmera infravermelha.

## **A.2 Materiais e características das amostras**

As características dos materiais e amostras utilizadas nesta etapa experimental são as mesmas do grupo 1 do capítulo 5, item 5.2 (Figura 5.1), já descritas, uma vez que serão utilizados os mesmos corpos de prova.

## **A.3 Instrumentação**

Os resultados de um ensaio podem tornar-se mais precisos, caso os parâmetros estejam bem ajustados, já que a exatidão da medida de temperatura depende da calibração da câmera térmica e da exatidão dos parâmetros informados pelo operador (ARAÚJO; BARBOSA; SINISCALCHI, 2008).

Sendo assim, neste experimento, foram tomadas a temperatura ambiente e a umidade relativa de acordo dados fornecidos por um termo-higrômetro no dia e na hora do início do ensaio. Além disso, mediu-se a distância lente da câmera e o objeto com a utilização de uma trena e, por fim, foi determinada a emissividade ( $\epsilon$ ), conforme já descrito no capítulo 5, item 5.4. É importante salientar que, para a medição da emissividade, o método assume que as temperaturas da fita e da superfície da amostra são as mesmas. Caso contrário, a medição da emissividade será incorreta. Para atingir este objetivo, após a colagem da fita, as superfícies foram monitoradas até que estivessem com a mesma temperatura.

Como a emissividade dos materiais deste experimento é relativamente alta ( $\epsilon = 0,96$ ) e ainda o ambiente não está submetido a fontes de radiação intensa, o parâmetro de “Temperatura aparente refletida” não exerce influências no resultado final e por isso não necessita de ajustes. Sendo assim, inseriu-se um valor aleatório de 20°C.

A Tabela A-1 expõe os valores medidos dos parâmetros estudados nesta pesquisa, ou seja, os valores existentes de temperatura ambiente, umidade do ar, distância lente-objeto e emissividade. Os valores medidos serão denominados “valores reais” ou “parâmetros reais”.

O próximo passo foi a definição da variação dos parâmetros que serão inseridos na câmera para que assim pudesse ser observada qual será a diferença entre imagens e/ou temperaturas produzidas com a inserção de parâmetros reais e parâmetros falsos.

As Tabelas de A-2 a A-5 mostram como os parâmetros foram variados e quais valores foram inseridos na câmera, em cada caso. Observa-se que a distância da lente ao objeto é o único parâmetro que permite uma variação do considerado real e, por isso, foi tomada para duas situações reais diferentes: 1m e 5 m.

**Tabela A-1 – Valores reais medidos dos parâmetros estudados.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores medidos</b>
Temperatura	17°C
Umidade	64%
Emissividade térmica	0,96
Distâncias lente-objeto	1m 5m

**Tabela A-2 – Valor real (0%) e variações da temperatura ambiente.**

<b>Temperatura ambiente (°C)</b>					
Variações					
0%	30%	60%	100%	150%	200%
17	22,1	27,2	34,0	42,5	51,0

**Tabela A-3 – Valor real (0%) e variações da emissividade térmica.**

<b>Emissividade térmica</b>			
Variações			
0%	-30%	-60%	-90%
0,96	0,7	0,4	0,1

**Tabela A-4 – Valor real (0%) e variações de umidade relativa.**

<b>Umidade Relativa (%)</b>				
Variações				
0%	+30%	-30%	-60%	-90%
64	83	45	26	6

**Tabela A-5 – Valores reais e variações da distância da lente ao objeto.**

<b>Distância lente-objeto (m)</b>				
Real	Variações			
1	2	5	10	15
5	1	2	10	15

Enquanto um parâmetro era variado, os outros permaneciam ajustados para as medidas reais. No caso da distância da lente ao objeto, foi tomada como padrão a distância de 1 metro.

As imagens infravermelhas foram captadas para cada um dos quatro corpos de prova, para cada situação, após serem aquecidos na superfície de PRFV por lâmpada de 200 Watts, distante 12 cm da peça, durante 5 minutos. A lâmpada incandescente de 200 Watts foi utilizada por ter apresentado uma boa eficácia nos resultados com os corpos de prova no experimento descrito no capítulo 5, por ser de mais fácil manuseio e também por se adequar melhor ao aquecimento da uma área menor, no caso apenas na área onde está o PRFV.

Utilizou-se a função da câmera que permite marcar a temperatura de um ponto no corpo de prova. O ponto escolhido para leitura de temperatura foi o centro de onde se simulou a falta de aderência entre concreto e PRFV.

Variando-se um parâmetro, espera-se que haja um comportamento diferente na imagem infravermelha, porém é preciso uma análise cuidadosa. Sabe-se que, para qualquer corpo, logo após cessar o aquecimento, há uma tendência natural de queda de temperatura, pois inicia-se um equilíbrio térmico com o ambiente. Sendo assim, deve-se ter o cuidado de não atribuir a diminuição natural de temperatura do corpo de prova, registrada pela câmera infravermelha, à inserção de parâmetros falsos. Por isso, realizou-se a captura das imagens com a seguinte sequência: primeiramente registrou-se a imagem com os parâmetros reais, em seguida as imagens eram captadas para os parâmetros falsos e, por último, captava-se novamente a imagem com parâmetros reais.

Apesar do curto período de tempo entre a primeira e a última medição (menos de um minuto) há uma rápida perda de calor do corpo de prova para o ambiente devido a suas propriedades térmicas. Logo, registrar a imagem infravermelha em uma mesma configuração no início e no final visa observar qual a queda de temperatura durante o período de ajuste dos parâmetros e, assim, pode-se perceber se a variação da temperatura está ou não relacionada à alteração destes.

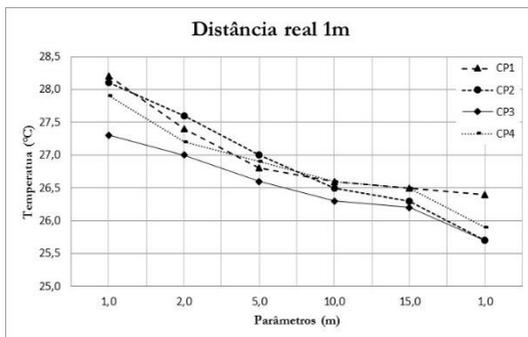
#### **A.4 Resultados e análises**

Considerando-se o aquecimento por lâmpada incandescente para as amostras do grupo 1 (vide Figura 5.1), avaliou-se qual a alteração nas imagens termográficas e na definição de temperatura da câmera, quando alguns dos parâmetros são erroneamente inseridos no equipamento.

Para todos os gráficos resultantes, apresentados a seguir, o eixo das ordenadas indica os valores do parâmetro (distância lente-objeto, temperatura ambiente, umidade relativa ou emissividade) utilizados em cada medição, ou seja, aqueles que foram inseridos na câmera infravermelha. Para cada um desses valores, o eixo das abscissas apresenta a temperatura captada pela imagem infravermelha no ponto de simulação de falta de aderência entre concreto e PRFV.

### A.4.1 Distância da lente ao objeto

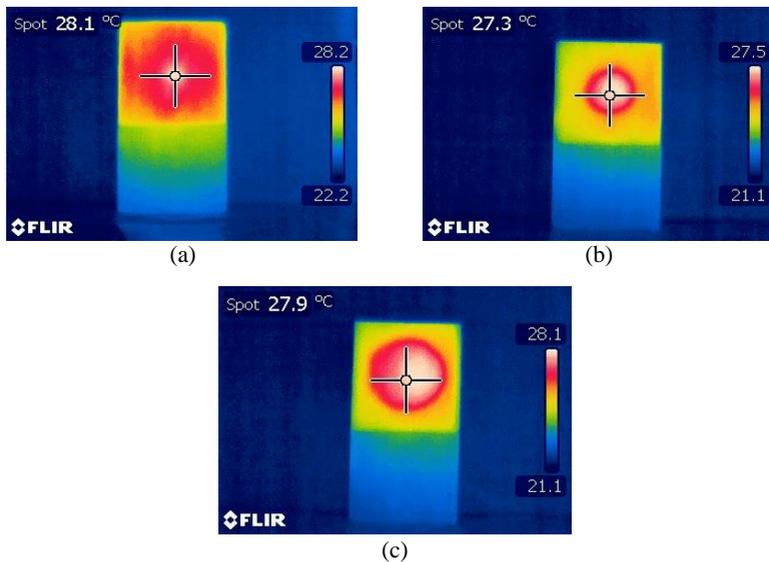
Analisando-se primeiramente um aumento da distância lente-objeto inserida na câmera, observa-se pela Figura A-1 que, apesar de haver uma pequena queda nos valores da temperatura no ponto do dano, não se pode afirmar que isto seja um efeito da inserção dos falsos parâmetros, pois ocorre diminuição de temperatura entre a primeira e a última medição, que possuem idênticos parâmetros inseridos.



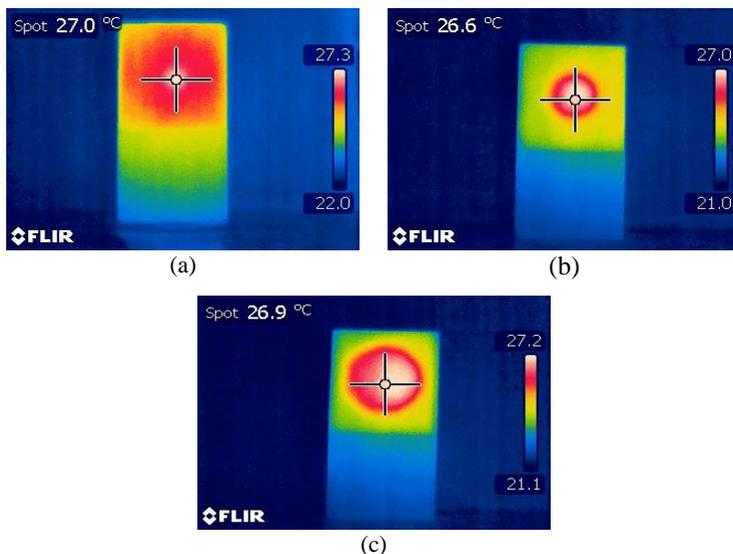
**Figura A-1 – Variação da temperatura no ponto do dano com alteração do parâmetro de distância da lente ao objeto (distância real de 1m).**

Porém, nota-se uma pequena ascensão do gráfico quando a distância falsa de 15 metros foi inserida. Logo, houve um pequeno distúrbio quando a inserção de falsa distância foi 15 vezes maior que a distância real. Conclui-se que, para a câmera posicionada a 1 metro do objeto, a inserção de valores de configuração maiores só exercerá influência para erros muito grandes.

É importante destacar que a identificação do dano se dá não apenas pela medição da temperatura no ponto do dano, mas também pelo contraste térmico visual da imagem infravermelha. Por isso, é interessante observar como se apresenta a delineação da imagem quando alterados esses parâmetros. Entretanto, nem mesmo as imagens sofreram influências significativas com a variação deste parâmetro, uma vez que são muito semelhantes considerado o mesmo corpo de prova.



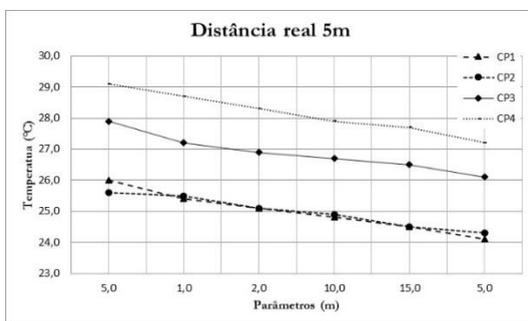
**Figura A-2 – Imagem infravermelha registrando a temperatura no ponto central do dano, inserida a distância lente-objeto igual a 1m (1ª medição): (a) CP1, (b) CP2, (c) CP3.**



**Figura A-3 – Imagem infravermelha registrando a temperatura no ponto central do dano, inserida a distância lente-objeto igual a 5m (3ª medição): (a) CP1, (b) CP2, (c) CP3.**

As Figuras A-2 e A-3 mostram que, a não ser pela pequena diferença de temperatura do ponto no dano, é praticamente impossível reconhecer, para um mesmo corpo de prova, qual a imagem que possui o parâmetro alterado.

Para a distância real de 5 metros, foram obtidos os resultados conforme mostra a Figura A-4. Novamente, observa-se que a queda na temperatura se dá de forma gradual entre a primeira e última medição e que para inserção do parâmetro falso de 15 metros o distúrbio no gráfico é menor e, portanto, a variação desse parâmetro quando a câmera é posicionada a 5 metros do corpo de prova também não apresenta grandes influências nos resultados.



**Figura A-4 – Variação da temperatura no ponto do dano com alteração do parâmetro de distância da lente ao objeto (distância real de 5m).**

Similarmente ao caso anterior, as imagens também não demonstraram diferenças significativas de contraste.

Contudo, tirando por um momento o foco da atenção para a variação dos parâmetros e observando agora apenas as diferenças de temperaturas entre os corpos de prova, percebe-se que, para uma distância lente-objeto de 5 metros, existe uma relação entre o tamanho da falha de aderência e a temperatura. Pela Figura A-4, nota-se que quanto maior o dano, maior a temperatura registrada pela câmera infravermelha no ponto do dano.

A temperatura captada no ponto do dano do CP2, que simula uma falha de aderência de apenas 2 cm, fica muito próxima à temperatura do CP1, que sequer apresenta falha. Porém, fica bastante claro que a temperatura no dano de CP3 é maior que a de CP1 e CP2 e, conseqüentemente, menor que a de CP4, que apresenta a simulação de maior dano. Portanto, infere-se que a medição da temperatura de

pequenas falhas por câmera infravermelha fica um pouco prejudicada se o equipamento estiver mais distante do alvo.

#### A.4.2 Temperatura ambiente e umidade relativa

Pode-se observar na Figura A.5 que existe uma influência do parâmetro de inserção de temperaturas falsas uma vez que, de acordo com o fenômeno do equilíbrio térmico, era esperado que o ponto da última medição também caísse, no entanto há uma ligeira ascensão. Nota-se, porém, que é uma elevação de menos de  $0,5^{\circ}\text{C}$  após a inserção de valores bem acima do real. Assim, conclui-se que a inserção de falsa temperatura ambiental para avaliar danos pode demonstrar valores ligeiramente abaixo do real.

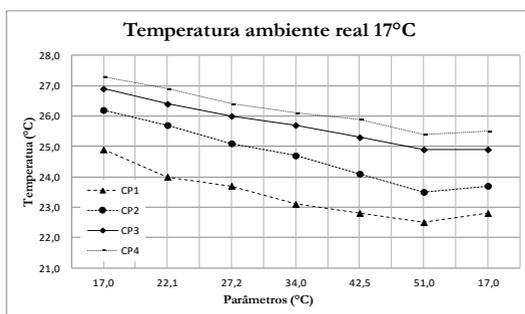


Figura A-5 – Variação da temperatura no ponto do dano com alteração da temperatura ambiente (temperatura real de  $17^{\circ}\text{C}$ ).

Porém, a influência do fator umidade relativa do ar, na Figura A-6, não demonstra uma anormalidade de decaimento da curva, podendo-se atribuir seu comportamento ao equilíbrio térmico.

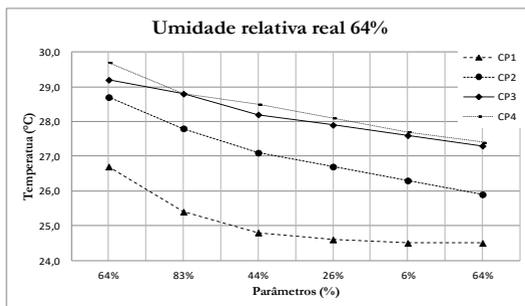


Figura A-6 – Variação da temperatura no ponto do dano com alteração do parâmetro de umidade relativa (umidade relativa real de  $64\%$ ).

### A.4.3 Emissividade

A Figura A-7 indica com clareza que a variação da emissividade influencia definitivamente na captação da temperatura na imagem infravermelha, aumentando-a significativamente, quanto menor for a emissividade falsa inserida.

As imagens das Figuras A-8 e A-9 mostram que mesmo nas imagens que apresentam falsas temperaturas ainda sim é possível reconhecer a falha na aderência pelo contraste térmico. Entretanto, percebe-se que quanto menor a emissividade, mais borrada a imagem, o que pode prejudicar a detecção de pequenas falhas.

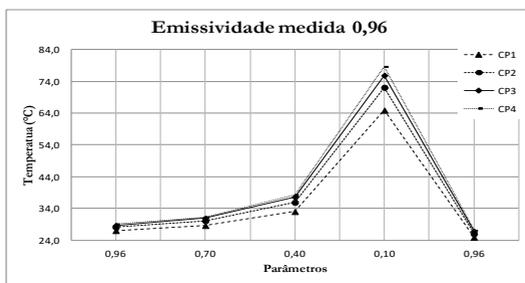


Figura A-7 – Variação da temperatura no ponto do dano com alteração do parâmetro da emissividade (emissividade térmica medida de 0,96).

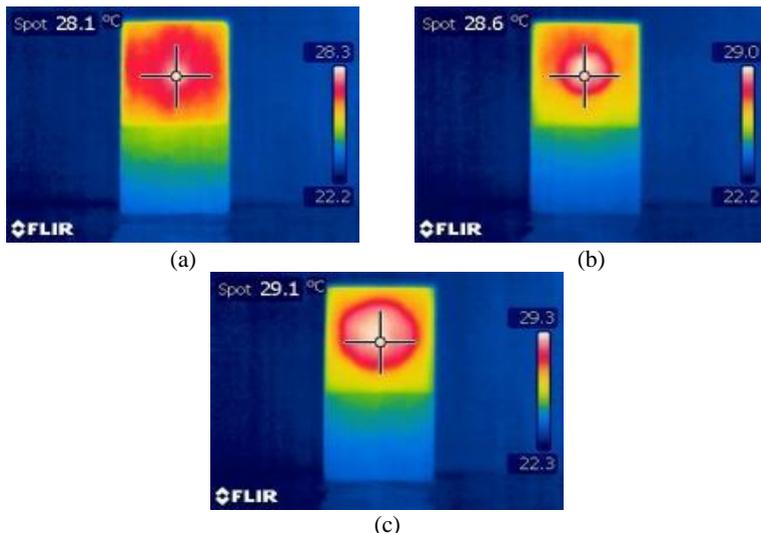
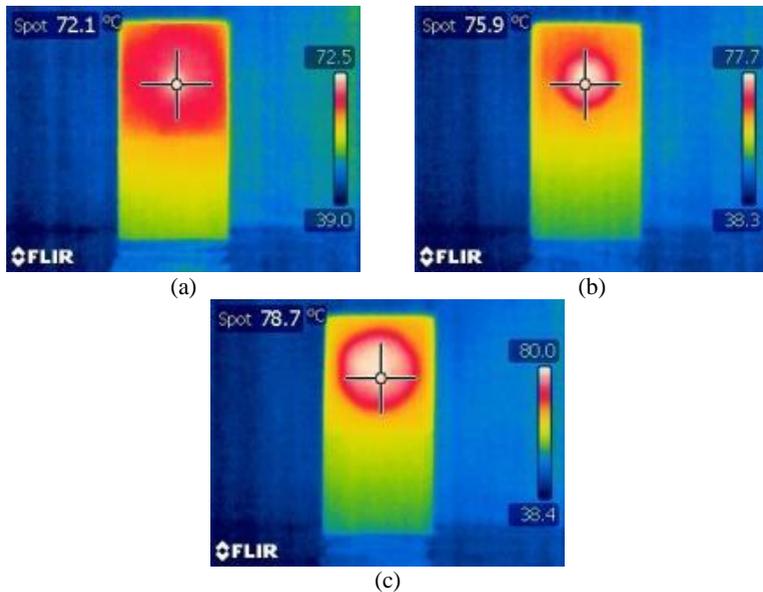


Figura A-8 – Imagem infravermelha CP4 com temperatura no centro do dano, inserida emissividade térmica 0,96 (1ª medição).



**Figura A-9 – Imagem infravermelha registrando a temperatura no centro do dano, inserida emissividade térmica 0,1 (4ª medição): (a) CP1, (b) CP2, (c) CP3.**

## A.5 Análises finais

A alteração individual dos parâmetros de temperatura ambiente, umidade relativa e distância da lente ao objeto não apresentaram grandes diferenças nem na medição de temperatura e nem mesmo na delimitação das imagens infravermelhas. O parâmetro da emissividade, por sua vez, produziu erros expressivos na medição de temperatura pela câmera infravermelha e também prejudicou um pouco a imagem, fornecendo menos detalhes. Porém, não influenciou na identificação visual do dano visto que o contorno do disco de EPS ficou bastante visível, tanto nas imagens das Figura A-8 (a), (b) e (c), quanto nas imagens das Figura A-9 (a), (b) e (c).

Portanto, pode-se afirmar que para quando o valor da temperatura medida pela câmera infravermelha não é o item de principal importância, mas sim a visualização da falha, este ensaio não destrutivo comprova-se ainda mais eficiente na provisão de diagnósticos.

Este estudo demonstrou que aplicação da termografia infravermelha na detecção de falhas de aderência entre concreto e PRFV

é pouco passível de falsos diagnósticos, caso haja uma inserção incorreta de um dos parâmetros de configuração da câmera, nas condições apresentadas.