

Mariana Ortolan Milanez

**INFLUÊNCIA DO VENTO NA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM  
ESTRUTURAS DE CONCRETO UTILIZANDO TERMOGRAFIA  
INFRAVERMELHA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ivo José Padaratz, PhD

Coorientador: Prof. Saulo Güths, PhD

Florianópolis  
2017

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

Milanez, Mariana Ortolan  
Influência do Vento na Detecção de Defeitos em  
Estruturas de Concreto utilizando Termografia  
Infravermelha / Mariana Ortolan Milanez ;  
orientador, Ivo José Padaratz, coorientador, Saulo  
Güths, 2017.  
150 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Termografia  
infravermelha. 3. Detecção de defeitos. 4.  
Estruturas de concreto. 5. Influência do vento. I.  
Padaratz, Ivo José. II. Güths, Saulo. III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Mariana Ortolan Milanez

**INFLUÊNCIA DO VENTO NA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM  
ESTRUTURAS DE CONCRETO UTILIZANDO TERMOGRAFIA  
INFRAVERMELHA**

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

Florianópolis, 31 de maio de 2017.

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Ivo José Padaratz, PhD. (Orientador)  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Saulo Güths, PhD. (Coorientador)  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**

---

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

---

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

---

Prof. Roberto Lamberts, PhD.  
Universidade Federal de Santa Catarina



*Aos meus Pais, Agenor e Rosana,  
e ao meu irmão, Rafael.*



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela saúde e pela força que me fizeram chegar até aqui.

À minha família, meus pais Agenor e Rosana e meu irmão Rafael, que nunca mediram esforços para incentivar meus estudos.

A Marcelo, pelo apoio e compreensão durante este período.

Ao meu Orientador, Professor Ivo, pelo compartilhamento de seu conhecimento e por seus conselhos valiosos.

Ao meu Coorientador, Professor Saulo, por todo apoio durante a fase experimental, e pelos laboratórios e equipamentos disponibilizados.

À colega Mariana, pelas sugestões acerca da escolha do tema desta pesquisa.

Aos colegas do GRUPEX (Grupo de Experimentação em Estruturas), pela agradável convivência ao longo destes anos.

A todos os Professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFSC, que muito contribuíram para a minha formação.

Aos Professores da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), em especial ao Professor Alexandre, que me incentivaram a dar continuidade à minha formação acadêmica.

Muito obrigada a todos, o apoio de vocês foi fundamental para que eu pudesse chegar até aqui. Muito obrigada!





## RESUMO

O concreto é um material muito utilizado na engenharia civil devido as suas características, dentre as quais a boa resistência à compressão e a facilidade de moldagem. No entanto, os elementos de uma estrutura de concreto podem estar sujeitos a diversas manifestações patológicas, como fissuras, infiltrações, vazios, dentre outros. Desta forma, torna-se necessária a utilização de métodos não destrutivos que possibilitem avaliá-las e quantificá-las. Neste contexto, dentre os métodos não destrutivos existentes, a termografia infravermelha vem sendo muito utilizada devido à sua agilidade na obtenção dos resultados e à sua facilidade de execução. Este ensaio, que determina a distribuição de temperaturas de uma superfície, possibilita a detecção de manifestações patológicas que se originam em uma edificação, desde que localizadas próximas à superfície. O objetivo deste estudo foi verificar a influência da ação do vento nos resultados, para a detecção de defeitos superficiais em elementos de concreto. A termografia infravermelha registra a leitura das temperaturas de uma superfície, e o vento pode influenciar no processo de trocas de calor por convecção. Para a execução deste estudo, foram moldadas amostras de concreto, com vazios simulados em seu interior a diferentes profundidades. O aquecimento das amostras foi realizado por meio de lâmpadas de halogênio e, após o aquecimento, as temperaturas da superfície foram monitoradas por meio de uma câmera infravermelha. Os ensaios foram realizados em um túnel de vento aplicando-se diferentes velocidades, controladas com o uso de um anemômetro. Os dados obtidos do experimento foram ainda comparados com uma simulação numérica unidimensional, esta desenvolvida por meio do método das diferenças finitas. Os resultados apontam que o vento exerce uma considerável influência nos contrastes térmicos obtidos, principalmente quando o defeito está mais próximo da superfície. Os resultados obtidos por meio da análise numérica apresentaram satisfatória concordância com os obtidos experimentalmente.

Palavras chave: Termografia infravermelha, detecção de defeitos, influência do vento, simulação numérica, estruturas de concreto.



## ABSTRACT

The concrete is widely used in civil engineering due to its characteristics, among which a good compressive strength and its ease of casting. However, the elements of a concrete structure are susceptible to pathologic manifestations, for example: cracks, infiltrations, voids, among others. Thus, it becomes necessary to use non-destructive methods to evaluate and quantify them. In this context, among the existing non-destructive methods, the infrared thermography has been widely used because the testing is relatively easy and results can be rapidly obtained. This test, that determines the temperatures distribution on a surface, enables the detection of sub-superficial faults that might exist in a concrete structure. The aim of this study is to verify the influence of wind action, in the faults detection in concrete elements. The infrared thermography captures the surface temperatures, and the wind may have influence in the convection heat transfer process. To carry out this study, concrete samples, with inside sub-surface voids at different depths, were casted. Halogen lamps were used for heating the samples and the surface temperatures were measured by an infrared camera. The tests were performed in a wind tunnel for different wind velocities, controlled by a calibrated thermo-anemometer. The experimental data were compared to one-dimensional numerical simulation ones, developed by the finite difference method. The results obtained show a considerable influence of the wind velocity on the thermal contrasts, when the defect is close to the surface. The numerical simulation fairly agrees to the experimental results.

**Keywords:** Infrared thermography, defect detection, wind influence, numerical simulation, concrete structures.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de medição em um elemento com anomalia .....	6
Figura 2.2	Transferência de calor por condução em uma parede com área $A$ .....	7
Figura 2.3	Transferência de calor por condução em uma parede com defeito (a) vista lateral e (b) vista frontal da face $A$ .....	8
Figura 2.4	Espectro eletromagnético na região próxima ao infravermelho.....	10
Figura 2.5	Absorção ( $\alpha$ ), reflexão ( $\rho$ ) e transmissão ( $\tau$ ).....	12
Figura 2.6	Representação esquemática da radiação recebida pela câmera infravermelha .....	16
Figura 2.7	Representação do (FOV) e do (IFOV) de um termovisor	17
Figura 2.8	Ilustração da termografia passiva.....	19
Figura 2.9	Possibilidades de técnicas de termografia ativa.....	20
Figura 2.10	Etapas da termografia pulsada .....	21
Figura 3.1	Contraste obtido para diferentes profundidades de defeito .....	28
Figura 3.2	Contraste obtido para diferentes tamanhos de defeito .....	29
Figura 3.3	Termograma e perfil de temperaturas obtidas.....	31
Figura 3.4	Contraste obtido para diferentes tempos de aquecimento	33
Figura 3.5	Configuração do experimento.....	36
Figura 3.6	Variação do contraste térmico em função da velocidade do vento .....	37
Figura 3.7	Variação do contraste térmico em função carregamento solar .....	37
Figura 3.8	Variação do contraste térmico para as velocidades médias de vento.....	38
Figura 3.9	Bloco de concreto utilizado na simulação .....	39
Figura 4.1	Posicionamento do disco de poliestireno durante a moldagem da amostra (a), amostra moldada (b).....	42
Figura 4.2	Amostra pronta para a realização dos ensaios .....	42
Figura 4.3	Câmera Infravermelha FLIR B400 .....	43
Figura 4.4	Medição da temperatura refletida .....	44
Figura 4.5	Túnel de vento utilizado para o procedimento experimental .....	45
Figura 4.6	Medição da velocidade do vento com o uso do anemômetro .....	46

Figura 4.7	Ensaio preliminar realizado com duas lâmpadas infravermelhas .....	47
Figura 4.8	Corte tangencial (a) e corte transversal (b) do transdutor de fluxo de calor.....	48
Figura 4.9	Esquema de medição com o uso do transdutor de fluxo de calor .....	48
Figura 4.10	Posições em que mediu-se a radiação.....	49
Figura 4.11	Medição do campo radiante com um (a) e dois (b) aquecedores, e multímetro utilizado (c).....	50
Figura 4.12	Posicionamento dos elementos durante a fase de aquecimento.....	51
Figura 4.13	Realização dos ensaios: Fase de aquecimento (a) Fase de resfriamento (b) .....	52
Figura 4.14	Fluxograma do procedimento experimental .....	53
Figura 5.1	Divisão do elemento em pontos nodais .....	56
Figura 5.2	Forma explícita (a) e implícita (b).....	57
Figura 5.3	Ilustração da amostra utilizada na modelagem.....	60
Figura 5.4	Localização das modelagens unidimensionais .....	61
Figura 5.5	Representação dos pontos nodais .....	62
Figura 5.6	Balço de energia no ponto nodal $T_n$ .....	63
Figura 5.7	Balço de energia nos pontos nodais $T_{33}$ , $T_{34}$ , $T_{56}$ e $T_{57}$ . .....	64
Figura 5.8	Balço de energia no ponto nodal da superfície aquecida .....	67
Figura 5.9	Balço de energia no ponto nodal da superfície não aquecida.....	69
Figura 5.10	Forma esquemática para o cálculo do coeficiente de convecção natural .....	72
Figura 5.11	Forma esquemática para o cálculo de do coeficiente de convecção de natureza forçada .....	73
Figura 6.1	Temperatura da superfície para o aquecimento com lâmpada infravermelha (a) e aquecedor halógeno (b) .....	76
Figura 6.2	Medição do campo radiante para um aquecedor .....	77
Figura 6.3	Medição do campo radiante para dois aquecedores.....	78
Figura 6.4	Termogramas obtidos após 5 minutos de aquecimento ...	79
Figura 6.5	Aumento da temperatura na superfície em uma linha central .....	79
Figura 6.6	Termogramas obtidos após 5 minutos de aquecimento ...	80
Figura 6.7	Aumento da temperatura na superfície em uma linha central .....	81

Figura 6.8	Localização dos pontos empregados para a análise temporal das temperaturas .....	82
Figura 6.9	Termogramas após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) <i>minutos</i> de resfriamento .....	83
Figura 6.10	Análise temporal sem vento (profundidade = 2 <i>cm</i> ) .....	84
Figura 6.11	Evolução do contraste térmico sem vento .....	84
Figura 6.12	Termogramas após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) <i>minutos</i> de resfriamento (profundidade = 3 <i>cm</i> ) .....	85
Figura 6.13	Análise temporal sem vento (profundidade = 3 <i>cm</i> ) .....	86
Figura 6.14	Evolução do contraste absoluto .....	86
Figura 6.15	Termogramas obtidos após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) <i>minutos</i> de resfriamento .....	87
Figura 6.16	Análise temporal com vento de 1 <i>m/s</i> .....	88
Figura 6.17	Evolução do contraste térmico com vento de 1 <i>m/s</i> .....	89
Figura 6.18	Termogramas obtidos após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) <i>minutos</i> de resfriamento .....	90
Figura 6.19	Análise temporal com vento de 2 <i>m/s</i> .....	90
Figura 6.20	Evolução do contraste absoluto com vento de 2 <i>m/s</i> .....	91
Figura 6.21	Termogramas obtidos após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) <i>minutos</i> de resfriamento .....	92
Figura 6.22	Análise temporal com vento de 5 <i>m/s</i> (profundidade = 2 <i>cm</i> ) .....	92
Figura 6.23	Evolução do contraste absoluto com vento de 5 <i>m/s</i> .....	93
Figura 6.24	Termogramas obtidos após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) <i>minutos</i> de resfriamento .....	94
Figura 6.25	Análise temporal com vento de 5 <i>m/s</i> .....	94
Figura 6.26	Evolução do contraste térmico com vento de 5 <i>m/s</i> .....	95
Figura 6.27	Repetições sem ação do vento .....	96
Figura 6.28	Repetições com vento de 5 <i>m/s</i> .....	96
Figura 6.29	Resultado das medições considerando as incertezas .....	97
Figura 6.30	Contraste absoluto para o Ponto 1 .....	98
Figura 6.31	Contraste para o Ponto 1 nas diferentes profundidades de defeito .....	99
Figura 6.32	Contraste normalizado para o Ponto 1 .....	99
Figura 6.33	Contraste absoluto para o Ponto 2 .....	100
Figura 6.34	Contraste absoluto para o Ponto 3 .....	100
Figura 6.35	Localização dos pontos sobre e distante do defeito .....	102
Figura 6.36	Evolução do coeficiente de convecção natural .....	102
Figura 6.37	Evolução do coeficiente de convecção natural no tempo .....	103

Figura 6.38	Coeficiente de convecção forçada em função da velocidade .....	103
Figura 6.39	Análise temporal sem vento (profundidade = 2 cm).....	104
Figura 6.40	Contraste térmico absoluto sem vento (profundidade = 2 cm).....	105
Figura 6.41	Análise temporal sem vento (profundidade = 3 cm).....	106
Figura 6.42	Contraste absoluto sem vento (profundidade = 3 cm) ....	106
Figura 6.43	Análise temporal com vento de 1 m/s.....	107
Figura 6.44	Contraste absoluto com vento de 1 m/s .....	108
Figura 6.45	Análise temporal com vento de 2 m/s.....	108
Figura 6.46	Contraste absoluto com vento de 2 m/s .....	109
Figura 6.47	Análise temporal com vento de 5 m/s (profundidade = 2 cm).....	110
Figura 6.48	Contraste absoluto com vento de 5 m/s (profundidade = 2 cm).....	110
Figura 6.49	Análise temporal com vento de 5 m/s (profundidade = 3 cm).....	111
Figura 6.50	Contraste absoluto com vento de 5 m/s (profundidade = 3 cm).....	111
Figura 6.51	Contrastes absolutos teóricos e experimentais máximos para 2 cm .....	113
Figura 6.52	Contrastes máximos para diferentes profundidades .....	114
Figura 6.53	Contraste térmico absoluto (teórico) .....	115
Figura 6.54	Contraste térmico absoluto para diferentes profundidades (teórico).....	115
Figura A.1	Método a fluxímetro auxiliar.....	127



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 5.1	Propriedades dos materiais utilizados.....	60
Tabela 6.1	Contrastes máximos para diferentes profundidades.....	114



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2	JUSTIFICATIVA .....	2
1.3	OBJETIVOS .....	3
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	4
<b>2</b>	<b>ASPECTOS TEÓRICOS RELACIONADOS À TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA</b> .....	<b>5</b>
2.1	MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	5
<b>2.1.1</b>	<b>Transferência de Calor por Condução</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Transferência de Calor por Convecção</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Transferência de Calor por Radiação</b> .....	<b>10</b>
2.1.3.1	<i>Lei de Stefan - Boltzmann</i> .....	11
2.2	PRINCÍPIOS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA .....	12
<b>2.2.1</b>	<b>Princípios de Funcionamento</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Elementos do Sistema para aplicação da Termografia em Ensaios não Destrutivos</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Contraste Térmico</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Métodos de Termografia</b> .....	<b>19</b>
2.2.4.1	<i>Termografia Passiva</i> .....	19
2.2.4.2	<i>Termografia Ativa</i> .....	20
2.3	FATORES QUE INFLUENCIAM A ANÁLISE TERMOGRÁFICA ....	22
<b>2.3.1</b>	<b>Influências Técnicas</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Influências Atmosféricas</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Influências Climáticas</b> .....	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA COMO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO</b> .....	<b>27</b>
3.1	TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO .....	27
3.2	INFLUÊNCIA DO VENTO NAS TEMPERATURAS OBTIDAS .....	34
<b>4</b>	<b>ANÁLISE EXPERIMENTAL</b> .....	<b>41</b>

4.1	MOLDAGEM E PREPARO DAS AMOSTRAS.....	41
4.2	ELEMENTOS UTILIZADOS NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	43
<b>4.2.1</b>	<b>Câmara Infravermelha</b> .....	43
<b>4.2.2</b>	<b>Fonte de Convecção Forçada</b> .....	45
<b>4.2.3</b>	<b>Escolha da Fonte de Aquecimento</b> .....	46
<b>4.2.4</b>	<b>Medida do Campo Radiante</b> .....	47
4.3	METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS.....	50
4.4	ANÁLISE DOS DADOS.....	53
<b>5</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA</b> .....	<b>55</b>
5.1	O MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS.....	56
<b>5.1.1</b>	<b>Descrição do método</b> .....	57
<b>5.1.2</b>	<b>Crítérios de Estabilidade</b> .....	58
5.2	DISCRETIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	59
<b>5.2.1</b>	<b>Balço de Energia para o Grupo I e II</b> .....	62
<b>5.2.2</b>	<b>Balço de Energia para o Grupo III</b> .....	64
<b>5.2.3</b>	<b>Balço de Energia para o Grupo IV</b> .....	67
5.3	O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	70
<b>5.3.1</b>	<b>Convecção Natural</b> .....	71
<b>5.3.2</b>	<b>Convecção Forçada</b> .....	72
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>75</b>
6.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	75
<b>6.1.1</b>	<b>Uniformidade do Aquecimento</b> .....	76
<i>6.1.1.1</i>	<i>Determinação do Tipo de Aquecimento</i> .....	76
<i>6.1.1.2</i>	<i>Quantificação do Campo Radiante</i> .....	77
<b>6.1.2</b>	<b>Temperaturas da superfície no instante inicial de resfriamento</b> .....	78
<b>6.1.3</b>	<b>Análise Temporal das Temperaturas da Superfície</b> .....	81
<i>6.1.3.1</i>	<i>Sem vento</i> .....	83
<i>6.1.3.2</i>	<i>Com vento de 1 m/s</i> .....	87
<i>6.1.3.3</i>	<i>Com vento de 2 m/s</i> .....	89
<i>6.1.3.4</i>	<i>Com vento de 5 m/s</i> .....	92
<b>6.1.4</b>	<b>Incertezas das Medições</b> .....	96
<b>6.1.5</b>	<b>Análise do Contraste Térmico</b> .....	98
<i>6.1.5.1</i>	<i>Contrastes para o Ponto 1</i> .....	98
<i>6.1.5.2</i>	<i>Contrastes para os Pontos 2 e 3</i> .....	100

6.2	RESULTADOS TEÓRICOS .....	101
<b>6.2.1</b>	<b>Coeficiente de Convecção .....</b>	<b>101</b>
6.2.1.1	<i>Coeficiente de convecção natural .....</i>	101
6.2.1.2	<i>Coeficiente de convecção forçada.....</i>	103
<b>6.2.2</b>	<b>Análise Temporal das Temperaturas da Superfície.....</b>	<b>104</b>
6.2.2.1	<i>Sem vento .....</i>	104
6.2.2.2	<i>Com vento de 1 m/s .....</i>	107
6.2.2.3	<i>Com vento de 2 m/s .....</i>	108
6.2.2.4	<i>Com vento de 5 m/s .....</i>	109
<b>6.2.3</b>	<b>Análise do Contraste Térmico.....</b>	<b>112</b>
6.2.3.1	<i>Contrastes Teóricos e Experimental Absolutos Máximos ...</i>	113
6.2.3.2	<i>Contrastes Temporal do Contraste Térmico Teórico.....</i>	114
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>117</b>
7.1	CONCLUSÕES.....	117
7.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	119
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>121</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>127</b>
A.1	MÉTODO DE CALIBRAÇÃO.....	127



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diante das diversas manifestações patológicas a que as edificações estão sujeitas, tais como fissuras, infiltrações, delaminações, dentre outras, surge a necessidade de criarem-se métodos para detectá-las, e avaliá-las.

Existem basicamente três classes de métodos para a avaliação das estruturas: métodos destrutivos, semi-destrutivos e não destrutivos. Os métodos destrutivos avaliam uma estrutura de forma destrutiva, ou seja, podem ocorrer alterações permanentes nela. Dentre os exemplos desta classe, tem-se a extração de testemunhos, para posterior ensaio de tração, ou compressão, e a prova de carga (BUNGEY *et al.*, 2006).

Os métodos não destrutivos, por sua vez, destacam-se por não danificarem a estrutura em análise, ou exigirem pequenos reparos. Isto é, nenhuma alteração significativa é realizada no elemento. Dentre os métodos não destrutivos existentes, podem ser citados: o radar de sub-superfície, o ultrassom, a termografia infravermelha, a esclerometria, o eco-impacto, dentre outros (MALHOTRA e CARINO, 2004).

A termografia infravermelha, objeto de estudo deste trabalho, teve sua origem no século passado. Inicialmente, o método foi empregado em guerras, para a detecção de possíveis alvos durante confrontos. Com o passar dos anos, o método foi aperfeiçoado, sendo

hoje utilizado em diversas áreas, como a medicina e a engenharia. Na engenharia elétrica, o uso do método se destaca devido à sua agilidade para a detecção de pontos de aquecimento excessivo, que podem indicar possíveis sobrecargas.

Na engenharia civil, o método vem sofrendo avanços para o uso na avaliação de edificações. Engloba a busca de anomalias, tais como fissuras, infiltrações, falhas na aderência de revestimentos e materiais de reforço colados, avaliação de sistemas de isolamento, dentre outras.

Como todos os métodos de ensaio, a termografia infravermelha possui vantagens e desvantagens. Uma das suas principais vantagens é a característica não destrutiva do ensaio, consideravelmente rápido e eficaz. Outro aspecto importante da termografia é a obtenção de uma amostragem geral da anomalia, e não de um ponto específico, como ocorre em outros tipos de ensaios não destrutivos. Além disso, o resultado obtido com a termografia infravermelha é imediato.

Dentre as desvantagens, destaca-se o fato do ensaio ser realizado em ambientes geralmente expostos a ações climáticas. As intempéries que atuam sobre o elemento inspecionado podem interferir na detecção/visualização de anomalias presentes na edificação em análise.

Desta forma, a investigação das interferências, advindas de ações climáticas, passa a ser fundamental para a correta interpretação das imagens geradas por meio deste ensaio. Assim, resultados com maior grau de confiança podem ser obtidos, tornando o método da termografia infravermelha mais eficaz e útil às aplicações.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

O ensaio de termografia infravermelha, como já mencionado, caracteriza-se como uma técnica não destrutiva. Ele é realizado em superfícies que, na maioria das vezes, encontram-se em ambientes abertos. As paredes externas de uma edificação e tabuleiros de pontes se constituem em exemplos. Em virtude disso, diversos fatores climáticos podem estar envolvidos no processo de ensaio, tais como chuva, sol, umidade do ar e vento. Para que os resultados obtidos com a realização do ensaio sejam adequados, faz-se necessário que as interferências impostas pelas diferentes condições climáticas sejam consideradas.

No que diz respeito aos ensaios realizados em estruturas de concreto, trabalhos desenvolvidos por Maierhofer *et al.* (2002), Maierhofer *et al.* (2004) Maierhofer *et al.* (2007), Laaide e Belattar (2014) e Cotic *et al.* (2015) buscaram verificar a eficácia do método da



termografia ativa, sob condições controladas de laboratório, na detecção de defeitos de diferentes tamanhos, posicionados em diferentes profundidades.

Trabalhos desenvolvidos por Washer *et al.* (2009), Lehmann *et al.* (2013), Van De Vijver *et al.* (2014) e Rumbayan e Washer (2014) buscaram analisar a influência dos fatores climáticos nas inspeções termográficas por meio da termografia passiva e/ou por meio de simulações numéricas. No entanto, em nenhum destes estudos verificou-se a influência de fatores climáticos sob condições controladas de laboratório.

Especificamente em relação à ação do vento, que tem influência na transferência de calor por convecção, este pode esfriar a superfície em análise (BARREIRA, 2004; MALDAGUE, 2001; BALARAS E ARGIRIOU, 2002). De acordo com ASTM D4788, que fornece informações sobre a realização dos ensaios termográficos em pontes, os ensaios não devem ser efetuados quando a velocidade do exceder 4,4 m/s. A variação da temperatura da superfície em análise, devido à ação do vento, pode diminuir o contraste térmico entre a região com defeito e as demais. Desta forma, anomalias, muitas vezes graves, podem não ser detectadas, obtendo-se a incorreta conclusão de que o elemento se encontra em boas condições.

Diante deste contexto, a proposta de pesquisa deste trabalho objetiva analisar a influência do vento no método da termografia infravermelha, aplicado em estruturas de concreto, sob condições controladas de laboratório. É enfatizada a diferença entre os contrastes térmicos gerados para o ensaio realizado sem a ação do vento e com vento em velocidades distintas, considerando-se diferentes profundidades de defeito. Desta forma, busca-se contribuir para o aperfeiçoamento dos procedimentos de ensaio deste método.

### 1.3. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar a influência do vento na detecção de defeitos próximos à superfície (ou sub-superficiais) por termografia infravermelha em estruturas de concreto.

Dentre os objetivos específicos, abaixo estão elencados os principais.

- Verificar a eficácia de uma análise qualitativa na detecção do defeito para diferentes profundidades.

- Avaliar quantitativamente a diferença do contraste térmico obtido nos ensaios realizados com, e sem, a presença de vento.
- Verificar as velocidades de vento que possuem maior influência no decaimento do contraste térmico.
- Avaliar para quais profundidades de defeito o vento exerce maior influência no contraste térmico.
- Elaborar uma modelagem matemática do problema, utilizando o método das diferenças finitas unidimensional, e comparar com os resultados obtidos experimentalmente.

#### 1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este documento está estruturado em oito capítulos, incluindo-se as referências bibliográficas, e um anexo. Na sequência, tem-se a descrição principal de cada um dos capítulos.

No Capítulo 1, descreve-se a introdução, a justificativa e os objetivos desta pesquisa.

No Capítulo 2, apresentam-se aspectos físicos relacionados à termografia infravermelha, e os princípios técnicos do ensaio termográfico.

No Capítulo 3, são elencados os trabalhos realizados utilizando-se a termografia infravermelha como ensaio não destrutivo. Inicialmente, é abordado o uso da termografia em estruturas de concreto. Após, são descritos trabalhos que avaliam a influência do vento nos ensaios termográficos.

No Capítulo 4, descreve-se o procedimento experimental adotado na pesquisa, sendo detalhadas todas as etapas relacionadas à obtenção dos resultados.

No Capítulo 5, a modelagem matemática desenvolvida nesta pesquisa é apresentada.

No Capítulo 6, são expostos e discutidos os resultados obtidos.

O Capítulo 7 traz as conclusões principais do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, o Capítulo 8 apresenta as referências bibliográficas que serviram de base para a elaboração deste trabalho.

## **CAPÍTULO 2**

### **ASPECTOS TEÓRICOS RELACIONADOS À TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**

---

A termografia infravermelha é caracterizada como um método de ensaio não destrutivo que, quando empregado em trabalhos de inspeção em estruturas de concreto, determina a distribuição de temperaturas da superfície. Esta determinação é feita por meio da radiação infravermelha emitida por ela. Diante disto, percebe-se a importância do estudo dos conceitos relacionados à transferência de calor, para o melhor entendimento deste tipo de ensaio.

Este capítulo aborda os conceitos relacionados ao ensaio da termografia infravermelha. Em sua primeira parte, são discutidos os modos de transferência de calor. Após, realiza-se um estudo sobre os princípios de funcionamento do ensaio termográfico. Por fim, são abordados os fatores que influenciam a análise termográfica.

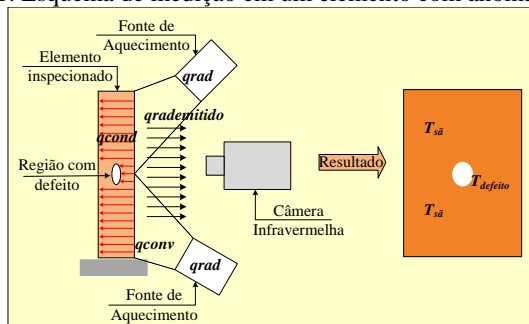
#### **2.1. MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR**

O estudo da termodinâmica mostra que, quando dois objetos se encontram em diferentes temperaturas, ocorre uma transferência de energia entre eles. Esta energia transferida é denominada calor. Quando os objetos estiverem em equilíbrio térmico, ou seja, atingirem a mesma temperatura, o processo de transferência é finalizado (HALLIDAY e RESNICK, 2009).

A transferência de calor pode ocorrer através de três mecanismos: condução, convecção e radiação. O calor chega até a parede externa por meio da convecção e da radiação, e é através da condução que ele é transferido para o ambiente interno. A existência de uma anomalia, como por exemplo um vazio, interna à estrutura funciona como uma barreira para a transferência de calor por condução, originando uma variação de temperatura nesta região. A termografia infravermelha baseia-se na determinação da distribuição de temperaturas da superfície logo, a existência de uma anomalia é detectada quando ocorre uma não uniformidade na temperatura da superfície em análise (MALDAGUE, 2001).

A Figura 2.1 ilustra um esquema de medição em um elemento que possui uma anomalia interna.

Figura 2.1. Esquema de medição em um elemento com anomalia.



No que diz respeito à ação do vento, ele exerce influência na transferência de calor por convecção. Sua velocidade é uma das variáveis a serem consideradas na determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção.

Abaixo, serão descritas mais detalhadamente as formas de transferência de calor. Estes conceitos serão também abordados no Capítulo 5, onde é descrita a modelagem matemática adotada neste trabalho.

### 2.1.1. Transferência de Calor por Condução

A propagação de calor por condução ocorre por meio do choque entre as partículas de elementos que se encontram em diferentes temperaturas. Esta energia é transferida das partículas mais energéticas

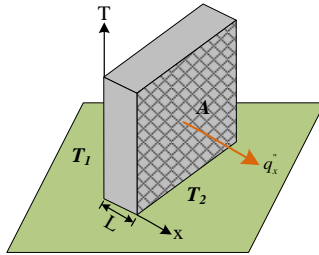
para as menos energéticas. A lei da condução térmica permite a definição da quantidade de energia que flui, em uma determinada área, durante um intervalo de tempo (INCROPERA *et al.*, 2008).

Considerando-se a parede ilustrada pela Figura 2.2, com uma distribuição de temperatura  $T(x)$ , a taxa de transferência de calor por condução pode ser representada da seguinte forma:

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

Onde:  $q_x''$  é a taxa de transferência de calor na direção  $x$  por unidade de área de parede ( $W/m^2$ ),  $\lambda$  é a condutividade térmica do material ( $W/(m \cdot K)$ ), e  $dT/dx$  é o gradiente de temperatura nesta mesma direção.

Figura 2.2. Transferência de calor por condução em uma parede com área  $A$ .



Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2008).

Em estado estacionário, considerando-se que as propriedades não mudam com o tempo, e que a distribuição de temperaturas é linear, o gradiente de temperatura pode ser representado por:

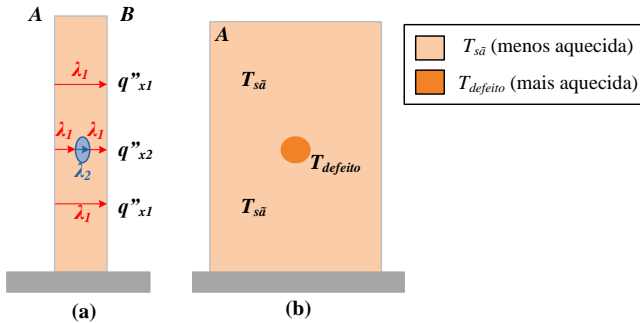
$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.2)$$

Substituindo a Equação 2.2 na 2.1, a taxa de transferência por condução  $q_x$  (W) na parede plana de área  $A$ , mostrada na Figura 2.2, é dada por:

$$q_x = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} \cdot A \quad (2.3)$$

A condutividade térmica  $\lambda$  representa a capacidade de cada material conduzir energia térmica. Esta propriedade explica a mudança na temperatura da superfície, na região em que se encontra uma anomalia interna. Esta região possui uma condutividade térmica distinta da região sem anomalia, o que conseqüentemente gera uma taxa de transferência de calor diferente. A Figura 2.3 ilustra a transferência de calor  $q''_{x1}$  para a região sem anomalia, e  $q''_{x2}$  para a região com anomalia.

Figura 2.3. Transferência de calor por condução em uma parede com defeito (a) vista lateral e (b) vista frontal da face A.



Como a taxa  $q''_{x1}$  será diferente da taxa  $q''_{x2}$ , origina-se um ponto com temperatura diferente na superfície, como se pode observar na parte (b) da figura.

Desta forma, uma análise cautelosa da distribuição de temperaturas superficiais, obtida pelo ensaio de termografia, é de extrema importância para que os resultados sejam confiáveis pois, um ponto que apresenta uma temperatura diferente dos demais pode indicar a presença de uma anomalia (MALDAGUE, 2001).

### 2.1.2. Transferência de Calor por Convecção

Quando um fluido em movimento e uma superfície se encontram em diferentes temperaturas ocorre a transferência de calor denominada convecção. Esta pode ser classificada como natural ou forçada, de acordo com a natureza de escoamento do fluido. Quando o escoamento é causado por meios externos, como vento, por exemplo, a convecção é dita forçada. Quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo, que podem ser originadas pela variação na densidade dos fluidos, a convecção é dita natural (INCROPERA *et al.*, 2008).

A taxa de transferência de calor por convecção é conhecida pela lei do resfriamento de Newton. Esta lei estabelece que, o fluxo de calor entre elementos com diferentes temperaturas é proporcional à diferença de temperatura. A equação que descreve esta taxa é dada por:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.4)$$

Onde:  $q''$  é o fluxo de calor por convecção ( $W/m^2$ ),  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/(m^2 \cdot K)$ ),  $T_s$  é a temperatura da superfície, e  $T_\infty$  a temperatura do fluido.

O coeficiente de transferência de calor  $h$  é um fator de proporcionalidade entre o fluxo de calor e a diferença de temperatura, sendo a sua determinação o principal objetivo do estudo da convecção. Este coeficiente é dependente de fatores relacionados à superfície e ao fluido, tais como: tipo de superfície, propriedades do fluido (calor específico, densidade, viscosidade e condutividade térmica), e natureza do escoamento.

A diferença de temperatura entre a superfície e o fluido em seu entorno origina uma camada limite térmica. Desta forma, além da divisão entre a convecção natural e forçada, é necessário verificar se esta camada limite se encontra em regime laminar, ou turbulento. O regime laminar é caracterizado pelo escoamento regular do fluido, enquanto, no regime turbulento o fluido se movimenta de maneira irregular. Um conjunto de parâmetros adimensionais é utilizado para a determinação do regime do escoamento, dependendo de sua natureza (natural, ou forçada). O coeficiente de convecção  $h$  pode ser determinado para um ponto específico na superfície, chamado coeficiente local  $h$ , ou para toda a superfície, sendo chamado coeficiente médio  $\bar{h}$  (INCROPERA *et al.*, 2008).

A equação que fornece o valor do coeficiente de convecção médio é dada por:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda}{L} \quad (2.5)$$

Onde:  $\lambda$  é a condutividade térmica do fluido ( $W/(m \cdot K)$ ),  $L$  é o comprimento da superfície ( $m$ ), paralelo ao escoamento, e  $Nu$  é o número de Nusselt (*adimensional*).

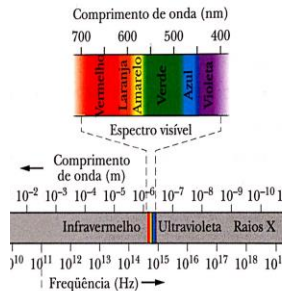
O número de Nusselt ( $Nu$ ) é determinado por meio de parâmetros, calculados diferentemente para a convecção natural e forçada. Estes parâmetros dependem basicamente do número de Rayleigh ( $Ra$ ) e do número de Reynold ( $Re$ ), para a convecção natural e forçada, respectivamente.

O vento, parâmetro em análise nesta pesquisa, faz parte da convecção forçada, e sua velocidade é uma das variáveis a serem consideradas no cálculo do número de Reynold ( $Re$ ). No Capítulo 5, está detalhadamente demonstrada a metodologia de cálculo destes parâmetros, necessários à determinação do coeficiente de convecção ( $h$ ) que foi utilizado na modelagem matemática aplicada nesta pesquisa.

### 2.1.3. Transferência de Calor por Radiação

A temperatura designada zero absoluto ( $-273,15^\circ C$ ) é aquela na qual a energia térmica equivale a zero. Todas as superfícies que estão a uma temperatura acima desta transferem energia. Esta transferência de energia ocorre por meio da emissão de ondas eletromagnéticas, formadas a partir de campos elétricos e magnéticos. A Figura 2.4 traz a representação de um espectro eletromagnético destacando as regiões próximas ao infravermelho.

Figura 2.4. Espectro eletromagnético na região próxima ao infravermelho.



Fonte: Adaptado de Halliday e Resnick (2009).

A termografia infravermelha, faz uso da radiação infravermelha, que possui um comprimento de onda entre  $10^{-7}$  e  $10^{-3} m$ . Para quantificar a taxa de transferência de calor, por radiação, é necessário inicialmente o conhecimento de conceitos relacionados à radiação de um corpo negro e de um corpo real, que serão descritos na sequência.



### 2.1.3.1 Lei de Stefan - Boltzmann

Denomina-se corpo negro, ou radiador ideal, aquele que absorve toda a radiação que nele incide. A lei de Stefan-Boltzmann descreve fisicamente o comportamento da radiação emitida por um corpo negro.

A radiação emitida por um elemento se origina da energia térmica referente à matéria delimitada pela sua superfície. O poder emissivo para o radiador ideal é definido como a taxa de energia liberada por unidade de área ( $W/m^2$ ), sendo dado por:

$$E_b = \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.6)$$

Onde:  $E_n$  é o poder emissivo do corpo negro ( $W/m^2$ ),  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ), e  $T_s$  é a temperatura absoluta ( $K$ ).

A emissividade é o termo que designa a capacidade de um objeto qualquer emitir radiação eletromagnética, comparado a um corpo negro com a mesma temperatura (GARCIA, 2014). Ela está associada a fatores como: temperatura, ângulo de emissão e comprimento de onda. E também a fatores característicos da superfície do material, como geometria e composição química.

Os corpos reais não possuem o mesmo comportamento do radiador perfeito, ou seja, o corpo real não absorve, nem emite toda a energia nele incidente tendo, desta forma, um valor de emissividade menor que 1 (INCROPERA *et al.*, 2008). Assim, para uma superfície real, a emissão de energia é menor do que a de um radiador ideal, com a mesma temperatura. Isto faz com que a Equação 2.6 se torne:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.7)$$

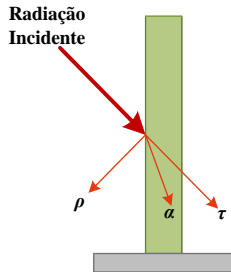
Onde:  $\varepsilon$  é a emissividade.

Quando um corpo real é atingido pela radiação, ele pode apresentar três reações: absorção ( $\alpha$ ), reflexão ( $\rho$ ) e transmissão ( $\tau$ ). A parcela de irradiação absorvida por um corpo é denominada absorvidade, à quantidade refletida pela superfície, dá-se o nome de refletividade e a parcela transmitida pela superfície é chamada de transmissividade (ÇENGEL, 2009). Desta forma, tem-se que:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.8)$$

A Figura 2.5 representa os fenômenos que ocorrem quando um elemento real é atingido pela radiação.

Figura 2.5. Absorção ( $\alpha$ ), reflexão ( $\rho$ ) e transmissão ( $\tau$ ).



A energia térmica de um material aumenta com a quantidade de irradiação que ele absorve. Algumas leis estabelecem que a capacidade de um corpo absorver energia radiante incidente é sempre a mesma dele emitir sua energia, em forma de radiação infravermelha (poder emissivo).

Diante destes conceitos físicos, relacionados à transferência de calor, os princípios de funcionamento da termografia infravermelha serão tratados a seguir.

## 2.2. PRINCÍPIOS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A palavra termografia tem como significado “escrever com calor”. Da mesma forma que fotografia significa “escrever com luz”. A imagem gerada pela câmera infravermelha é chamada termograma, ou imagem térmica. A emissão da radiação infravermelha de cada objeto é o que torna possível a geração destas imagens (KERSUL, 2014).

As primeiras imagens realizadas com o uso do sistema infravermelho são datadas de 1800, quando o astrônomo William Herschel utilizou uma técnica conhecida como evaporográfica (HOLST, 2000). Esta técnica se baseava na evaporação do álcool, obtido em uma superfície pintada com carbono. Em 1880, Samuel Langley produziu o primeiro equipamento conhecido por balômetro.

O primeiro detector, baseado na interação entre fótons da radiação infravermelha e elétrons do material, foi desenvolvido por Casem em 1917. Já o primeiro termograma foi registrado por Czerny em 1929.

Em meados de 1940, período da segunda guerra mundial, utilizou-se o sistema de visão noturna para realizarem-se ataques aos inimigos. Em virtude disto, os aliados desenvolveram a FLIR (*Foward Looking Infrared*), equipamento utilizado com o objetivo de visualizar a presença de pessoas em ambientes com pouca visibilidade, como à noite ou sob neblina.

Em 1946, deu-se origem ao *scanner* de infravermelhos para uso militar. Este equipamento, possibilitava a geração de um termograma em poucas horas. Já em 1954, o sistema era capaz de gerar um termograma em apenas *45 minutos*.

Um salto significativo ocorreu entre 1960 e 1970, quando o tempo para gerar uma imagem passou de *45* para *5 minutos*. Por meio destas imagens, era possível ainda determinar a temperatura do corpo. Um sistema designado ENOUX, que permitia simultaneamente a visão termográfica e óptica, foi desenvolvido em 1975.

A primeira imagem, produzida em tempo real, foi gerada entre 1980 e 1990. Juntamente com a agilidade na produção das imagens, os processos de captura e tratamento delas foram aperfeiçoados (MENDONÇA, 2008).

### **2.2.1. Princípios de Funcionamento**

A termografia infravermelha se baseia no princípio físico de que todo objeto com temperatura acima de zero absoluto emite radiação eletromagnética, em função da excitação das moléculas que o constituem.

O método é baseado nos princípios da condutividade térmica dos materiais, tendo por base dois grandes fundamentos:

- i) Todos os corpos emitem uma radiação térmica, dependente da sua temperatura. Os materiais que compõem uma estrutura se comportam de maneira diferente, devido à sua condutividade térmica e ao seu calor específico. Isto origina diferenças de temperatura na superfície do elemento, quando submetido às mesmas solicitações térmicas.

- ii) A presença de ar, no interior de um elemento, origina um decréscimo de condutividade térmica, alterando a temperatura na sua superfície.

A inspeção termográfica por infravermelho é realizada utilizando-se uma câmera termográfica, sensível às radiações infravermelhas, que decodifica a imagem em cores equivalentes às diferentes temperaturas. A câmera termográfica detecta a energia infravermelha (calor), convertendo-a em sinal elétrico. Após, são produzidas imagens (termogramas), a partir do cálculo destas temperaturas. Quando o ensaio é finalizado, os termogramas podem ser visualizados em diferentes formas, de acordo com os objetivos da análise. As funções mais importantes do equipamento são (GARCIA, 2014):

- Alteração da sensibilidade e do nível de temperatura;
- Realização de leituras de temperatura em pontos a definir;
- Obtenção de diferenças de temperatura entre pontos;
- Visualização dos pontos de temperatura máxima, média e mínima;
- Definição de um valor máximo, ou mínimo, de temperatura, associado a um alarme que dispara e fixa a imagem, quando os valores definidos são atingidos;
- Visualização de curvas de temperatura nas direções horizontal e vertical, segundo as posições dos eixos do cursor;
- Visualização das zonas isotérmicas em cores, estando as distribuições restantes de temperatura em escala cinza.

A imagem é o principal fator que torna a termografia uma ferramenta de ensaio única e valiosa, pois é por meio dela que se torna possível detectarem-se anomalias. A análise destas imagens pode ser feita de forma qualitativa ou quantitativa.

Os métodos qualitativos são utilizados de forma mais ampla. Eles consideram a dependência dos padrões térmicos, para revelar a existência de anomalias, e sua localização. Já a termografia quantitativa utiliza a temperatura como critério para a determinação da severidade de uma anomalia. A partir disso, são então estabelecidos os critérios de reparo (PEREIRA, 2014).

Em estruturas de concreto, o ensaio estima a temperatura de determinada superfície. Esta temperatura é dependente basicamente de

três fatores: as propriedades da sub superfície, as condições de superfície, e as condições do meio ambiente.

O primeiro fator baseia-se no princípio de que o calor não pode ser impedido de transferir-se para áreas mais frias. O calor pode somente se mover em diferentes taxas, dependentes da condutividade térmica dos materiais, através dos quais ele é transferido. Diferentes tipos de defeito no concreto apresentam valores de condutividade térmica distintos. Por exemplo, bolhas de ar, ou corrosão (relacionada a delaminações), têm uma condutividade menor do que o concreto sólido envoltório.

Já o segundo fator está associado às condições da superfície que está sendo analisada. A capacidade de uma superfície transmitir energia está associada à radiação. Como já abordado, a emissividade é o fator que determina a capacidade que a superfície possui em irradiar energia, comparando-se a um radiador perfeito. Portanto, durante o procedimento de ensaio, deve-se estar ciente da existência de diferentes texturas na superfície, causadas, por exemplo, por detritos (MALHOTRA e CARINO, 2004).

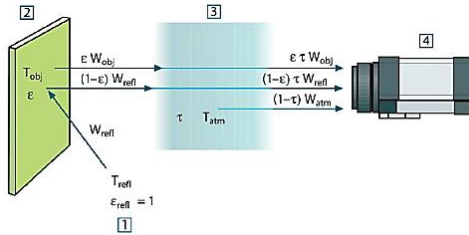
O terceiro e último fator está relacionado a condições ambientais, tais como: carregamento solar, chuva, temperatura ambiente, nuvens, e velocidade do vento.

### **2.2.2. Elementos do Sistema para aplicação da Termografia em Ensaio não Destrutivo**

A termografia infravermelha, aplicada a ensaios não destrutivos, é basicamente constituída pelos seguintes elementos: objeto a ser avaliado, fonte de excitação térmica, câmera infravermelha e um sistema de processamento.

Inicialmente, é necessário que o elemento em análise sofra uma estimulação térmica. Esta pode ser realizada por meios naturais, ou artificiais, descritos na sequência (Seção 2.3.4). A câmera infravermelha faz a aquisição da radiação emitida pelo elemento em análise. Porém como o elemento se encontra inserido em um meio, além da radiação por ele emitida ( $W_{objeto}$ ), há a radiação emitida pelo ambiente e refletida pela superfície ( $W_{superficie}$ ), e ainda a radiação da atmosfera que se encontra entre o objeto em análise e a câmera ( $W_{atmosfera}$ ) (CALDEIRA, 2016). Tais componentes de irradiação são ilustrados na Figura 2.6.

Figura 2.6. Representação esquemática da radiação recebida pela câmera infravermelha.



Fonte: Adaptado de Manual de Utilizador da FLIR (2010).

Desta forma, considerando-se as trocas de calor citadas, a energia total recebida pela câmera pode ser quantificada por meio da seguinte equação:

$$W_{total} = \tau\epsilon W_{elemento} + (1-\epsilon)\tau W_{refletido} + (1-\tau)W_{atmosfera} \quad (2.9)$$

Onde:  $W_{elemento}$  é a radiação emitida pelo objeto,  $W_{refletido}$  é a radiação emitida pelo meio adjacente,  $W_{atmosfera}$  é a radiação emitida pela atmosfera,  $\epsilon$  é a emissividade do elemento, e  $\tau$  é a transmitância atmosférica.

A câmera infravermelha, que faz a leitura das radiações emitidas pelo elemento em análise, pelo meio, e pela atmosfera, possui como principal componente o detector. O detector, que converte a energia recebida em sinal elétrico, pode ser do tipo térmico, ou de fótons.

Dentre os detectores térmicos, destacam-se as termopilhas e os bolômetros. Estes, caracterizam-se pela variação de alguma propriedade física, como resposta da mudança de temperatura. Possuem uma resposta espectral ampla e uniforme, por absorverem todos os comprimentos de onda, e ainda trabalham em temperatura ambiente.

Um exemplo de detector de fótons é o detector de Mercúrio-Cádmio-Telúrio. Eles liberam cargas elétricas, como resposta à radiação incidente, e apresentam melhor desempenho, quando atuantes em temperaturas abaixo de zero. Por conta disso, precisam de um processo de resfriamento, que pode ser elétrico, ou criogênico. Em uma comparação dentre os detectores térmicos e os de fótons, verifica-se que os primeiros possuem um tempo de resposta lento e uma baixa sensibilidade.

Por fim, o sistema de processamento é responsável pela avaliação quantitativa dos termogramas gerados nos ensaios. Com o uso de programas computacionais especializados, torna-se possível a geração de gráficos com os perfis das temperaturas.

O campo de visão instantâneo (*instantaneous field of view – IFOV*) é outro importante aspecto para a execução do ensaio termográfico (CALDEIRA, 2016). Ele define o menor detalhe de imagem que pode ser percebido, e está associado ao tamanho do detector e à óptica do sistema. O *IFOV* é equivalente à projeção de um *pixel* na superfície observada. O campo de visão (*field of view – FOV*) é a área total que pode ser vista pelo termovisor, sendo formado pela soma de todos os *IFOVs*.

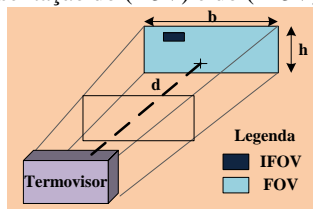
A equação que determina o *IFOV* é dada por:

$$IFOV = \frac{FOV}{px} \quad (2.10)$$

Onde: *IFOV* é o campo de visão instantâneo (*mrad*), *FOV* é o campo de visão (*mrad*), e *px* é o número de *pixels*.

Na Figura 2.7 é realizada uma representação dos campos de visão anteriormente citados, juntamente como a distância entre o termovisor e o objeto inspecionado.

Figura 2.7. Representação do (*FOV*) e do (*IFOV*) de um termovisor.



Existem ainda dois parâmetros utilizados para estimar a distância entre a superfície e o termovisor. O primeiro define a distância máxima para a qual um objeto, de tamanho determinado, seja detectado. Como o *IFOV* é frequentemente fornecido pelos fabricantes, o cálculo desta distância pode ser determinado da seguinte forma:

$$d = \frac{D}{IFOV} \quad (2.11)$$

Onde:  $d$  é a distância em que um objeto de tamanho determinado pode ser detectado ( $m$ ),  $D$  é o tamanho do objeto sob inspeção ( $m$ ), e  $IFOV$  é o campo de visão instantâneo ( $rad$ ).

O segundo fator define o menor objeto que pode ter sua temperatura medida com exatidão, para uma determinada distância. Ele é chamado por alguns fabricantes de campo de visão instantâneo de medida (*measuring instantaneous fiels of view – MIFOV*). Geralmente, este fator é inferior à resolução espacial, e não tem seu valor fornecido pelos fabricantes. Cabe salientar que, na maioria das vezes, as leituras obtidas fora destes limites de resolução são menores do que a leitura real, influenciando o resultado da análise.

Quando o *MIFOV* é fornecido pelo fabricante, a distância máxima para que um objeto, de determinado tamanho, possa ter sua temperatura lida com exatidão é dada por

$$d_m = \frac{D}{MIFOV} \quad (2.12)$$

Onde:  $d_m$  é a distância para um objeto de tamanho  $D$  ter sua temperatura detectada com exatidão ( $m$ ),  $D$  é o tamanho do objeto sob inspeção ( $m$ ), e *MIFOV* é o campo de visão instantâneo de medida ( $rad$ ).

### 2.2.3. Contraste Térmico

O contraste térmico é utilizado no estudo dos termogramas com o intuito de avaliar a visibilidade de um defeito, de forma quantitativa e/ou qualitativa. A partir deste parâmetro é possível a determinação de variáveis, tais como o tamanho e a profundidade do defeito (MALDAGUE, 2001). Dentre as definições utilizadas para o contraste térmico, a que é frequentemente utilizada é a de contraste térmico absoluto. O contraste térmico absoluto é dado pela diferença de temperatura entre uma região com defeito e uma região íntegra, (RODRÍGUEZ, 2014) dada por:

$$C^a(t) = T_{def}(t) - T_s(t) \quad (2.13)$$



Onde:  $T_{def}$  é a temperatura na região com defeito,  $T_s$  é a temperatura na região íntegra, e  $t$  é a variável tempo.

## 2.2.4. Métodos de Termografia

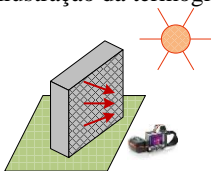
Como citado anteriormente, para o ensaio termográfico, existem dois modos de excitação térmica do corpo. Eles permitem o aumento da temperatura, e conseqüentemente o aumento da radiação. São eles: termografia passiva, e termografia ativa.

Basicamente, a termografia passiva abrange as situações nas quais o material contém um armazenamento interno de energia térmica, ou é estimulado por uma fonte natural de calor. Já a termografia ativa abrange as situações nas quais o aquecimento dos materiais é originado de forma artificial. A escolha do método a ser empregado é dependente: das condições do ambiente no qual o ensaio está sendo realizado, do tipo de material, e ainda, das características da anomalia que se pretende detectar.

### 2.2.4.1 Termografia Passiva

A termografia passiva ocorre sem a interferência de uma fonte externa artificial de aquecimento da superfície analisada. O estímulo de energia ocorre somente por meio de carga solar. Deve existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto em análise, e o ambiente no qual ele está inserido (MALDAGUE, 2001). A Figura 2.8 ilustra um caso de termografia infravermelha passiva.

Figura 2.8. Ilustração da termografia passiva.



A partir da existência de uma distribuição não uniforme de temperaturas, é possível detectar-se uma anomalia. Suspeitas de anomalia ocorrem caso a diferença de temperatura, entre o objeto e o ambiente, variar de 1 a 2°C. Diferenças de temperatura acima de 4°C geram grandes indícios de anomalia (PEREIRA, 2014).

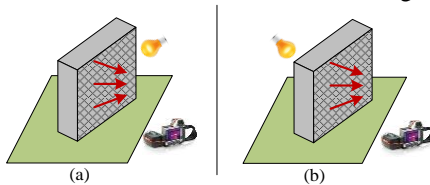
A técnica da termografia passiva responde pela maioria das aplicações do método, sendo bastante utilizada em serviços de manutenção e de prevenção (MALDAGUE, 2002).

### 2.2.4.2 Termografia Ativa

Na termografia ativa, é necessário um estímulo externo para produzir um contraste térmico, em zonas que se encontram em equilíbrio térmico. Este estímulo pode ser transmitido por meio de fontes simples de energia artificial, como por exemplo: lâmpadas, *flashes*, e jatos de ar quente. Ou, a partir de fontes mais sofisticadas, como pulsos ultrassônicos, micro-ondas, e laser (CORTIZO, 2007).

Para a técnica de termografia ativa, existem duas possibilidades relacionadas à fonte de calor: transmissão e reflexão (RODRÍGUEZ, 2014). Na transmissão, a câmera infravermelha fica posicionada do lado oposto ao aquecimento, sendo representada pela Figura 2.9 (a). Enquanto que, na reflexão, ela fica posicionada no mesmo sentido do aquecimento, sendo mostrada na Figura 2.9 (b).

Figura 2.9. Possibilidades de técnicas de termografia ativa.

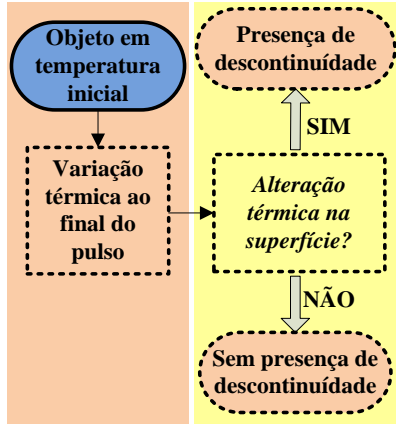


A escolha do método depende da profundidade da anomalia que se deseja observar. Depende também da forma como a energia térmica se espalha, durante a propagação (OMAR *et al.*, 2006).

Dentro da gama de possíveis tipos de termografia ativa, destaca-se a termografia pulsada. Esta técnica utiliza pequenos estímulos térmicos, cujo tempo de aplicação varia, conforme o tipo de material da superfície. (SCHOROEDER *et al.*, 2002).

O processo de termografia pulsada consiste em um breve aquecimento do corpo, independentemente do sentido de aquecimento (transmissão ou reflexão). Após, as características da variação da temperatura são monitoradas (DE MELO, 2009). A Figura 2.10 apresenta um fluxograma que ilustra qualitativamente as etapas do processo.

Figura 2.10. Etapas da termografia pulsada.



A mudança de temperatura na superfície se deve à difusividade térmica do material, e às perdas de calor por convecção e radiação. A existência de uma anomalia, no elemento analisado, gera zonas de diferentes temperaturas, pois ocorre uma redução na taxa de difusão.

Existe ainda uma relação entre o tempo de observação e a profundidade de uma descontinuidade (MALDAGUE, 2001). Esta relação se refere ao tempo de observação  $t$ , como uma função do quadrado da profundidade do defeito (ALLPORT e MCHUGH, 1998). Ela é representada por:

$$t \sim \frac{z^2}{\alpha} \quad (2.14)$$

Onde:  $z$  é a profundidade do defeito e  $\alpha$  é a difusividade térmica do material.

De acordo com a Equação 2.14, percebe-se que materiais com alta difusividade térmica respondem à reflexão, causada por uma descontinuidade, em um baixo intervalo de tempo.

Já os materiais com baixa difusividade térmica respondem em maiores intervalos de tempo. Para que um defeito seja detectado, uma estimativa é feita baseando-se na seguinte ideia: o raio da menor descontinuidade deve ser uma vez, ou duas vezes, maior do que a profundidade abaixo da superfície (DE MELO, 2009). A seguir, estão apresentados os fatores que influenciam a análise termográfica.

## 2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A ANÁLISE TERMOGRÁFICA

As aplicações com termografia infravermelha, abordadas no decorrer deste documento, são normalmente realizadas em locais abertos. Desta forma, a obtenção de resultados confiáveis depende do conhecimento das influências externas, impostas a todas as etapas do procedimento de ensaio. Estas influências podem estar relacionadas a diversos fatores, tais como: qualificação do inspetor, equipamento utilizado, características do objeto sob inspeção, e condições do meio em que a inspeção está sendo realizada.

Apesar de ser um ensaio relativamente simples, cuidados devem ser tomados antes, durante, e após o ensaio, para que os resultados não levem a conclusões precipitadas.

Em um termograma, irregularidades na temperatura superficial podem não apenas serem originadas por danos no objeto inspecionado. Elas podem também ser resultantes de fatores externos, tais como (BARREIRA, 2004):

- condições térmicas do objeto e do ambiente, antes e durante o ensaio;
- presença de fontes externas, como reflexão, superfícies com diferentes acabamentos, sombra, dentre outros;
- condições específicas de medição, tais como emissividade utilizada, temperatura e umidade do ar, distância entre câmera e objeto, definições do equipamento, dentre outras.

Estes aspectos são abordados na sequência, sendo divididos nos seguintes tópicos de abrangência: influências técnicas, influências atmosféricas e influências climáticas.

### 2.3.1. Influências Técnicas

Durante o processo de inspeção termográfica, dois pontos que possuem grande influência nos resultados são: a qualificação do inspetor, e o equipamento utilizado no ensaio. Caso o termografista não esteja apto a realizar o ensaio, ou o equipamento utilizado não seja adequado à situação, é muito provável que ocorram incertezas relacionadas às anomalias encontradas, e também à qualidade dos termogramas.

Em virtude da importância deste assunto, são abordados aspectos relacionados à qualificação do inspetor. São expostas as normas técnicas associadas ao ensaio, e discutida a escolha do equipamento utilizado, enfatizando-se a realização de ensaios voltados à engenharia civil.

A qualificação do inspetor é de extrema importância para a obtenção de resultados satisfatórios, a partir de ensaios com termografia infravermelha. É necessário que o termografista conheça todas as propriedades relacionadas à câmera, e também à superfície em análise. Em virtude disso, é necessário o conhecimento relacionado à transferência de calor, principalmente por radiação infravermelha. É importante também que o termografista tenha conhecimento da influência que os fatores climáticos exercem sobre o ensaio.

Além de um termografista instruído, a utilização de um equipamento adequado é primordial para a obtenção de bons resultados no ensaio termográfico. Para tanto, o inspetor deve saber qual equipamento melhor se enquadra ao tipo de ensaio a ser realizado. Esta escolha está associada ao conhecimento das características técnicas do equipamento, dos fatores ambientais onde o ensaio será realizado, e das propriedades do elemento a ser analisado (DOS SANTOS, 2012).

A emissividade é um dos principais parâmetros a ser analisado para a obtenção de resultados coerentes. Isto porque a radiação emitida pelos materiais, e captada pelo termovisor, está diretamente relacionada a esta propriedade. Os valores de emissividade variam entre 0 a 1, para um refletor perfeito e para o emissor perfeito (corpo negro) respectivamente. A emissividade pode ainda variar com a direção de observação relativa à superfície, com o comprimento de onda, e com a temperatura da superfície (GAUSSORGUES, 1994).

Um mesmo material pode ter diferentes valores de emissividade, dependendo do estado da sua superfície, que pode ser pintada, polida ou oxidada. Além disso, diferentes geometrias podem modificar o valor da emissividade. Formas convexas, por exemplo, diminuem este valor, enquanto que formas côncavas aumentam (OLIVEIRA, 2012).

Existem algumas tabelas que fornecem a emissividade dos materiais, mas estes valores podem ser variáveis. Para que se possa fazer uso destes parâmetros, é necessário verificar as condições de acabamento da superfície, o ângulo de medição e a temperatura do ensaio (BARREIRA, 2004). Quando o uso destes parâmetros não for adequado às condições do ensaio, a emissividade pode ser determinada por meio de métodos prescritos em normas.

### **2.3.2. Influências Atmosféricas**

A transmitância atmosférica é a parcela de radiação transmitida pela atmosfera. A câmera infravermelha capta a radiação térmica do elemento inspecionado, e fornece dados sobre a distribuição de calor. Porém a atmosfera pode interferir na radiação térmica emitida pelas superfícies, devido à ação dos seguintes fenômenos: absorção, dispersão, emissão e turbulência (CHRZANOWSKI, 2001).

Absorção é o fenômeno no qual as moléculas presentes na atmosfera absorvem a energia dos fótons que atuam sobre a superfície, provocando uma atenuação na radiação. Os maiores responsáveis por esta absorção são o dióxido de carbono e o vapor de água. Existem dois tipos de absorção: molecular e aerossol.

A dispersão diminui o fluxo incidente na direção original, devido à redistribuição do fluxo em todas as direções de propagação. O efeito da dispersão é mais significativo em comprimentos de onda de propagação menor. De forma análoga à absorção, existem dois tipos de dispersão: molecular e aerossol.

Emissão é a soma entre a radiação emitida pela atmosfera e pelo elemento em inspeção. Para uma análise termográfica, ela é considerada desprezível, pois geralmente a temperatura da atmosfera é menor do que a temperatura do elemento inspecionado, sendo a emissividade atmosférica geralmente baixa.

A turbulência se refere aos movimentos irregulares do ar, que provocam uma flutuação aleatória no índice de refração atmosférico. Em virtude disso, ocorrem imperfeições nos termogramas gerados. Porém, como não há grandes distâncias (maiores do que 50 m) entre a câmera e o elemento inspecionado, este fenômeno é desprezado.

### **2.3.3. Influências Climáticas**

Dentre os fatores que limitam o uso do método, as condições climáticas exercem grande influência. Dentre as condições ambientais necessárias para a realização do ensaio, pode-se incluir a ausência de precipitação, a radiação solar disponível, e a ausência de vento significativo (BARREIRA, 2004). Para tanto, faz-se necessário um planejamento adequado do roteiro de ensaio, que inclua a verificação dos boletins meteorológicos e, se necessário, o cancelamento do ensaio. Diante da influência destes fatores, são descritas, a seguir, algumas recomendações para a diminuição das incertezas dos resultados.

- *Umidade.* A umidade elevada resfria a superfície do elemento sob inspeção, dificultando a detecção, a avaliação e o diagnóstico de uma anomalia (CRAVEIRO, 2008).
- *Radiação Solar.* O carregamento solar está presente no ambiente durante o dia, período no qual a radiação solar produz um rápido aquecimento da superfície. Por isso, recomenda-se a realização dos ensaios durante o dia. Há também a possibilidade de realizar-se o ensaio durante à noite, no período em que a superfície tem sua temperatura diminuída, após a exposição ao sol. Desta maneira, em inspeções realizadas durante o dia, as temperaturas das anomalias são maiores do que as da superfície. Já para as inspeções realizadas no período da noite, as anomalias encontram-se em temperaturas menores do que as da superfície (MENDONÇA, 2008). O reflexo solar é causado pela radiação emitida pelo sol, tendo maior intensidade em superfícies com valores baixos de emissividade. Em oposição ao carregamento solar, que ocasiona o aumento da temperatura do componente, o reflexo solar não provoca aquecimento da superfície. Porém um inspetor inexperiente pode registrar a presença de uma alta temperatura não existente, o que leva ao sub entendimento da existência de uma anomalia. A realização de inspeções no período da noite pode eliminar a influência do reflexo solar, desde que tomados os devidos cuidados com relação à iluminação. Caso seja necessário que a inspeção se realize no período diurno, é possível modificar-se o ângulo entre o equipamento e o elemento sob inspeção.
- *Vento.* Como a imagem térmica depende da transferência de calor entre a superfície e a envolvente, o vento participa do processo de transferência de calor, devido à sua influência no coeficiente de convecção. Assim, o vento soprando em velocidades significativas pode afetar as temperaturas superficiais do elemento (BARREIRA, 2004). Portanto, a presença da convecção pode gerar contrastes inferiores, devido às perdas por resfriamento (MALDAGUE, 2001).

Com base nos aspectos teóricos acerca do ensaio de termografia infravermelha apresentados, no próximo capítulo estão detalhadas algumas aplicações do método como ensaio não destrutivo.



## **CAPÍTULO 3**

### **TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA COMO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO**

---

No capítulo anterior foram abordados os aspectos relacionados ao ensaio termográfico. Neste capítulo, serão apresentados os estudos realizados ao uso da termografia infravermelha aplicada a ensaios não destrutivos. Inicialmente, serão abordados os trabalhos realizados em estruturas de concreto. Após, serão apresentadas pesquisas que buscaram investigar a influência dos fatores climáticos, nos resultados obtidos, por meio da termografia infravermelha.

#### **3.1. TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO**

A termografia infravermelha aplicada a estruturas de concreto objetiva a detecção de defeitos sub-superficiais. Dentre estes defeitos pode-se citar as delaminações, os vazios, as fissuras, e as falhas de aderência. Com o uso desta técnica não destrutiva, diferentes pesquisas têm sido desenvolvidas nos últimos anos, objetivando a detecção destas anomalias.

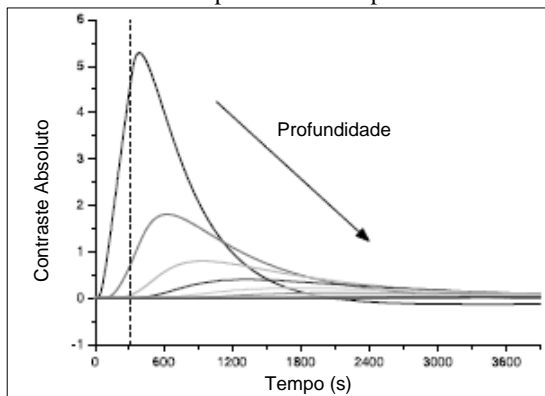
Maierhofer *et al.* (2002) analisou a eficiência da termografia infravermelha ativa na detecção de vazios no concreto. O trabalho foi dividido em duas etapas, uma experimental e outra numérica. Para a parte experimental, foi moldada uma amostra de concreto com dimensões de *150 cm x 150 cm x 50 cm*. Nela, foram inseridos 4 blocos

de poliestireno com dimensões de  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ , e 4 blocos com dimensões de  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ . As profundidades, nas quais os defeitos foram inseridos, variaram de 2 a 8 cm. Para a realização dos ensaios, as amostras foram aquecidas por meio de 3 radiadores infravermelhos, com os tempos de aquecimento variando de 5 a 60 minutos. Após cada aquecimento, foi monitorada a etapa de resfriamento da amostra.

Uma modelagem matemática tridimensional foi desenvolvida, sendo resolvida por meio do método das diferenças finitas. Na modelagem, criou-se um bloco de concreto com as mesmas dimensões adotadas no procedimento experimental: defeitos com  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ , e profundidades variando de 1 a 10 cm. Os tempos de aquecimento simulados foram de 5, 15 e 45 minutos.

Os resultados obtidos apontam que, à medida em que se aumenta o tempo de aquecimento da amostra, o valor do contraste térmico é incrementado. Observou-se ainda que, o valor máximo do contraste obtido foi menor para os defeitos mais profundos. A Figura 3.1 apresenta o contraste térmico, ao longo do tempo, para defeitos em profundidades de 1 a 10 cm.

Figura 3.1 Contraste obtido para diferentes profundidades de defeito.



Fonte: Adaptado de Maierhofer *et al.* (2002).

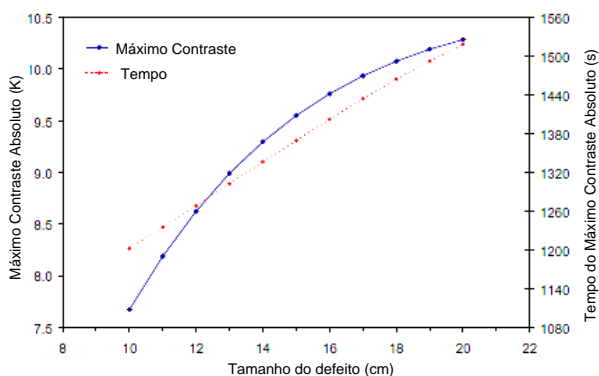
Verifica-se também que o aumento da profundidade do defeito faz com que seja necessário um tempo maior de resfriamento, para a obtenção do valor máximo de contraste.

Maierhofer *et al.* (2004) deu sequência aos desenvolvimentos do trabalho anteriormente citado. Foi avaliada a influência das propriedades

térmicas do concreto, e do tamanho do defeito, na sua detecção com o emprego da termografia ativa. A simulação matemática foi desenvolvida considerando-se defeitos em poliestireno, com diferentes tamanhos e profundidades. Para a solução do problema formulado foi utilizado também o método das diferenças finitas. Quanto às propriedades térmicas do concreto, variou-se a sua densidade e a sua condutividade térmica.

Quanto à condutividade térmica, concluiu-se que quanto maior o seu valor, maior será o contraste térmico máximo, e menor o tempo necessário para alcançá-lo. No entanto, seu valor não pode ser tão alto, a ponto que todo o calor flua pelo entorno do defeito. Para a densidade, observou-se que um valor menor origina maiores contrastes térmicos, que ocorrem em um tempo inferior de resfriamento. A Figura 3.2 apresenta o contraste térmico máximo obtido e o tempo necessário para alcançá-lo, considerando-se diferentes tamanhos de defeito.

Figura 3.2 Contraste obtido para diferentes tamanhos de defeito.



Fonte: Adaptado de Maierhofer *et al.* (2004).

Constata-se que quanto maiores as dimensões do defeito, mais elevados serão os valores de contraste térmico e tempo de resfriamento.

Ainda dando continuidade às pesquisas envolvendo este tema, Maierhofer; Arndt e Rolling (2007) avaliaram a influência das propriedades do concreto na detecção de defeitos, empregando a termografia ativa. Foram moldadas três amostras, de  $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0,50\text{ m}$ , contendo quatro defeitos simulados nas profundidades de 6 e 10 cm. A primeira amostra foi moldada com concreto e investigada durante a hidratação. Na segunda amostra, inseriram-se agentes incorporadores de ar, para diminuir a densidade, e a resistência à compressão. Na terceira

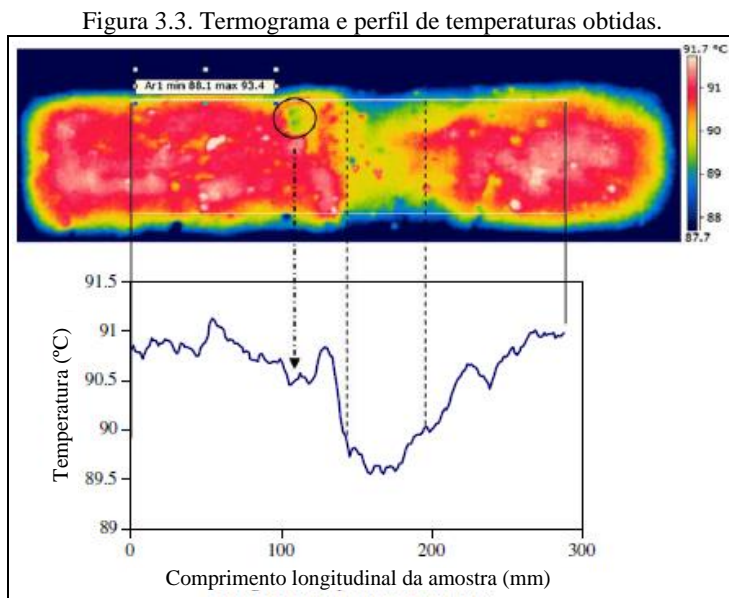
amostra, acrescentaram-se agregados porosos, com o intuito de diminuir ainda mais a resistência à compressão, e a densidade. A quarta amostra foi moldada com seis defeitos, simulados por poliestireno, na profundidade de 6 cm. Nesta, acrescentaram-se barras de aço, posicionadas acima de três defeitos. Os resultados foram obtidos experimentalmente, e por meio de uma simulação numérica.

Quanto à influência da resistência à compressão, observou-se que o seu aumento diminui o contraste térmico máximo, e eleva o tempo de resfriamento necessário para obtê-lo. Constatou-se ainda que a redução da densidade aumenta o valor do máximo contraste obtido. Em relação à porosidade, observou-se que, quanto mais poroso o concreto, maior será o contraste obtido, e menor será o tempo de resfriamento necessário para obtê-lo. Por outro lado, a presença de porosidade nos agregados eleva a magnitude do contraste máximo, aumentando o tempo necessário para a sua obtenção. Quanto à influência da densidade das barras, verificou-se apenas que, quanto maior o seu valor, menor será o contraste obtido.

Washer; Fenwick e Bolleni (2010) avaliaram o efeito do carregamento solar na detecção de deteriorações na sub-superfície de pontes de concreto. Os ensaios foram realizados por meio da termografia passiva, em um bloco de concreto com dimensões de 240 cm x 240 cm x 90 cm. Defeitos simulados em poliestireno, com tamanho de 30 cm x 30 cm x 1,3 cm, foram inseridos no bloco nas seguintes profundidades: 2,5 cm; 5,1 cm; 7,6 cm; 12,7 cm. O corpo de prova ficou exposto às condições ambientais, e as imagens termográficas foram capturadas em intervalos de 10 minutos, durante 24 horas por dia. Os resultados apontam que, para a profundidade de 2,5 cm, o máximo contraste foi obtido decorridas 5 horas da primeira exposição solar. No entanto, para o defeito posicionado na profundidade de 12,7 cm, o tempo decorrido entre a primeira exposição solar e o momento em que se obteve o contraste máximo foi de 9 horas.

Uma metodologia para a detecção de danos em estruturas de concreto por meio da combinação de termografia infravermelha e ultrassom foi proposta por Aggelis *et al.* (2010). A termografia foi empregada para localizar as regiões com anomalias e, subsequentemente, o ultrassom foi posicionado nestes locais para uma avaliação detalhada. O procedimento experimental desta pesquisa foi realizado em uma viga, com dimensões de 100 cm x 100 cm x 40 cm, submetida ao ensaio de flexão em quatro pontos, com o objetivo de criar fissuras. Os ensaios com a termografia foram conduzidos na face comprimida da viga, na qual as fissuras não estavam aparentes. A Figura

3.3 apresenta o termograma obtido no ensaio, e o perfil das temperaturas obtidas.



Fonte: Adaptado de Aggelis *et al.* (2010).

Constatou-se que as fissuras de maior abertura puderam ser identificadas por meio da câmera infravermelha, mostrando-se satisfatória a combinação das duas técnicas.

Caldeira (2014) realizou um estudo acerca aplicação da termografia infravermelha na visualização de danos na aderência entre concreto e polímeros reforçados com fibras. Neste estudo, comparou-se diferentes fontes de excitação térmica e a influência dos parâmetros de entrada, adicionados à câmera no momento do ensaio. Para as análises que tiveram o sol como fonte de calor, verificou-se que o parâmetro que tem maior influência no contraste térmico é o tempo de exposição. E dentre os parâmetros de inserção à câmera, verificou-se que a emissividade é o que exerce maior interferência nos resultados obtidos.

Laaide e Belattar (2014) analisaram a aplicação de métodos numéricos para a detecção de vazios e falhas de preenchimento, de diferentes tamanhos e profundidades, por meio da termografia infravermelha ativa. Os resultados obtidos numericamente foram comparados com resultados experimentais. Para o procedimento

experimental, criou-se um bloco de concreto com dimensões de  $100\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ . Foram inseridos seis defeitos na amostra, quatro deles medindo  $10 \times 10 \times 5\text{ cm}$ , e dois deles com dimensões de  $15 \times 15 \times 5\text{ cm}$ , todos em poliestireno. As amostras foram aquecidas por meio de lâmpadas de halogênio, em tempos de 30, 60 e 120 minutos. A simulação numérica foi desenvolvida com o método dos elementos finitos, para um elemento com as mesmas dimensões e defeitos.

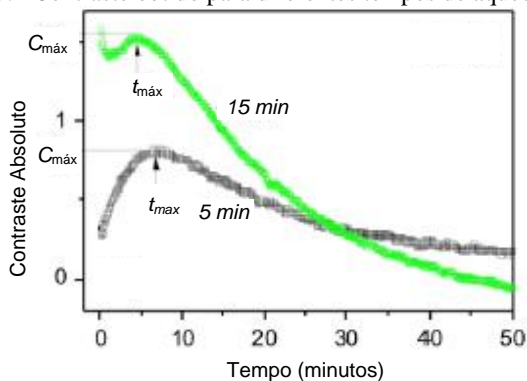
O método numérico adotado pelos autores esteve em concordância com os dados experimentais. Observou-se ainda que os defeitos localizados próximos à superfície necessitaram de menor tempo de resfriamento, até a obtenção do máximo contraste. Quanto ao tamanho do defeito, constatou-se que o contraste térmico se elevou com o seu aumento, e o tempo necessário para a sua obtenção aumentou.

Cotic *et al.* (2015) analisou a detecção de defeitos, de diferentes tamanhos e profundidades, em estruturas de concreto. Para o estudo, moldaram-se quatro amostras de concreto, com dimensões de  $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ . Em uma destas amostras, foram inseridos blocos de poliestireno medindo  $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ , nas profundidades de 1,5; 3; 4,5; 6 e 7,5 cm. Em outra, foram inseridos defeitos em ar, medindo de  $6 \times 6\text{ cm}$ , nas profundidades de 3 cm e 6 cm. As duas outras amostras continham defeitos de três tipos: poliestireno, ar e acrílico. As amostras foram aquecidas em intervalos de tempo distintos, dentre 5 e 30 minutos. Após o término do aquecimento, iniciou-se o monitoramento do resfriamento da amostra.

O estudo contou ainda com uma simulação numérica tridimensional, realizada por meio do método das diferenças finitas, para três amostras. Em cada amostra, havia um defeito em seu centro, simulado por poliestireno, com tamanhos de  $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ ;  $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ ; e  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ . As profundidades do defeito variaram de 1 a 9 cm na simulação.

Os autores concluíram que, durante o resfriamento, quanto mais próximo da superfície o defeito se encontra, menor será o tempo necessário para a obtenção do máximo contraste térmico. O tamanho do defeito também está associado à sua detecção, sendo que, quanto menor o tamanho, menor também o valor do contraste máximo e o tempo para a sua obtenção. A Figura 3.4 apresenta o contraste térmico obtido para diferentes tempos de aquecimento para o defeito a 3 cm de profundidade.

Figura 3.4 Contraste obtido para diferentes tempos de aquecimento.



Fonte: Adaptado de Cotic *et al.* (2015).

Nota-se que o contraste térmico aumenta com o incremento do tempo de exposição à radiação. Além disso, percebe-se que o tempo para obter-se o máximo contraste diminui com o aumento do tempo de aquecimento.

Uma investigação da capacidade de detecção de defeitos em diferentes misturas de concreto, para tamanhos e profundidades distintas, foi realizada por Farrag, Yehia e Qaddoumi (2016). O estudo foi realizado por meio da termografia passiva, e buscou-se avaliar também o efeito das condições climáticas nos resultados obtidos. Para o estudo, criaram-se 16 amostras de concreto armado, com dimensões de  $122\text{ cm} \times 122\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ . As amostras foram subdivididas em quatro grupos. Cada grupo foi moldado com um tipo de concreto (convencional, de alta resistência, leve e de alta compactação). Foram utilizados diferentes tipos de materiais para simular defeitos do tipo: delaminação, vazios, fissuras e corrosão. Por meio dos resultados obtidos, os autores concluíram que as propriedades do concreto exercem grande influência na visualização dos defeitos. Sendo que, as amostras com mistura de concreto leve foram as que apresentaram os resultados menos satisfatórios, quanto à visualização do defeito. No que diz respeito ao tamanho e à profundidade dos defeitos, concluiu-se que delaminações e vazios foram detectados quando a razão, entre sua menor dimensão, e sua profundidade, encontra-se entre os valores de 0,4 e 0,5. Os demais defeitos foram detectados para uma razão acima de 0,5. Quanto aos efeitos das condições climáticas, concluiu-se que as altas temperaturas e o alto carregamento solar geraram um contraste térmico mais elevado.

A termografia infravermelha vem se mostrando uma ferramenta promissora na área de ensaios não destrutivos, aplicados à engenharia civil. No entanto, existem diversas fontes que podem gerar incertezas nos resultados, obtidos por meio do ensaio. Dentre estas incertezas, como visto anteriormente, podemos citar as propriedades do elemento analisado, as condições ambientais nas quais o ensaio é realizado, além das incertezas relacionadas ao equipamento. Este trabalho objetiva, dentre as influências climáticas, analisar a interferência do vento nos resultados obtidos. Em virtude disso, a seguir, estão elencados alguns estudos realizados com este propósito.

### 3.2. INFLUÊNCIA DO VENTO NAS TEMPERATURAS OBTIDAS

A distribuição de temperaturas em uma superfície está diretamente relacionada aos mecanismos de transferência de calor. Estes, por sua vez, estão associados às propriedades térmicas do material, e às condições do meio no qual a superfície está inserida.

Uma revisão das principais áreas de aplicação da termografia é fornecida por Balaras e Argiriou (2002). De acordo com os autores, precisa-se estar ciente dos fenômenos físicos que ocorrem no entorno, para a avaliação de elementos externos de uma edificação. E também na maneira como as condições ambientais externas influenciam as condições internas da edificação. O vento é um parâmetro a ser considerado na análise, já que as perdas de calor por convecção dependem de sua velocidade. Os autores recomendam que não sejam realizadas inspeções termográficas com ventos acima de 5 m/s.

Lehmann *et al.* (2013) elaborou um estudo experimental com o uso da termografia passiva, seguido de um estudo numérico. A investigação buscou determinar a influência de parâmetros climáticos na distribuição de temperaturas de uma superfície. Os parâmetros avaliados foram: a temperatura do ar, a velocidade do vento, a irradiação solar, a transmitância térmica, e a emissividade.

O estudo experimental foi realizado em uma edificação com paredes constituídas por tijolos. Algumas das paredes do edifício foram selecionadas para, com o uso da câmera termográfica e de termopares, verificar-se a distribuição das temperaturas. Instalou-se ainda uma estação meteorológica nas proximidades da edificação, para o acesso de dados climáticos durante os dias de monitoramento.

Após a realização da análise experimental, um modelo de simulação, para a edificação analisada e os dados climáticos obtidos, foi



criado, e implementado em um programa que simula a distribuição de temperaturas. Os dados numéricos foram comparados com os obtidos experimentalmente, e percebeu-se uma elevada concordância entre os resultados. Buscando-se ainda quantificar as influências destes parâmetros climáticos, consideraram-se diferentes propriedades térmicas para os materiais analisados.

Como resposta às influências climáticas analisadas, e enfatizando-se o vento, durante os dias de monitoramento da edificação, sua velocidade foi inferior a  $5 \text{ m/s}$ . Com base nos resultados obtidos, os autores ressaltam que velocidades de até  $2 \text{ m/s}$  não foram críticas durante a medição termográfica. No entanto, destaca-se que, após períodos prolongados com ação de vento, é necessário aguardar que ele cesse, para então realizar-se o ensaio.

Van De Vijver *et al.* (2014) buscou também quantificar as influências dos parâmetros climáticos em inspeções termográficas realizadas em edificações. O objetivo da pesquisa foi implementar, por meio de um *software* comercial, paredes constituídas por diferentes tipos de materiais, considerando-se combinações distintas da ação dos fatores climáticos. Na simulação, foram utilizadas informações climáticas, para um período de sete dias, obtidas por meio de uma base de dados.

O autor faz uma revisão de literatura para a influência de cada parâmetro climático. Quanto ao vento, encontraram-se diversos valores na literatura, que variam de  $1$  a  $6,7 \text{ m/s}$ , como a máxima velocidade nas quais o ensaio pode ser realizado.

Os resultados obtidos pelo autor, considerando-se a modelagem de uma parede de madeira, indicam que análises qualitativas são possíveis para ventos de até  $7,0 \text{ m/s}$ . Porém, para a análise quantitativa, os resultados obtidos apontam que o vento deve ser inferior a  $2 \text{ m/s}$ .

Washer *et al.* (2009) verificaram a influência dos parâmetros climáticos em inspeções termográficas realizadas em pontes de concreto. Os autores destacam que a termografia é uma importante ferramenta, que pode ser utilizada para a detecção de patologias na sub-superfície do concreto. No entanto, para que os contrastes térmicos possam ser obtidos corretamente, e consequentemente as características da sub-superfície possam ser analisadas, é necessária a verificação das condições ambientais ao entorno do elemento analisado. Neste estudo, foram avaliados os impactos do carregamento solar e da velocidade do vento na visualização de defeitos.

O experimento foi realizado em um bloco de concreto com dimensões de  $2,4 \text{ m} \times 2,4 \text{ m} \times 0,9 \text{ m}$ , construído para a realização dos

experimentos. Com o objetivo de simular os defeitos, foram inseridos blocos de poliestireno com dimensões de  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ , em quatro diferentes profundidades:  $2,5\text{ cm}$ ;  $5,1\text{ cm}$ ;  $7,6\text{ cm}$  e  $12,7\text{ cm}$ .

O bloco ficou exposto às condições climáticas por um período de 89 dias, e o monitoramento da temperatura ambiente, da velocidade do vento e do carregamento solar foi realizado por meio de uma estação meteorológica, instalada nas proximidades do bloco. Durante este período, uma câmera termográfica foi posicionada a uma distância de  $9\text{ m}$  da amostra, programada para registrar uma imagem a cada  $10\text{ minutos}$ . A Figura 3.5 apresenta a configuração do procedimento experimental.

Figura 3.5. Configuração do experimento.

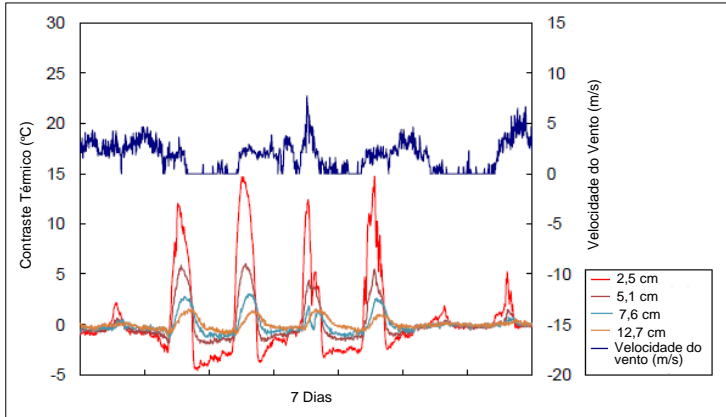


Fonte: Adaptado de Washer *et al.* (2009).

Observa-se, na configuração do ensaio, o espaço de armazenamento dos dados, onde a câmera ficou posicionada, a estação meteorológica, para obtenção dos dados climáticos, e o bloco de concreto.

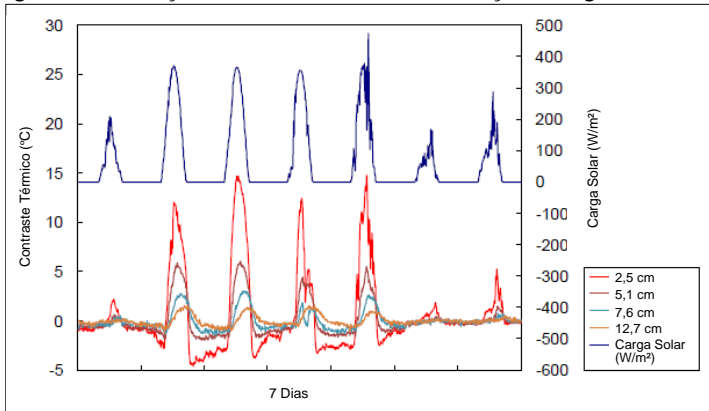
Uma análise temporal do contraste térmico para as diferentes profundidades de defeito foi realizada, considerando-se a exposição da amostra ao carregamento solar, e ao vento, durante o período do experimento. No ensaio de termografia passiva, é importante que a análise da influência do vento, na visualização do defeito, seja feita em conjunto com a análise da variação do carregamento solar, para o mesmo intervalo de tempo. Já que o contraste térmico sofre variações, de acordo com o carregamento solar imposto. As Figuras 3.6 e 3.7 apresentam os resultados obtidos do contraste térmico, para diferentes velocidades de vento e carregamentos solares.

Figura 3.6. Variação do contraste térmico em função da velocidade do vento.



Fonte: Adaptado de Washer *et al.* (2009).

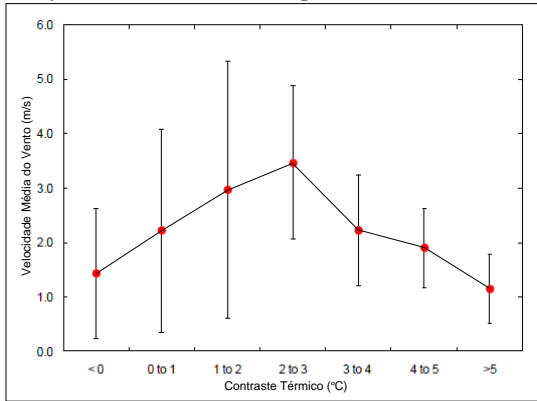
Figura 3.7. Variação do contraste térmico em função carregamento solar.



Fonte: Adaptado de Washer *et al.* (2009).

Pode-se constatar, para o período determinado, que contrastes térmicos maiores foram verificados com ventos de menor velocidade e com uma maior carga solar. Uma análise detalhada da influência do vento na visualização do defeito foi desenvolvida pelos autores para a profundidade de 5,1 cm. Nela, considerou-se a velocidade média do vento para o período de 89 dias. A Figura 3.8 apresenta o comportamento médio do contraste térmico para o período da manhã.

Figura 3.8. Variação do contraste térmico para as velocidades médias de vento.



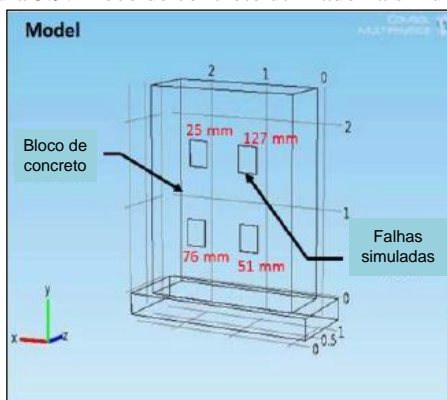
Fonte: Adaptado de Washer *et al.* (2009).

Para o caso analisado, um contraste térmico inferior a  $0^{\circ} C$  indica que o defeito está em uma temperatura inferior à da região sem defeitos. Enquanto que um contraste superior a  $5^{\circ} C$  é considerado excelente. Conforme observado, os maiores contrastes térmicos foram caracterizados em dias com baixas velocidades de vento.

Considerando que o contraste térmico é também dependente do carregamento solar imposto, os autores concluíram que as condições climáticas ótimas para a realização do ensaio termográfico são: dias de carregamento solar constante e baixa velocidade de vento.

Rumbayan e Washer (2014) desenvolveram uma modelagem matemática para quantificar a influência dos parâmetros climáticos na visualização de defeitos em estruturas de concreto. Utilizando o método dos elementos finitos, a simulação foi desenvolvida no programa COMSOL *Multiphysics*. O modelo criado na simulação contém as mesmas especificações, incluindo os dados climáticos e as dimensões do bloco e dos defeitos, utilizados por Washer *et al.* (2009) em seu experimento. Assim, por meio de um comparativo entre os resultados experimentais e numéricos, os resultados obtidos puderam ser validados. A Figura 3.9 apresenta o bloco de concreto modelado com suas respectivas falhas.

Figura 3.9. Bloco de concreto utilizado na simulação.



Fonte: Adaptado de Rumbayan e Washer (2014).

O objetivo da pesquisa foi elaborar uma ferramenta matemática que possibilitasse a obtenção de um resultado prévio do ensaio, baseada nas condições climáticas da inspeção. Os parâmetros climáticos implementados neste trabalho foram: a variação da temperatura ambiente, a velocidade do vento, e o carregamento solar. Parâmetros estes que, como visto no Capítulo 2, fazem parte das equações primordiais que regem a transferência de calor por radiação e por convecção. Os resultados obtidos numericamente, a partir do método dos elementos finitos, estiveram em concordância com os resultados da análise experimental.

Neste capítulo, apresentaram-se as principais aplicações mais recentes da termografia infravermelha em estruturas de concreto, além de trabalhos que analisam a influência do vento nos resultados das aplicações. Como verificado, algumas pesquisas objetivaram a quantificação de incertezas associadas aos fatores climáticos. No entanto, a literatura apresenta diferentes valores, considerados como a máxima velocidade em que os ensaios podem ser realizados. Com o intuito de colaborar com o tema, o principal objetivo desta pesquisa é avaliar especificamente a influência da velocidade do vento na visualização de um defeito para condições controladas em laboratório. No próximo capítulo, apresenta-se o procedimento experimental adotado.



## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISE EXPERIMENTAL**

---

O principal objetivo desta pesquisa é estudar a influência do vento, que age por meio da convecção, na visualização de um defeito em ensaios não destrutivos realizados com termografia infravermelha. Este capítulo é dedicado à apresentação da metodologia empregada para este fim, juntamente com a apresentação dos materiais utilizados no procedimento experimental.

Inicialmente, expõe-se o processo de confecção das amostras, seguido da descrição dos elementos utilizados na etapa experimental. Por último, é descrito o procedimento experimental adotado, fazendo-se uso das amostras e dos elementos anteriormente citados.

#### **4.1. MOLDAGEM E PREPARO DAS AMOSTRAS**

Os corpos de prova para esta pesquisa foram moldados em concreto, com traço  $1:1,07:1,07:2,37:0,52$  (cimento, areia média, areia fina, brita zero e água). Foram moldados 2 corpos de prova, com dimensões de  $26 \times 13 \text{ cm}$ , e  $9 \text{ cm}$  de espessura. Neles, foi inserido um disco de poliestireno com  $3 \text{ cm}$  de diâmetro e  $1,4 \text{ cm}$  de espessura, nas profundidades de  $2 \text{ cm}$  e  $3 \text{ cm}$ . O objetivo do poliestireno é simular um defeito no concreto, como um vazio, por exemplo. Este material foi adotado por possuir uma condutividade térmica semelhante a do ar, e já ter sido utilizado em outros trabalhos, como os citados no Capítulo 3.

A Figura 4.1 apresenta a etapa de confecção das amostras de concreto.

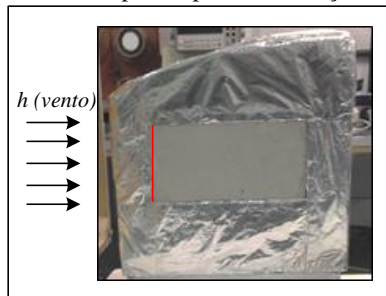
Figura 4.1. Posicionamento do disco de poliestireno durante a moldagem da amostra (a), amostra moldada (b).



É importante destacar que os ensaios principais foram realizados para o corpo de prova que contém o defeito a uma profundidade de 2 *cm*. A amostra com defeito a 3 *cm* de profundidade foi ensaiada de forma complementar.

Decorrido o tempo de cura das amostras, iniciou-se o procedimento de preparo delas. Com o intuito de diminuir os efeitos de borda na imagem gerada pela câmera infravermelha, inseriu-se a amostra de concreto em um bloco de poliestireno. Além disso, colocou-se na superfície do poliestireno uma folha de papel alumínio, para impedir que ele fosse danificado durante a fase de aquecimento da amostra. A Figura 4.2 apresenta uma das amostras, pronta para a realização dos ensaios.

Figura 4.2. Amostra pronta para a realização dos ensaios.



O poliestireno, no qual a amostra foi inserida, foi preparado de maneira a não modificar o efeito do vento ( $h$ ) que chega paralelo à superfície. Na linha vermelha, destacada na Figura 4.2, cortou-se parte



dele para permitir que a origem da amostra, no que diz respeito à ação do vento, seja nesse ponto. Ou seja, para que, no cálculo do coeficiente de convecção, o valor  $L$ , que representa a dimensão do elemento paralela à passagem do fluido, seja de  $26\text{ cm}$ .

## 4.2. ELEMENTOS UTILIZADOS NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Neste item, são descritos detalhadamente os elementos empregados para a realização do procedimento experimental. Inicialmente, são abordados alguns aspectos relacionados à câmera infravermelha, juntamente com seus parâmetros de inserção. Na segunda etapa, descreve-se o elemento utilizado como fonte de convecção forçada, seguido dos critérios adotados para a escolha do tipo de aquecimento. E, por último, é descrita a medição do campo radiante emitido pela fonte de aquecimento da amostra.

### 4.2.1 Câmera Infravermelha

As imagens infravermelhas foram capturadas com uma câmera infravermelha da marca FLIR, modelo B400, disponível no Grupo de Pesquisa em Ensaios não Destrutivos (GPEND) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), cujas principais características são descritas a seguir. Na Figura 4.3, tem-se uma imagem ilustrativa do modelo da câmera.

- Resolução espacial:  $320 \times 240\text{ pixels}$ ;
- FOV:  $25^\circ \times 19^\circ$ ;
- IFOV:  $1,36\text{ mrad}$ ;
- Sensibilidade térmica:  $50\text{ mK}$  ( $0,05^\circ\text{C}$ );
- Taxa de repetição dos quadros (*Frame Rate*):  $30\text{ Hz}$ ;
- Faixa de temperatura do objeto sob inspeção:  $-20$  a  $120^\circ\text{C}$ .

Figura 4.3. Câmera Infravermelha FLIR B400.

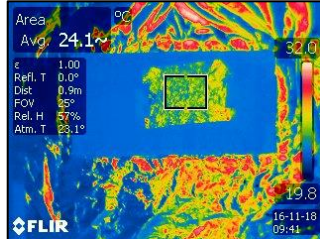


Para a realização dos ensaios, é necessária a inserção de alguns parâmetros na câmera infravermelha. Sendo eles: temperatura ambiente, umidade do ar, distância câmera/elemento, temperatura refletida, e emissividade.

Para medir a temperatura ambiente e a umidade do ar, utilizou-se um termo-higrômetro, também disponível no GPEND. A distância entre a câmera e o elemento em análise foi mantida fixa, a um valor de  $1\text{ m}$ . Este valor foi adotado por apresentar bons resultados em ensaios preliminares.

Para a determinação da temperatura refletida, adotou-se o método descrito na ASTM E1862-97. Inicialmente, definiu-se o valor da emissividade  $\varepsilon = 1,0$  e o valor da temperatura refletida  $T_{ref} = 0$ . Após este procedimento, amassou-se uma folha de papel alumínio, que foi então posicionada em frente à amostra. Com a função “área” da câmera infravermelha, obteve-se a temperatura média da folha de papel alumínio. Desta forma, esta temperatura média foi adotada como a temperatura refletida. A Figura 4.4 apresenta a imagem infravermelha, a partir da qual se determinou a temperatura refletida durante o ensaio.

Figura 4.4. Medição da temperatura refletida.



É importante destacar que o procedimento para a obtenção da temperatura refletida foi realizado no início de todos os experimentos.

Para a determinação da emissividade, usou-se o procedimento descrito na ASTM E1933. Com a amostra posicionada e os parâmetros inseridos na câmera de temperatura ambiente, umidade e temperatura refletida, o valor da emissividade pode ser obtido. A amostra é aquecida com parte de uma fita isolante, que tenha emissividade conhecida (0,97), colada em sua superfície. Após o aquecimento, espera-se o tempo necessário para que a amostra entre em equilíbrio térmico com a fita. Inserido o parâmetro de emissividade da fita, determina-se a sua temperatura com a função “ponto” da câmera infravermelha. Como a temperatura da fita é igual à da amostra, assumindo-se que estejam em

equilíbrio térmico, move-se a função ponto da fita para a amostra. Então, altera-se o valor da emissividade até alcançar-se na amostra a mesma temperatura da fita. O valor obtido para a emissividade da amostra foi de 0,96.

#### 4.2.2 Fonte de Convecção Forçada

A fase principal dos procedimentos experimentais desta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Ciências Térmicas (LabTermo) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O laboratório disponibilizou o seu túnel de vento para a realização dos ensaios. O túnel de vento disponibilizado é do tipo soprador, da marca Plint & Partners, composto por um ventilador radial tipo Sirocco, que insufla o ar em direção à seção de testes. Na seção de testes, o túnel possui uma balança que possibilita a medição da força de arraste na direção do escoamento, da força de sustentação normal ao escoamento, e do torque sobre o modelo. A saída do túnel é livre, e apresenta um perfil de velocidade uniforme. A Figura 4.5 apresenta uma imagem do túnel de vento.

Figura 4.5. Túnel de vento utilizado para o procedimento experimental.



O túnel possui um conversor de frequência que permite o controle da rotação do motor elétrico de acionamento, possibilitando a realização de testes a diferentes velocidades. Nesta pesquisa, para o controle das velocidades do vento, utilizou-se um anemômetro da marca Testo, modelo 435, também disponibilizado pelo LabTermo. A velocidade do vento foi medida, na saída do túnel, próximo à superfície da amostra que, durante a realização de todos os ensaios, ficou posicionada neste

local. A Figura 4.6 apresenta a realização da medição da velocidade do vento com o uso do anemômetro.

Figura 4.6. Medição da velocidade do vento com o uso do anemômetro.



As medições com o uso do anemômetro foram realizadas anotando-se a frequência necessária no motor para atingir-se cada velocidade. Desta forma, ao refazerem-se os ensaios com cada velocidade, foi inserida a frequência necessária do motor para atingi-la, tornando dispensável o uso do anemômetro em todos os experimentos.

### **4.2.3 Escolha da Fonte de Aquecimento**

Nesta pesquisa, optou-se por utilizar o método de termografia ativa, devido à localização do túnel de vento que impossibilitava o aquecimento da amostra de forma passiva. No que diz respeito à termografia ativa, como já citado anteriormente, uma das principais dificuldades a ela associada é a uniformidade do aquecimento. Portanto, é necessária uma análise cautelosa sobre o tipo de aquecimento mais apropriado, de acordo com a situação. Para esta pesquisa, foram realizados ensaios preliminares com dois tipos de aquecimento. Posteriormente, optou-se pelo tipo que apresentou uma melhor uniformidade no aquecimento. Os tipos de aquecimento testados foram: lâmpadas infravermelhas e aquecedor halógeno, ambos disponíveis no GPEND.

Inicialmente utilizou-se duas lâmpadas infravermelhas, testando-se diferentes angulações, distâncias e tempos de aquecimento. A Figura 4.7 apresenta a execução de um dos testes realizados com o uso das lâmpadas infravermelhas.

Figura 4.7. Ensaio preliminar realizado com duas lâmpadas infravermelhas.



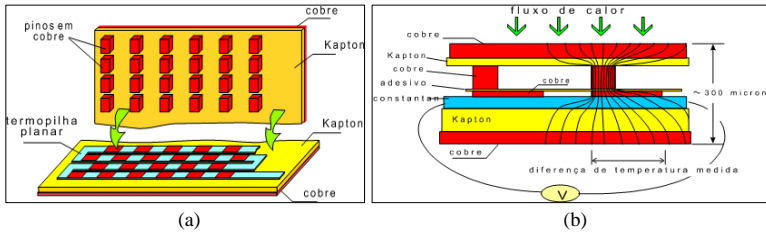
Após a etapa preliminar, realizaram-se testes com o aquecedor halógeno. E, finalizada esta etapa, observou-se que, para esta pesquisa, o aquecedor halógeno apresentou um aquecimento mais uniforme, optando-se então por utilizar este tipo de aquecimento.

#### 4.2.4 Medida do Campo Radiante

Após a escolha da fonte de aquecimento, foram realizadas medições para quantificar a radiação emitida pelo aquecedor, que será posteriormente utilizada na modelagem matemática. Esta medição foi realizada com o auxílio de um transdutor de fluxo de calor, disponibilizado pelo Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Este transdutor, do tipo gradiente tangencial, tem como princípio de funcionamento o desvio das linhas de fluxo de calor, gerando um gradiente de temperatura em um plano tangente ao da medida do fluxo. Os gradientes de temperatura são medidos por meio de termopares planares, ligados em série. Cada termopar converte a diferença de temperatura em uma *f.e.m.* (força eletromotriz), gerando um sinal de tensão elétrica ( $V$ ).

A Figura 4.8 apresenta um corte tangencial (a) e um transversal (b) do transdutor de fluxo de calor. O fluxo que chega à superfície de cobre é desviado por meio dos pinos de cobre, gerando o gradiente de temperatura sobre a termopilha.

Figura 4.8. Corte tangencial (a) e corte transversal (b) do transdutor de fluxo de calor.



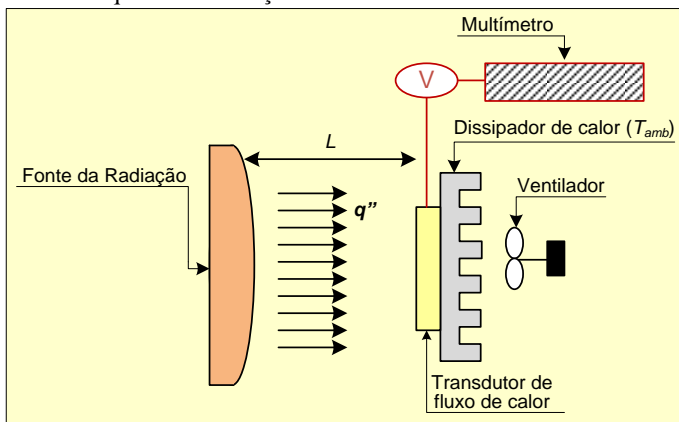
Fonte: B. Carciofi, S. Guths, J.B. Laurindo (2002).

O transdutor de fluxo de calor foi conectado a um multímetro, também disponibilizado pelo LMPT, que fornece o valor da tensão elétrica medida. Tendo-se o valor desta tensão, a radiação emitida pelo aquecedor pode ser então obtida por meio da equação:

$$q = c \cdot V \quad (4.1)$$

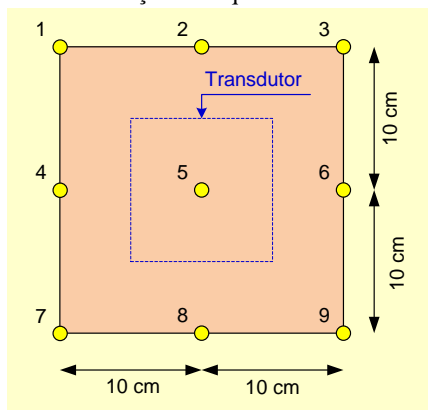
Onde:  $c$  é a constante de calibração, que foi calculada por meio dos procedimentos descritos no Anexo A. O transdutor foi pintado, com uma tinta negra (absortividade igual a 0,93), e colado sobre um dissipador de calor de alumínio com ventilação forçada na região posterior. A Figura 4.9 representa o esquema da medição adotada.

Figura 4.9. Esquema de medição com o uso do transdutor de fluxo de calor.



As medições foram realizadas considerando-se as seguintes distâncias ( $L$ ) entre a fonte de radiação e o transdutor: 20, 30, 40 e 50 cm. Para cada uma destas distâncias, posicionou-se o transdutor de fluxo de calor em nove posições diferentes, obtendo-se o valor da tensão em cada uma delas. A Figura 4.10 apresenta as medições nas nove posições, onde cada círculo (em amarelo) mostra a localização central do transdutor (para cada posição). Na Posição 5, ilustrada na figura, o centro do transdutor foi posicionado na direção normal ao centro do aquecedor.

Figura 4.10. Posições em que mediu-se a radiação.



Este procedimento de medição, foi realizado com o intuito de verificar a uniformidade da radiação emitida, que, por consequência, representa o quão uniforme será o aquecimento da amostra de concreto.

Com base nos resultados obtidos nas medições, a serem apresentados no Capítulo 6, verificou-se que a radiação emitida pelo aquecedor concentrava-se, em maior magnitude, na Posição 5. Desta forma, considerando-se a área da amostra de concreto a ser ensaiada (26 x 13 cm), optou-se pelo uso de dois aquecedores, com iguais características, posicionados lado-a-lado. A Figura 4.11 apresenta a medição do campo radiante com o uso de um aquecedor (a), e de dois aquecedores (b), além do multímetro utilizado nos experimentos (c).

Figura 4.11. Medição do campo radiante com um (a) e dois (b) aquecedores, e multímetro utilizado (c).



As medições do campo de radiação foram então repetidas para os dois aquecedores, posicionados a uma distância de  $30\text{ cm}$  do transdutor. Por fim, esta distância de  $30\text{ cm}$  foi adotada para a realização dos ensaios na amostra de concreto.

### 4.3. METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

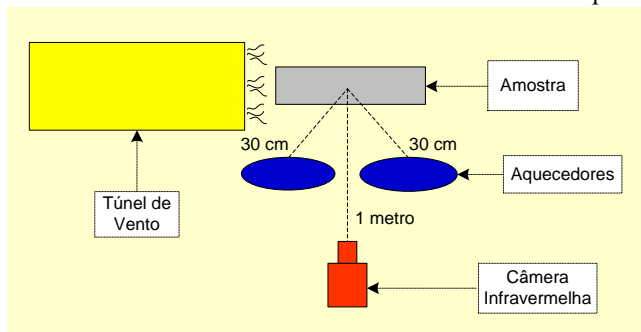
Finalizada a etapa de ajustes, deu-se início aos experimentos com uso da câmera infravermelha e do túnel de vento, para a amostra que possui o defeito a  $2\text{ cm}$  de profundidade. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ciências Térmicas (LabTermo) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), onde se encontrava o túnel de vento. A realização dos ensaios foi dividida em 4 etapas. A Etapa 1 foi realizada



sem nenhuma ação de vento. Sendo as Etapas 2, 3 e 4 realizadas com vento a velocidades de  $1\text{ m/s}$ ,  $2\text{ m/s}$  e  $5\text{ m/s}$  respectivamente.

Durante a realização dos ensaios, a amostra ficou posicionada na saída do túnel, sendo os aquecedores posicionados a  $30\text{ cm}$  de distância dela. Já a câmera infravermelha, foi posicionada no plano normal à amostra, a uma distância de  $1\text{ metro}$ . A Figura 4.12 representa, esquematicamente, o posicionamento destes elementos durante a fase de aquecimento. Na fase de resfriamento, os aquecedores foram retirados de frente da amostra, enquanto os demais elementos permaneceram na mesma posição.

Figura 4.12. Posicionamento dos elementos durante a fase de aquecimento.



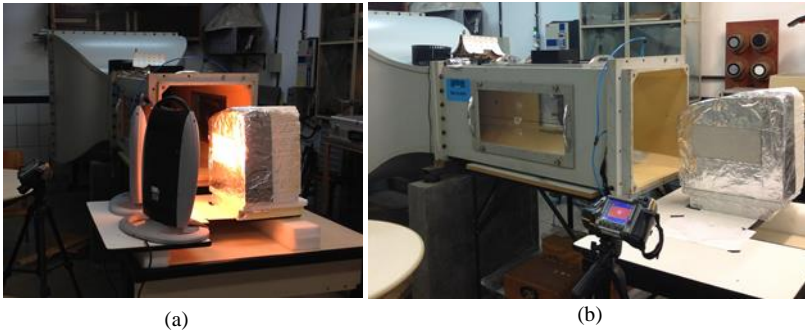
Feito o posicionamento dos elementos, conforme a figura anterior, deu-se início à realização dos experimentos da Etapa 1. Com o túnel de vento desligado, realizou-se o aquecimento da amostra durante  $5\text{ minutos}$ . Este tempo foi determinado por meio de ensaios preliminares e apresentou, para as configurações de ensaio adotadas, uma bom contraste térmico. Após o aquecimento, desligaram-se os aquecedores e iniciou-se o monitoramento do resfriamento da amostra. Durante a fase de resfriamento, registrou-se uma imagem a cada  $10\text{ segundos}$ , durante  $20\text{ minutos}$ . Adotou-se este tempo de  $20\text{ minutos}$ , pois se percebeu, por meio do termovisor da câmera, que o defeito já estava em equilíbrio térmico com o concreto, impossibilitando a sua visualização. Após este procedimento, esperou-se que a amostra entrasse em equilíbrio térmico com o ambiente, para então realizar-se um novo ensaio.

É importante destacar que não foi possível monitorar, com o uso da câmera infravermelha, a fase de aquecimento das amostras, devido à posição dos aquecedores. Esta posição impossibilitava a visualização de toda a amostra durante o aquecimento, fazendo-se necessária, para a fase

de resfriamento, a retirada dos aquecedores antes de iniciar-se o monitoramento.

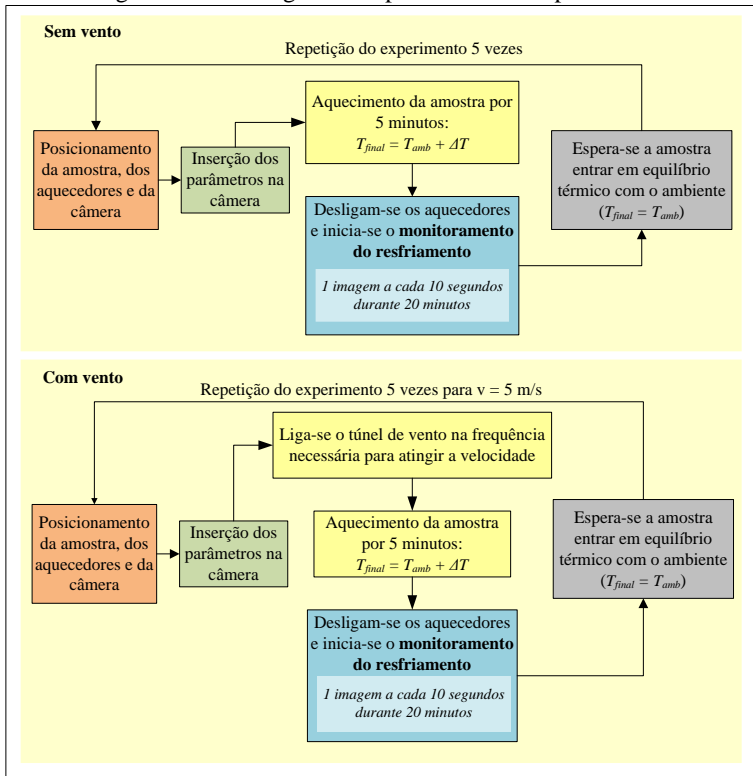
Para a Etapa 2, com velocidade de vento de  $1\text{ m/s}$ , posicionaram-se os equipamentos novamente, de acordo com o indicado na Figura 4.12. Inseriram-se os parâmetros na câmera, e deu-se início ao experimento. Inicialmente, o túnel de vento com a frequência necessária para atingir-se a velocidade desejada foi ligado. Após, ligaram-se os aquecedores. Passados os  $5\text{ minutos}$  de aquecimento, os aquecedores foram desligados, deixando-se o túnel de vento ligado. Iniciou-se então o monitoramento do resfriamento da amostra, registrando-se uma imagem a cada  $10\text{ segundos}$ , durante  $20\text{ minutos}$ , conforme o procedimento descrito na Etapa 1. Procedimento análogo foi adotado nas Etapas 3 e 4, porém o túnel foi acionado com a frequência necessária pra atingir as velocidades de  $2$  e  $5\text{ m/s}$  respectivamente. A Figura 4.13 apresenta a bancada experimental para a realização dos ensaios durante o aquecimento (a) e o monitoramento após o aquecimento (b).

Figura 4.13. Realização dos ensaios: Fase de aquecimento (a) Fase de resfriamento (b).



Com o intuito de verificar as incertezas do experimento, realizaram-se cinco repetições para os ensaios da Etapa 1 e da Etapa 4, seguindo os mesmos procedimentos citados acima. O fluxograma apresentado na Figura 4.14 ilustra as etapas do procedimento experimental.

Figura 4.14. Fluxograma do procedimento experimental.



Inicialmente, foram realizados todos os ensaios para a profundidade de 2 cm. Com base nos resultados obtidos, optou-se por realizar os ensaios para a profundidade de 3 cm apenas sem a ação do vento e com vento de 5 m/s. Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios na amostra de 3 cm foram os mesmos da amostra com defeito a 2 cm.

#### 4.4 ANÁLISE DOS DADOS

Os resultados obtidos durante os experimentos estarão na forma de termogramas. Estes, serão avaliados quantitativamente com o auxílio do software *FLIR Quickreport*. Este software permite a criação de pontos, linhas e áreas no termograma, a partir das quais pode-se

determinar a temperatura de qualquer pixel da imagem. Estas informações podem ainda ser exportadas para o *software Excel*, tornando-se possível a criação de gráficos representativos.

A temperatura inicial da amostra (antes do aquecimento) pode não ser a mesma em todas as situações, pois é dependente da temperatura ambiente, que não é igual em todos os ensaios. Em virtude disto, para a análise quantitativa, considerou-se a variação da temperatura da superfície ( $\Delta T_s$ ), durante e após o aquecimento, dada pela seguinte equação:

$$\Delta T_s = T_f - T_i \quad (4.2)$$

Onde:  $T_f$  é a temperatura da superfície após o aquecimento, e  $T_i$  é a temperatura da superfície antes de iniciar-se o aquecimento.

Além da variação da temperatura da superfície, as informações coletadas dos termogramas serão representados por meio do contraste térmico absoluto, descrito no Capítulo 2.

Para as repetições, realizadas nos ensaios sem vento e com vento de 5 m/s, as incertezas serão avaliadas por meio do método das incertezas de medição, com 95% de confiança.

Esta análise objetiva a determinação da incerteza expandida da medição ( $U$ ) do Tipo A, oriunda da repetitividade. Tal incerteza é determinada por meio da seguinte equação:

$$U = u \cdot \text{Fator de Student} \quad (4.3)$$

Onde:  $u$  é a incerteza padrão, e o *Fator de Student* é uma distribuição de probabilidade estatística.

A determinação da incerteza padrão  $u$  é obtida por meio de:

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.4)$$

Onde:  $\sigma$  é o desvio padrão das medições, e  $n$  é o número de repetições do experimento.

## **CAPÍTULO 5**

### **MODELAGEM MATEMÁTICA**

---

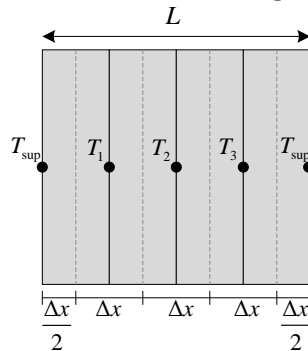
Utilizou-se nesta pesquisa uma modelagem matemática unidimensional, empregando o método das diferenças finitas no programa Excel, com o intuito de validar os resultados obtidos experimentalmente. Tal método foi escolhido em função de já ter sido empregado em trabalhos que abordam estruturas de concreto, detalhados no Capítulo 3. Nele, determinou-se o balanço de energia para cada ponto nodal, considerando-se as condições de contorno envolvidas no procedimento experimental. Dois modelos foram analisados. O primeiro considera apenas a influência da convecção natural, ou seja, não há influência do vento. O segundo considera a influência do vento, como convecção forçada, em diferentes velocidades adotadas no procedimento experimental.

No decorrer deste capítulo são detalhados os procedimentos adotados na modelagem matemática utilizada. Inicialmente, o método das diferenças finitas é descrito, juntamente com as equações que o regem. Posteriormente, é descrita a implementação do método para o tratamento do problema em análise, descrevendo-se o balanço de energia adotado para cada ponto nodal. Por fim, é apresentada a metodologia empregada para o cálculo do coeficiente de convecção natural e forçada, sem considerar/considerando a ação do vento, respectivamente.

## 5.1. O MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

As equações analíticas se restringem à geometria e às condições de contorno de um problema, não podendo ser aplicadas em algumas situações. Para problemas transitórios, soluções numéricas, ao invés de analíticas, podem ser utilizadas para a obtenção de resultados mais fidedignos. Uma solução numérica consiste na divisão do elemento (em análise) em pequenas espessuras. Cada pequena espessura possui um ponto, localizado no seu centro, chamado ponto nodal. A informação de interesse é determinada para este ponto. O conjunto de pontos nodais, no qual o elemento é dividido, é chamado de malha. A Figura 5.1 apresenta um elemento de espessura  $L$ , dividido em 5 pontos nodais. A linha tracejada representa a espessura ( $\Delta x$ ) que abrange o ponto nodal, sendo ela a delimitadora do material envolvente de cada ponto nodal.

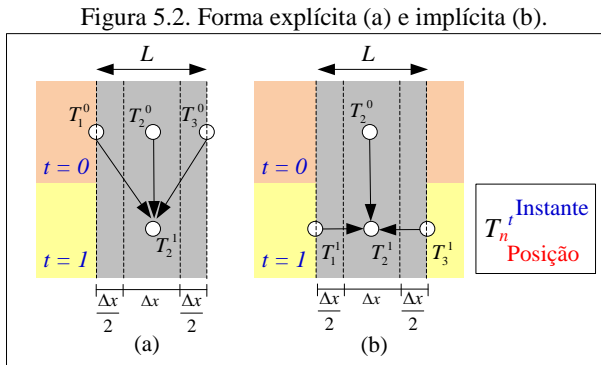
Figura 5.1. Divisão do elemento em pontos nodais.



A espessura  $\Delta x$  é obtida pela divisão da espessura total  $L$  pelo número de pontos nodais no qual se deseja trabalhar. A obtenção de um resultado preciso é dependente do número de pontos nodais. Quanto maior o número deles, mais fina é a malha e, conseqüentemente, mais precisos são os resultados. Porém, o aumento do número de pontos nodais ocasiona o incremento do tempo de processamento, tornando-se necessária a utilização de recursos computacionais mais potentes, o que, em muitas situações, não é viável (INCROPERA *et al.*, 2008).

### 5.1.1. Descrição do método

Para a determinação da distribuição de temperaturas de um elemento, as soluções, por meio do método das diferenças finitas, podem ser obtidas por duas formas: explícita e implícita. No método explícito, as temperaturas, no instante zero, do ponto nodal em análise e dos pontos nodais adjacentes são conhecidas. A partir delas, é determinada a temperatura do ponto nodal no instante futuro. No método implícito, a temperatura do nó em análise, no instante zero, é conhecida, e as temperaturas dos nós adjacentes, no instante futuro, são conhecidas. Com base nestas informações, determina-se a temperatura do nó em análise para o instante futuro (INCROPERA *et al.*, 2008). A Figura 5.2 representa, de forma ilustrativa, a aplicação do método explícito (a) e implícito (b).



Nesta pesquisa, para a determinação das temperaturas no instante futuro, considerou-se o método explícito. Este método foi empregado devido à consideração de que o elemento estava em equilíbrio térmico com o ambiente, no instante inicial. Ou seja, a temperatura de todos os pontos nodais no instante zero foi considerada igual à temperatura ambiente.

Para o desenvolvimento da equação que determina a temperatura do ponto nodal, no instante futuro, utilizou-se o método do balanço de energia. Neste método, a equação das diferenças finitas é obtida por meio da conservação de energia do volume de controle ao entorno do nó. A forma geral do balanço de energia pode ser representada por:

$$E_{entra} - E_{sai} = \Delta E_{acumulada} \quad (5.1)$$

Na Equação 5.1, os termos  $E_{entra}$  e  $E_{sai}$  representam as trocas de calor, do ponto nodal em análise com seu entorno, por radiação e/ou convecção e/ou condução, a depender de sua localização. Estas trocas de calor são quantificadas empregando-se as equações apresentadas no Capítulo 2.

O termo  $\Delta E_{acumulada}$  está relacionado com as propriedades do material e sua variação de temperatura ao longo de seu volume, sendo dado pela seguinte equação:

$$E_{acumulada} = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dx \cdot dy \cdot dz \quad (5.2)$$

Onde:  $\rho$  é a massa específica do material,  $c$  é o calor específico do material,  $\partial T/\partial t$  é a variação da temperatura no tempo e  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$  são as dimensões do volume de controle.

Como neste trabalho é desenvolvida uma análise unidimensional, os termos  $dy$  e  $dz$  são desconsiderados da equação.

### 5.1.2. Critérios de Estabilidade

O cálculo das temperaturas no ponto nodal, para o instante futuro, é feito com base nos valores da sua temperatura e da de seus vizinhos, no instante inicial. Tais valores são calculados para os instantes futuros em um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ). Ou seja,  $\Delta t$  é a variação de tempo na qual se obtém uma nova temperatura para o ponto nodal. Assim, a distribuição de temperaturas é obtida avançando-se o tempo em intervalos  $\Delta t$ . Para o instante inicial zero, tem-se que  $t^0 = 0$ . No instante 1, tem-se  $t^1 = t^0 + \Delta t$ . No instante 2, tem-se  $t^2 = t^1 + \Delta t$ , e assim sucessivamente, até chegar-se ao tempo final  $t^f$ , quando se encerra a análise. Quanto menor o valor de  $\Delta t$  e de  $\Delta x$ , mais precisos são os resultados. Porém, maior será o tempo de cálculo necessário para obter-se a resposta. O valor de  $\Delta x$  é inicialmente determinado de acordo com a geometria do sistema em análise, com os recursos computacionais disponíveis. A partir da escolha de  $\Delta x$ , o valor de  $\Delta t$  não pode ser escolhido arbitrariamente, uma vez que depende de critérios de estabilidade. Com o avanço do tempo ( $t$ ), as temperaturas dos pontos nodais devem se aproximar, de modo contínuo, aos valores em regime estacionário. Contudo, os métodos numéricos podem apresentar variações nos resultados, fazendo com que as temperaturas divirjam



deste regime. Para que isso não ocorra, existe uma dependência entre os valores de  $\Delta t$ ,  $\Delta x$ , e demais parâmetros da equação que determina a temperatura no instante futuro (INCROPERA *et al.*, 2008).

Para os pontos nodais internos, o critério de estabilidade é representado pela equação de Fourier, dada por:

$$(1 - 2 \cdot Fo) \geq 0 \quad \text{sendo} \quad Fo = \frac{\lambda \cdot \Delta t}{\rho \cdot c \cdot \Delta x^2} \quad (5.3)$$

Onde:  $\lambda$  é a condutividade térmica do material envolvente ao ponto nodal ( $W/(m \cdot K)$ ),  $\Delta t$  é a variação do tempo que se obtém a nova temperatura ( $s$ ),  $\rho$  é a massa específica do material envolvente ao nó ( $kg/m^3$ ),  $c$  é o calor específico do material envolvente ao ponto nodal ( $J/kg \cdot K$ ), e  $\Delta x$  é a espessura que abrange a área envolvente ao ponto nodal ( $m$ ).

Para os pontos nodais superficiais, que sofrem ação da convecção e da radiação, o critério de estabilidade é dado por:

$$(1 - 2 \cdot Fo - 2 \cdot Bi \cdot Fo) \geq 0 \quad \text{sendo} \quad Bi = \frac{h \cdot \Delta x}{\lambda} \quad (5.4)$$

Onde:  $\lambda$  é a condutividade térmica do material envolvente ao nó ( $W/(m \cdot K)$ ),  $\Delta x$  é a espessura que abrange a área envolvente ao ponto nodal ( $m$ ) e  $h$  é o coeficiente de convecção ( $W/(m^2 \cdot K)$ ).

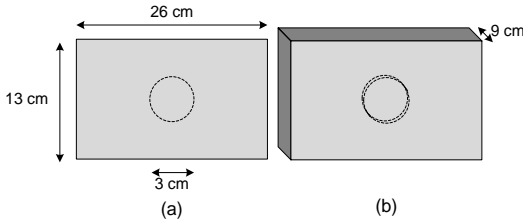
A primeira etapa para a resolução do problema, tendo conhecimento das propriedades térmicas e geométricas do elemento, é a determinação de  $\Delta x$  e de  $\Delta t$ , de forma que atendam os critérios de estabilidade do sistema. No próximo item, descreve-se o elemento analisado e suas propriedades geométricas e térmicas, além dos valores adotados para  $\Delta x$  e  $\Delta t$ . Apresenta-se ainda, o desenvolvimento das equações que possibilitarão a determinação das temperaturas futuras para os pontos nodais.

## 5.2. DISCRETIZAÇÃO DO PROBLEMA

O elemento modelado matematicamente possui as mesmas dimensões que o utilizado no procedimento experimental, moldado em

concreto, com dimensões de  $26\text{ cm} \times 13\text{ cm} \times 9\text{ cm}$ . A uma profundidade de  $2\text{ cm}$ , existe uma falha, simulada com poliestireno, que possui  $3\text{ cm}$  de diâmetro, conforme apresentado na Figura 5.3.

Figura 5.3. Ilustração da amostra utilizada na modelagem.



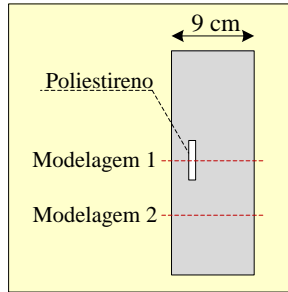
As propriedades do concreto e do poliestireno, adotadas na modelagem matemática, foram as mesmas utilizadas por Weiser *et al.* (2010), e estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Propriedades dos materiais utilizados.

<b>Material</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Concreto	Condutividade térmica ( $\lambda$ )	2,1 W/(m.K)
	Calor Específico ( $c$ )	1000 J/(kg.K)
	Massa Específica ( $\rho$ )	2400 kg/m <sup>3</sup>
Poliestireno	Condutividade térmica ( $\lambda$ )	0,04 W/(m.K)
	Calor Específico ( $c$ )	1000 J/(kg.K)
	Massa Específica ( $\rho$ )	30 kg/m <sup>3</sup>

A modelagem deste problema foi desenvolvida em uma dimensão, paralela à espessura do elemento ( $9\text{ cm}$ ), e feita em duas etapas. Uma que passa ao centro do elemento (Modelagem 1), contendo o poliestireno, e outra que passa em um ponto contendo apenas concreto (Modelagem 2), conforme representado pelas linhas tracejadas da Figura 5.4.

Figura 5.4. Localização das modelagens unidimensionais.



Desta forma, objetiva-se determinar a diferença da temperatura na superfície, no ponto que contém o defeito (poliestireno) no seu interior, e no ponto sem defeito.

O primeiro passo, para iniciar-se a modelagem matemática, é a definição do número de pontos nodais a serem analisados. Nesta pesquisa, optou-se pela divisão do elemento em 150 partes, obtendo-se assim um  $\Delta x = 0,06 \text{ cm}$ . A divisão do elemento em 150 partes resulta em um número de 151 pontos nodais. Para cada ponto nodal, criou-se uma equação, por meio do balanço de energia, para que sua temperatura nos instantes futuros pudesse ser determinada. No entanto, alguns pontos possuem as mesmas condições de contorno e, conseqüentemente, o mesmo balanço de energia, resultando em uma equação igual. Assim, para a Modelagem 1, as equações são divididas em quatro grupos:

- I - Equações dos pontos nodais superficiais;
- II - Equação dos pontos nodais internos em concreto;
- III - Equação dos pontos nodais internos em poliestireno e;
- IV - Equações dos pontos nodais localizados próximo a interseção entre o concreto e o poliestireno.

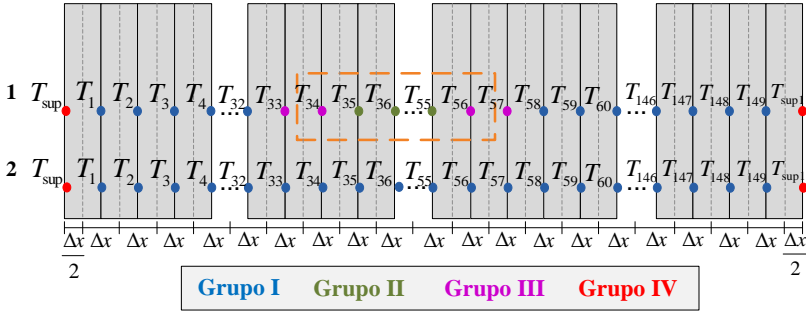
Na Modelagem 2, o material que a constitui é apenas o concreto e, desta forma, são necessários apenas dois grupos de equações:

I - Grupo formado pelos dois pontos nodais superficiais ( $T_{sup}$  e  $T_{sup1}$ );

II - Grupo formado por todos os demais pontos nodais ( $T_1$  a  $T_{149}$ ).

A Figura 5.5 apresenta a localização dos pontos nodais.

Figura 5.5. Representação dos pontos nodais.



Como se pode observar na Figura 5.5, o Grupo I é constituído pelos pontos nodais que estão nos intervalos de  $T_1$  a  $T_{32}$  e de  $T_{58}$  a  $T_{149}$ . O Grupo II é formado pelos pontos nodais entre  $T_{35}$  e  $T_{55}$ . O Grupo III é formado pelos pontos  $T_{33}$ ,  $T_{34}$ ,  $T_{56}$  e  $T_{57}$ , que se encontram na interseção entre o concreto e o poliestireno. Por último, o Grupo IV é constituído por dois pontos nodais, nomeados  $T_{sup}$  e  $T_{sup1}$ .

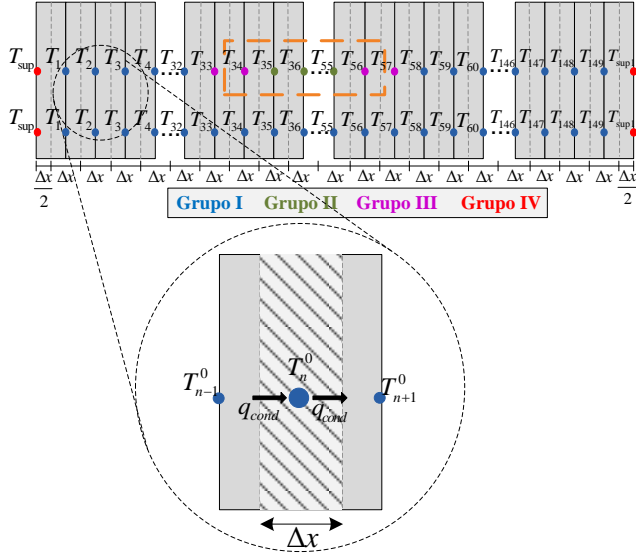
A variação do tempo de cálculo ( $\Delta t$ ), para a qual se obtém uma nova resposta das temperaturas, foi definida como  $0,1 s$ , atendendo-se os requisitos de estabilidade do sistema para o concreto, para o poliestireno e para as condições do ambiente. Vale ressaltar que, em ambas as modelagens (1 e 2), utilizou-se o mesmo número de pontos nodais e o mesmo tempo de cálculo.

As equações desenvolvidas, para cada grupo de pontos nodais, estão abaixo descritas. Inicia-se com os pontos nodais internos em concreto, seguido dos pontos nodais internos em poliestireno. Após, são apresentadas as equações dos pontos nodais localizados na interseção dos materiais e, por último, as equações dos pontos nodais superficiais.

### 5.2.1. Balanço de Energia para o Grupo I e II

Os pontos nodais internos, que não estão em contato com o ambiente, recebem e transferem energia somente por meio da condução. Sendo  $T_n^0$ , a Figura 5.6 representa, para qualquer ponto nodal dos Grupos I ou II, localizado na posição  $n$  e no tempo inicial  $0$ , o seu respectivo balanço de energia.

Figura 5.6. Balanço de energia no ponto nodal  $T_n$ .



O ponto nodal  $T_n$  recebe energia do ponto nodal  $T_{n-1}$  por meio da condução, e a energia que sai dele, também por meio da condução, é transferida para o ponto nodal  $T_{n+1}$ . Desta forma, a Equação (5.1) se torna

$$\begin{aligned} E_{ntra} - E_{sai} &= \Delta E_{acumulada} \\ q_{cond} - q_{cond} &= \Delta E_{acumulada} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Substituindo-se a Equação (5.5) nas Equações (2.3) e (5.2), temos

$$\frac{\lambda \cdot (T_{n-1}^0 - T_n^0)}{\Delta x} - \frac{\lambda \cdot (T_n^0 - T_{n+1}^0)}{\Delta x} = \frac{\rho \cdot c \cdot \Delta x \cdot (T_n^1 - T_n^0)}{\Delta t} \quad (5.6)$$

Isolando-se  $T_n^1$  temos

$$T_n^1 = T_n^0 - \frac{2 \cdot \lambda \cdot \Delta t \cdot T_n^0}{\Delta x^2 \cdot \rho \cdot c} + \frac{\lambda \cdot \Delta t \cdot T_{n+1}^0}{\Delta x^2 \cdot \rho \cdot c} + \frac{\lambda \cdot \Delta t \cdot T_{n-1}^0}{\Delta x^2 \cdot \rho \cdot c} \quad (5.7)$$

Substituindo-se a Equação (5.7) na Equação (5.3), obtém-se

$$T_n^1 = (1 - 2 \cdot Fo) \cdot T_n^0 + T_{n-1}^0 \cdot Fo + T_{n+1}^0 \cdot Fo \quad (5.8)$$

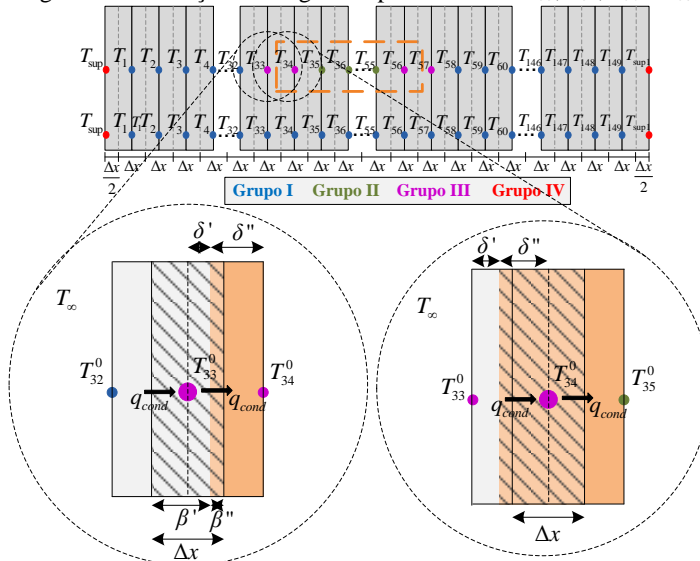
Como pode-se ver na Equação (5.8), a temperatura do ponto nodal  $n$ , para o instante futuro, é dependente do número de Fourier e de sua temperatura e dos pontos nodais adjacentes, no instante zero. Isso explica o fato de a análise de instabilidade para os pontos nodais internos estar associada ao número de Fourier.

Vale ressaltar que, esta equação foi também utilizada na Modelagem 2, na qual o material que compõe os pontos nodais internos é o concreto.

### 5.2.2. Balanço de Energia para o Grupo III

Os pontos nodais próximos ao defeito são aqueles que se encontram próximos à intercessão concreto/poliestireno, sendo eles:  $T_{33}$ ,  $T_{34}$ ,  $T_{56}$  e  $T_{57}$ . Estes pontos recebem e transferem calor apenas por meio da condução, mas devido à sua localização, necessitam de uma análise minuciosa, relacionada à sua resistência térmica. A Figura 5.7 apresenta o balanço de energia de tais pontos.

Figura 5.7. Balanço de energia nos pontos nodais  $T_{33}$ ,  $T_{34}$ ,  $T_{56}$  e  $T_{57}$ .



O ponto nodal  $T_{34}$  recebe energia do ponto nodal  $T_{33}$ , por meio da condução, e, por meio deste fenômeno, transfere energia para o nó  $T_{35}$ . Como se pode observar, a espessura abrangente do nó  $T_{34}$  é constituída por poliestireno. Porém o calor transferido do ponto nodal  $T_{33}$  passa pela interseção entre o concreto e o poliestireno. Desta forma, faz-se necessário o cálculo da resistência equivalente ( $R_{eq}$ ) entre o concreto e o poliestireno, em função de  $\delta'$  e  $\delta''$ . Esta resistência é dada por:

$$R_{eq} = \frac{L}{\lambda} \quad \therefore \quad R_{eq} = \frac{\delta'}{\lambda_{concreto}} + \frac{\delta''}{\lambda_{poli}} \quad (5.9)$$

Desta forma, a Equação (5.1) se torna:

$$\begin{aligned} E_{ntra} - E_{sai} &= \Delta E_{acumulada} \\ q_{cond} - q_{cond} &= \Delta E_{acumulada} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Substituindo a Equação (5.10) nas Equações (2.3) e (5.2), chega-se a:

$$\begin{aligned} \frac{(T_{33}^0 - T_{34}^0)}{R_{eq}} - \frac{\lambda_{poli} \cdot (T_{34}^0 - T_{35}^0)}{\Delta x} = \\ \rho_{poli} \cdot c_{poli} \cdot \Delta x \cdot \frac{(T_{34}^1 - T_{34}^0)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Isolando-se  $T_{34}^1$  temos:

$$\begin{aligned} T_{34}^1 = T_{34}^0 + \frac{\Delta t \cdot (T_{33}^0 - T_{34}^0)}{R_{eq} \cdot \Delta x \cdot \rho_{poli} \cdot c_{poli}} - \\ \frac{\Delta t \cdot \lambda_{poli} \cdot (T_{34}^0 - T_{35}^0)}{\Delta x^2 \cdot \rho_{poli} \cdot c_{poli}} \end{aligned} \quad (5.12)$$

E, substituindo-se a Equação (5.12) na Equação (5.3) temos:

$$T_{34}^1 = T_{34}^0 + \frac{\Delta t \cdot (T_{33}^0 - T_{34}^0)}{R_{eq} \cdot \Delta x \cdot \rho_{poli} \cdot c_{poli}} - F_o \cdot (T_{34}^0 - T_{35}^0) \quad (5.13)$$

De forma análoga, a temperatura do ponto nodal  $T_{56}$  é dada por:

$$T_{56}^1 = T_{56}^0 + FO \cdot (T_{55}^0 - T_{56}^0) - \frac{\Delta t \cdot (T_{56}^0 - T_{57}^0)}{R_{eq} \cdot \Delta x \cdot \rho_{poli} \cdot c_{poli}} \quad (5.14)$$

Para a determinação da temperatura no instante futuro dos pontos nodais  $T_{36}$  e  $T_{57}$ , além de resistência térmica equivalente, tem-se uma observação no cálculo da energia acumulada. Como visto anteriormente, a energia acumulada depende das propriedades do material que compõe o ponto nodal. Para o caso dos pontos nodais  $T_{36}$  e  $T_{57}$ , a espessura ( $\Delta x$ ) pertencente a eles é constituída por concreto ( $\beta'$ ) e poliestireno ( $\beta''$ ), como se pode observar na Figura 5.7. Desta forma, a Equação (5.1) se torna

$$\begin{aligned} E_{ntra} - E_{sai} &= \Delta E_{acumulada} \\ q_{cond} - q_{cond} &= \Delta E_{acumulada} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Substituindo-se a Equação (5.15) nas Equações (2.3) e (5.2), temos:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_{conc} \cdot (T_{32}^0 - T_{33}^0)}{\Delta x} - \frac{(T_{33}^0 - T_{34}^0)}{R_{eq}} = \\ \rho_{con} \cdot c_{con} \cdot \beta' \cdot \frac{(T_{33}^1 - T_{33}^0)}{\Delta t} + \rho_{poli} \cdot c_{poli} \cdot \beta'' \cdot \frac{(T_{33}^1 - T_{33}^0)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (5.16)$$

Isolando-se  $T_{33}^1$ , temos:

$$\begin{aligned} T_{33}^1 = T_{33}^0 + \frac{\Delta t \cdot \lambda_{con} \cdot (T_{32}^0 - T_{33}^0)}{\Delta x \cdot (\beta' \cdot \rho_{con} \cdot c_{con} + \beta'' \cdot \rho_{poli} \cdot c_{poli})} - \\ \frac{\Delta t \cdot (T_{33}^0 - T_{34}^0)}{R_{eq} \cdot (\beta' \cdot \rho_{con} \cdot c_{con} + \beta'' \cdot \rho_{poli} \cdot c_{poli})} \end{aligned} \quad (5.17)$$

De forma análoga, a temperatura do ponto nodal  $T_{57}$  é dada por:



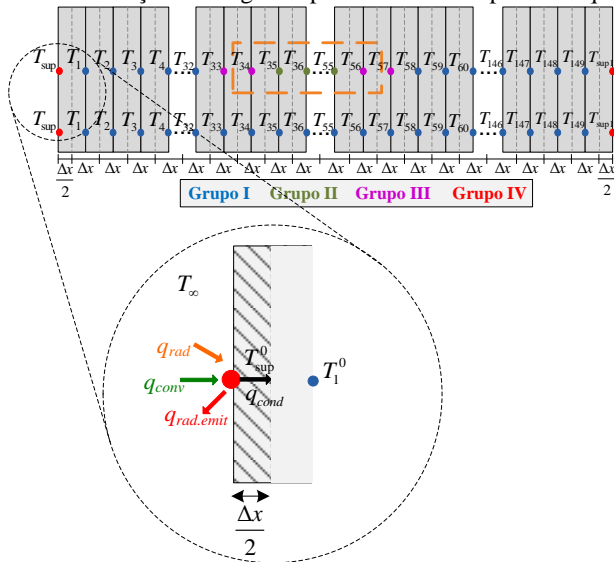
$$T_{57}^1 = T_{57}^0 + \frac{\Delta t \cdot (T_{56}^0 - T_{57}^0)}{R_{eq} \cdot (\beta^I \cdot \rho_{con} \cdot c_{con} + \beta^{II} \cdot \rho_{poli} \cdot c_{poli})} - \frac{\Delta t \cdot \lambda_{con} \cdot (T_{57}^0 - T_{58}^0)}{\Delta x \cdot (\beta^I \cdot \rho_{con} \cdot c_{con} + \beta^{II} \cdot \rho_{poli} \cdot c_{poli})} \quad (5.18)$$

### 5.2.3. Balanço de Energia para o Grupo IV

Os pontos nodais superficiais são aqueles que estão em contato com o meio e, conseqüentemente, sofrem trocas de calor por condução, radiação e convecção.

O modelo criado, por ser unidimensional, possui dois pontos superficiais. Um que se encontra na superfície aquecida e outro na superfície oposta. Na Figura 5.8 é apresentado o balanço de energia do ponto nodal que se encontra na superfície aquecida.

Figura 5.8. Balanço de energia no ponto nodal da superfície aquecida.



Para o ponto nodal superficial, ocorrem trocas de calor por radiação, que chegam a ele por meio da fonte aquecedora e/ou do ambiente ( $q_{rad}$ ), sendo parte desta radiação emitida ( $q_{rad.emi}$ ). Pela condução, o ponto nodal  $T_{sup}$  transfere energia para o ponto nodal  $T_{n+1}$ .

E pela convecção ( $q_{conv}$ ), o ponto nodal ( $T_{sup}$ ) troca calor com o ambiente. Desta forma, a Equação (5.1) se torna:

$$\begin{aligned} E_{ntra} - E_{sai} &= \Delta E_{acumulada} \\ q_{conv} + q_{rad} - q_{rad.emit} - q_{cond} &= \Delta E_{acumulada} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Substituindo a Equação (5.6) nas Equações (2.3), (2.4), (2.7) e (5.2), tem-se:

$$\begin{aligned} h_{ext} \cdot (T_{\infty}^0 - T_{sup}^0) + q_{rad} - \varepsilon \cdot \sigma \cdot ((T_{sup}^0)^4 - (T_{\infty}^0)^4) - \\ \frac{\lambda \cdot (T_{sup}^0 - T_1^0)}{\Delta x} = \rho \cdot c \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{(T_{sup}^1 - T_{sup}^0)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Isolando-se  $T_{sup}^1$  tem-se:

$$\begin{aligned} T_{sup}^1 = T_{sup}^0 + \frac{2 \cdot \Delta t \cdot \lambda \cdot T_1^0}{\rho \cdot c \cdot \Delta x^2} - \frac{2 \cdot \Delta t \cdot \lambda \cdot T_{sup}^0}{\rho \cdot c \cdot \Delta x^2} + \\ \frac{2 \cdot \Delta t \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\infty}^0)^4}{\rho \cdot c \cdot \Delta x} - \frac{2 \cdot \Delta t \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{sup}^0)^4}{\rho \cdot c \cdot \Delta x} + \\ \frac{2 \cdot \Delta t \cdot q_{rad}}{\rho \cdot c \cdot \Delta x} - \frac{2 \cdot \Delta t \cdot h_{ext} \cdot T_{sup}^0}{\rho \cdot c \cdot \Delta x} + \frac{2 \cdot \Delta t \cdot h_{ext} \cdot T_{\infty}^0}{\rho \cdot c \cdot \Delta x} \end{aligned} \quad (5.12)$$

E, substituindo a Equação (5.12) nas Equações (5.3) e (5.5), tem-se:

$$\begin{aligned} T_{sup}^1 = (1 - 2 \cdot Bi \cdot Fo - 2 \cdot Fo) T_{sup}^0 + 2 \cdot Fo \cdot T_1^0 + \\ 2 \cdot Bi \cdot Fo \cdot T_{\infty}^0 + q_{rad.emit} \cdot \left( (T_{\infty}^0)^4 - (T_{sup}^0)^4 \right) + q_{sol} \end{aligned} \quad (5.13)$$

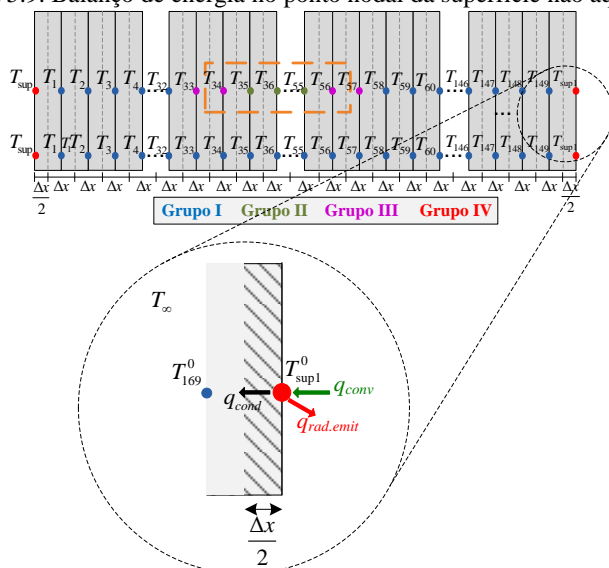
Onde:

$$q_{rad.emit} = \frac{2 \cdot \Delta t \cdot \varepsilon \cdot \sigma}{\rho \cdot c \cdot \Delta x} \quad \therefore \quad q_{sol} = \frac{2 \cdot \Delta t \cdot q_{rad}}{\rho \cdot c \cdot \Delta x} \quad (5.14)$$

Como observado na Equação (5.14), a temperatura do ponto nodal superficial para o instante futuro é dependente de sua temperatura, da temperatura ambiente e do ponto nodal vizinho, no instante zero. Além disso, é dependente do número de Fourier e do número de Biot. Isso explica o fato da análise de instabilidade, para os nós superficiais, estar associada a tais valores.

Para o ponto nodal localizado na face superficial não aquecida, o balanço de energia será:

Figura 5.9. Balanço de energia no ponto nodal da superfície não aquecida.



A variável que difere a superfície aquecida da não aquecida, como se pode observar na Figura 5.9, é o aquecimento ( $q_{rad}$ ). E, adotando-se procedimento análogo ao empregado na determinação da Equação (5.13), pode-se obter a temperatura da superfície não aquecida no instante futuro, por meio da seguinte equação:

$$T_{sup1}^1 = (1 - 2 \cdot Bi \cdot Fo - 2 \cdot Fo) T_{sup1}^0 + 2 \cdot Fo \cdot T_{169}^0 + 2 \cdot Bi \cdot Fo \cdot T_{\infty}^0 + q_{rad.emit} \cdot \left( (T_{\infty}^0)^4 - (T_{sup1}^0)^4 \right) \quad (5.15)$$

Sendo  $Bi$  e  $Fo$  dado pelas Equações (5.3) e (5.5) respectivamente.

Como se pode observar, as Equações (5.13) e (5.15) dependem do número de Biot que, por sua vez, depende do coeficiente de convecção. Os coeficientes de convecção foram determinados para ambas as superfícies, considerando-se a geometria e as propriedades do elemento analisado. A análise foi dividida primeiramente se considerando apenas a convecção natural. Nela, o coeficiente de convecção foi variável ao longo do tempo, de acordo com as mudanças de temperatura da superfície. Por último, considerou-se a convecção forçada, na qual o coeficiente de convecção foi determinado para cada velocidade de vento, simulada durante o procedimento experimental. Os cálculos necessários para a determinação de tais coeficientes estão apresentados na próxima seção.

Vale ressaltar que, estas equações foram também utilizadas na Modelagem 2 para os pontos superficiais.

### 5.3. O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

Para quantificar a influência das trocas de calor por convecção foram determinados, para o modelo criado, os coeficientes de transferência de calor natural e forçada.

Como apresentado no Capítulo 2, a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção é um dos principais objetivos do estudo da convecção. A equação que o determina depende, além do comprimento longitudinal do elemento e da condutividade térmica do fluido, do número de Nusselt (INCROPERA *et al.*, 2008). A equação que o determina é dada por:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda}{L} \quad (5.16)$$

Onde:  $\lambda = 26,3 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ,  $L = 0,26 \text{ m}$ , e  $Nu$  é o número de Nusselt.

O procedimento adotado para o cálculo do número de Nusselt está descrito abaixo, para a convecção natural e para a convecção forçada, respectivamente.

### 5.3.1. Convecção Natural

A transferência de calor por convecção natural ocorre entre a superfície e um fluido ao seu redor, em função do campo gravitacional.

Para o cálculo de Nusselt, é necessário inicialmente se conhecer a condição de escoamento do fluido (laminar ou turbulento). Para a convecção natural, esta determinação é feita por meio do número de Rayleigh ( $Ra_L$ ). Este, relaciona o número de Grashof ( $Gr$ ), que representa a relação entre a força de empuxo e as forças viscosas do fluido, com o número de Prandtl ( $Pr$ ), e é dado por:

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}$$
$$10^4 < Ra_L < 10^9 \rightarrow \text{Laminar}$$
$$10^9 < Ra_L < 10^{13} \rightarrow \text{Turbulento}$$
(5.17)

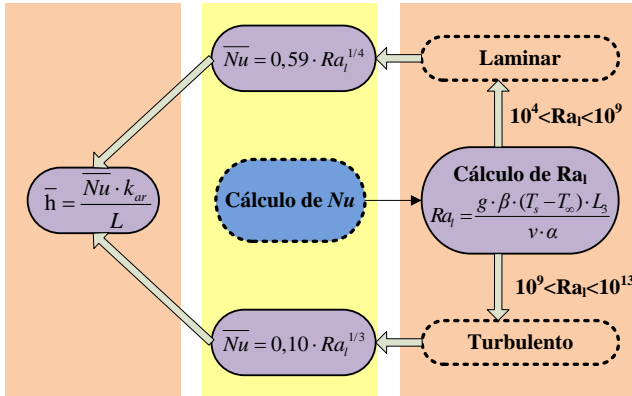
Na equação de Rayleigh,  $g$  é a força gravitacional,  $\beta$  é o coeficiente de expansão volumétrica térmica,  $T_s$  é a temperatura da superfície,  $T_\infty$  é a temperatura do fluido,  $L$  é a dimensão do elemento paralela ao escoamento,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido, e  $\alpha$  é a difusividade térmica. Adotou-se, como valores das propriedades do fluido, os apresentados por Incropera *et al.* (2008), considerando-se:  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $\beta$  = variável em função de  $T_s$  e  $T_\infty$ ,  $L = 0,26 \text{ m}$ ,  $\nu = 15,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , e  $\alpha = 22,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . A temperatura do fluido foi adotada como sendo igual à temperatura ambiente ( $23^\circ \text{ C}$ ). A temperatura inicial da superfície, devido ao equilíbrio térmico, foi também considerada igual à temperatura ambiente.

Definida a condição de escoamento, laminar ou turbulenta, de acordo com o posicionamento do elemento em análise, tem-se uma equação que determina o número de Nusselt. Para a realização do experimento, a placa analisada se encontrava na posição vertical. Desta forma, a expressão que fornece o número de Nusselt médio é dada por:

$$\overline{Nu} = 0,59 \cdot Ra_L^{1/4} \rightarrow \text{Laminar}$$
$$\overline{Nu} = 0,10 \cdot Ra_L^{1/3} \rightarrow \text{Turbulento}$$
(5.18)

A Figura 5.10 apresenta de forma esquemática o cálculo do coeficiente de convecção para o regime natural.

Figura 5.10. Forma esquemática para o cálculo do coeficiente de convecção natural.



A temperatura da superfície  $T_s$  varia ao longo do tempo. Inicialmente, ela está a  $23^\circ C$ , devido ao equilíbrio térmico com o ambiente. Após, é aplicado o aquecimento durante  $5 \text{ minutos}$ , e sua temperatura aumenta, diminuindo quando o aquecimento é cessado. Em virtude desta variação, não foi possível estimar um valor fixo do coeficiente de convecção natural. Portanto, este teve um comportamento variável ao longo do tempo. Ou seja, para cada mudança da temperatura na superfície, tem-se a repetição do cálculo de Nusselt, e a obtenção de um novo valor de  $h$ .

### 5.3.2. Convecção Forçada

Como citado anteriormente, a convecção é dita forçada quando agentes externos provocam o movimento do fluido ao entorno da superfície.

Para a convecção forçada, é o número de Reynolds ( $Re$ ), relacionando as forças de inércias com as forças viscosas no fluido, que permite a definição do regime de escoamento (laminar ou turbulento) (INCROPERA *et al.*, 2008). Sendo este dado por:

$$Re = \frac{\rho \cdot V_{\infty} \cdot x}{\mu} \quad (5.19)$$

$$Re_x > 5 \cdot 10^5 \rightarrow \text{Turbulento}$$

Onde:  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $V_{\infty}$  é a velocidade do fluido,  $x$  é a dimensão da superfície em análise (paralela ao escoamento), e  $\mu$  é a viscosidade do fluido. As propriedades do fluido adotadas são as apresentadas por Incropera *et al.*, (2008), considerando-se:  $\rho = 1,1614 \text{ kg/m}^3$ ,  $x = 0,26 \text{ m}$ , e  $\mu = 1,846 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ . Para a velocidade do fluido (o vento), são consideradas 3 velocidades:  $1 \text{ m/s}$ ,  $2 \text{ m/s}$  e  $5 \text{ m/s}$ .

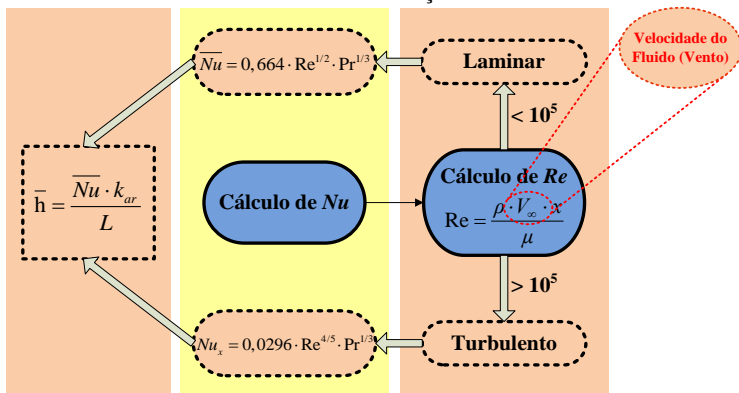
Determinada a condição de escoamento do fluido, por meio da análise do número de *Reynolds*, os valores de Nusselt médio e local podem ser obtidos por:

$$\begin{aligned} \overline{Nu} &= 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \\ Nu_x &= 0,0296 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \end{aligned} \quad (5.20)$$

Onde:  $Pr$  é o número de Prandtl adotado  $0,7$ , de acordo com as propriedades apresentadas por Incropera *et al.* (2008).

A Figura 5.11 apresenta, de forma esquemática, os procedimentos adotados para o cálculo do coeficiente de convecção forçada.

Figura 5.11. Forma esquemática para o cálculo de do coeficiente de convecção de natureza forçada.



Como destacado na Figura 5.11, a velocidade do vento, fluido de interesse nesta pesquisa, é necessária para a determinação do número de Reynolds, que está diretamente relacionado com o valor de Nusselt, e consequentemente com o coeficiente de convecção forçada.

O processo de cálculo do número de Nusselt foi repetido três vezes, de forma a obterem-se os três valores do coeficiente de convecção, considerando-se as três velocidades analisadas (1, 2 e 5 m/s).



## **CAPÍTULO 6**

### **RESULTADOS**

---

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados teóricos e experimentais obtidos com a pesquisa.

Em uma primeira etapa, detalham-se os resultados obtidos experimentalmente, para amostras que continham o defeito localizado em profundidades de 2 e 3 *cm*. A estes resultados, dá-se a denominação de experimentais.

Na segunda etapa, são abordados os resultados provenientes da simulação numérica, desenvolvida considerando-se o defeito nas profundidades de 1, 2, 3 e 4 *cm*. Estes resultados recebem a denominação de teóricos. Nesta etapa, tais resultados são apresentados graficamente, em conjunto com os resultados experimentais. Desta forma, torna-se possível uma melhor comparação entre as duas diferentes análises.

#### **6.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Neste item, descreve-se inicialmente a quantificação da radiação emitida pelos aquecedores utilizados no experimento. Em seguida, destacam-se os termogramas obtidos após o término do aquecimento, para cada condição (sem vento e com vento de 1, 2 e 5 *m/s*). Na sequência, é apresentada uma análise temporal das variações de temperatura nos pontos com defeito e sem defeito. E, por fim, é exposta

uma análise do contraste térmico absoluto e normalizado, obtido para cada caso.

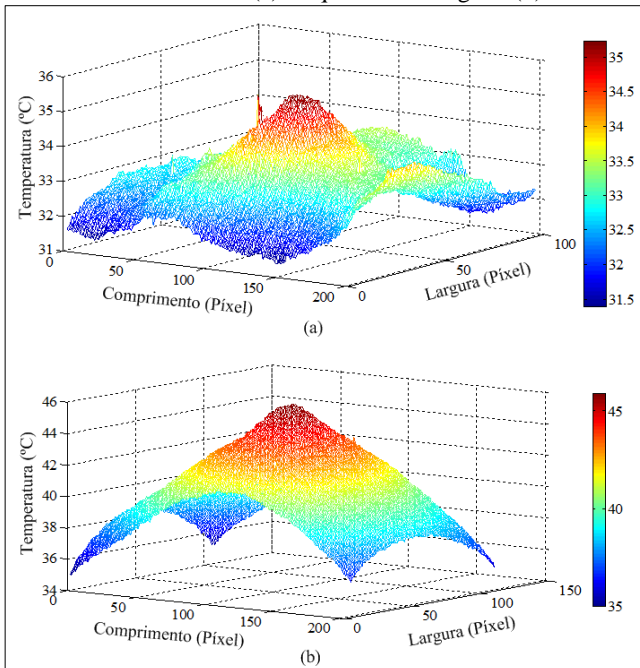
### 6.1.1. Uniformidade do Aquecimento

Esta seção apresenta os resultados de testes realizados para a determinação do tipo de aquecimento e do campo radiante.

#### 6.1.1.1 Determinação do Tipo de Aquecimento

Como visto no Capítulo 4, foram realizados testes preliminares para a determinação do tipo de aquecimento a ser adotado nesta pesquisa. Os dois métodos utilizados foram: lâmpada infravermelha e aquecedor halógeno. A Figura 6.1 ilustra graficamente as temperaturas da superfície para o aquecimento realizado com lâmpadas infravermelhas (a) e aquecedor halógeno (b).

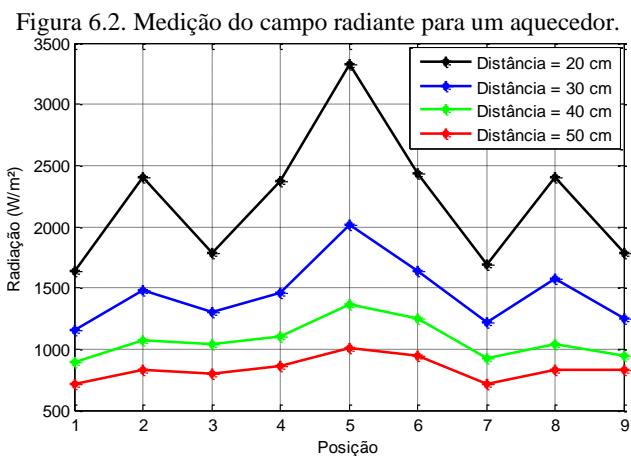
Figura 6.1. Temperatura da superfície para o aquecimento com lâmpada infravermelha (a) e aquecedor halógeno (b).



Constata-se que o defeito, localizado na região central, pôde ser identificado em ambos os casos. No entanto, o aquecimento efetuado por meio do aquecedor halógeno apresentou, para o conjunto de testes realizados neste trabalho, um maior aumento de temperatura na região com defeito. Desta forma, este foi o tipo de aquecimento adotado na pesquisa.

### 6.1.1.2 Quantificação do Campo Radiante

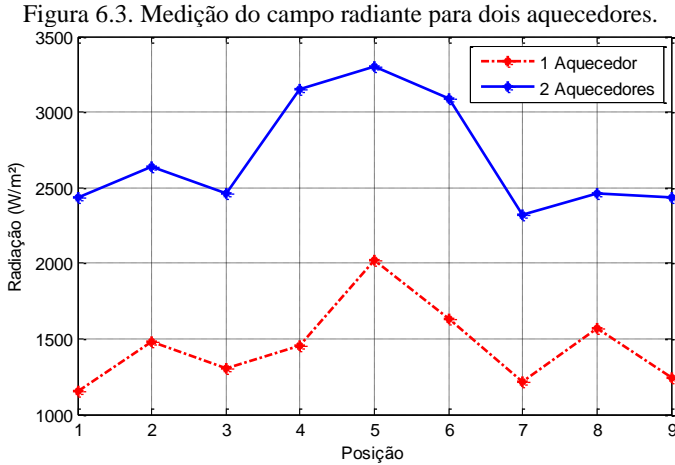
Após a escolha do tipo de aquecimento, realizaram-se testes com o objetivo de medir o campo radiante que incide na superfície da amostra, considerando-se apenas um aquecedor. A Figura 6.2 apresenta os resultados desta medição para diferentes posições e distâncias, entre o aquecedor e o transdutor de fluxo de calor.



Verifica-se que o aquecimento se concentra no centro do aquecedor (Posição 5). Observa-se ainda que a curva de radiação se aproxima da forma horizontal, o que representa um aquecimento uniforme, na medida em que se aumenta a distância entre o aquecedor e o transdutor. No entanto, quanto maior esta distância, menor a tensão e, conseqüentemente, menor a radiação que incide na superfície do transdutor. Assim, em relação ao ensaio na amostra de concreto, o tempo necessário para aquecer tal amostra, de forma que o defeito seja visível, será maior.

Vale ressaltar que a amostra de concreto possui uma largura de 26 cm e uma altura de 13 cm, encontrando-se nas posições 4, 5 e 6.

Optou-se então pelo uso de dois aquecedores posicionados lado a lado, para uniformizar o aquecimento em tais pontos. A Figura 6.3 apresenta os resultados da medição do campo radiante, para um e dois aquecedores, posicionados a 30 cm de distância do transdutor.



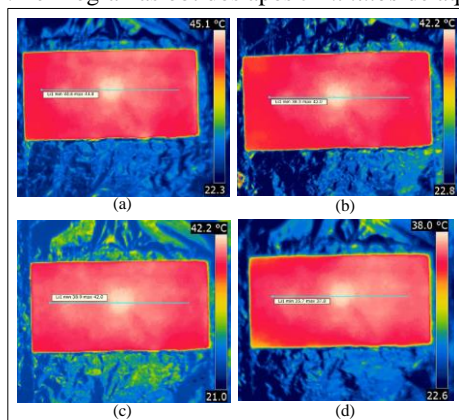
A magnitude da tensão nos pontos 4, 5 e 6 é de 3148, 3297 e 3089  $W/m^2$ , respectivamente, com o uso de dois aquecedores. Utilizou-se a média aritmética entre estes três valores e obteve-se um valor, para a radiação que incide na superfície, de 3178  $W/m^2$ . Este valor foi utilizado na simulação numérica realizada na pesquisa.

### 6.1.2. Temperaturas da superfície no instante inicial de resfriamento

Finalizada a etapa preliminar de ajustes, os ensaios começaram a ser executados. Inicialmente, realizaram-se os ensaios na amostra que possui o defeito na profundidade de 2 cm. Primeiramente, os ensaios foram conduzidos sem a ação do vento e, após, com vento de 1, 2 e 5 m/s.

A Figura 6.4 apresenta os termogramas obtidos no instante em que se iniciou o resfriamento (após 5 minutos de aquecimento), para o ensaio sem ação do vento (a), com vento de 1 m/s (b), com vento de 2 m/s (c), e com vento de 5 m/s (d).

Figura 6.4. Termogramas obtidos após 5 minutos de aquecimento.

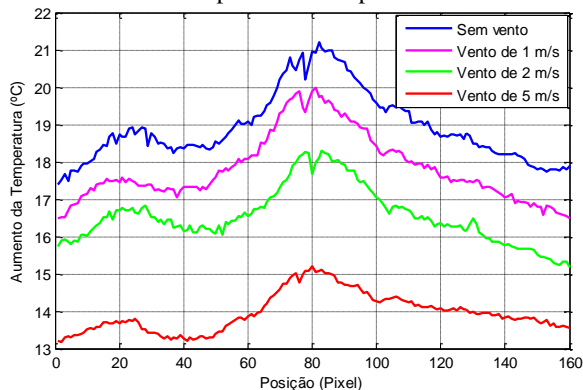


Observa-se que, de forma qualitativa, o defeito é visualizado nas quatro situações no instante inicial de resfriamento.

No entanto, a avaliação das imagens infravermelhas não se restringe apenas a uma análise qualitativa. Uma análise quantitativa pode ser realizada por meio de *softwares* apropriados. Utilizando-se o *software* FLIR, o uso da função linha possibilita a obtenção das temperaturas em cada pixel que a constitui.

Para os termogramas apresentados na Figura 6.4 é realizada a análise do aumento das temperaturas da superfície, de cada pixel, considerando as linhas representadas. As linhas passam ao centro do defeito e finalizam próximo às bordas laterais. Os resultados obtidos são expostos na Figura 6.5.

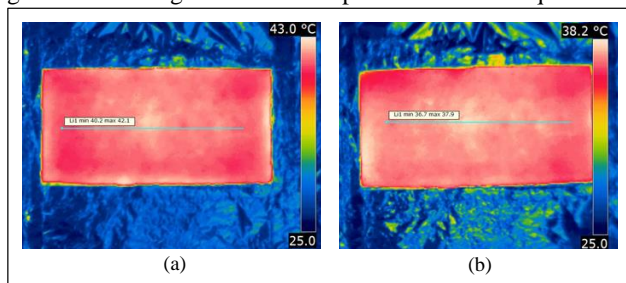
Figura 6.5. Aumento da temperatura na superfície em uma linha central.



O aumento da temperatura da superfície ocorre, de forma mais significativa, para a condição em que não há a ação do vento (curva azul escuro). Além disso, percebe-se que a diferença de temperatura, entre a região com defeito e a região sem defeito, diminui com o aumento da velocidade de vento. Isto fica mais evidente na velocidade de  $5\text{ m/s}$  (curva vermelha), para a qual o contraste térmico se reduz à metade do valor obtido sem a ação do vento. Observa-se ainda que, próximo ao pixel de número 80, ocorre uma queda abrupta, seguida de uma aumento íngreme na temperatura. Isto ocorre pois constatou-se a presença de uma pequena falha superficial na amostra de concreto, originada durante a fase de concretagem/cura da amostra.

Para a amostra com defeito a  $3\text{ cm}$  de profundidade, realizaram-se experimentos nas condições sem vento e com vento de  $5\text{ m/s}$ . A Figura 6.6 apresenta os termogramas obtidos após os  $5\text{ minutos}$  de aquecimento, para o experimento realizado sem a ação do vento (a) e com vento de  $5\text{ m/s}$  (b).

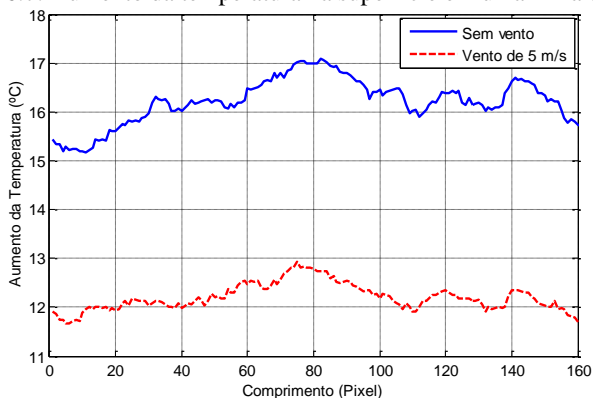
Figura 6.6. Termogramas obtidos após  $5\text{ minutos}$  de aquecimento.



No instante inicial de resfriamento, de forma qualitativa, o defeito não pôde ser visualizado com nitidez em nenhuma das situações. No entanto, é necessária uma análise quantitativa para garantir-se de que não há nenhuma anomalia.

A análise quantitativa, que apresenta o aumento das temperaturas da superfície para cada pixel das linhas, foi realizada para os termogramas da Figura 6.6. Os resultados obtidos são expressos na Figura 6.7.

Figura 6.7. Aumento da temperatura na superfície em uma linha central.



Na região com defeito (pixels de 60 a 100) ocorre um aumento de temperatura de aproximadamente  $1^{\circ} C$  para o ensaio realizado sem ação do vento. No entanto, para o ensaio realizado com vento de  $5 m/s$  o aumento é de pouco menos de  $1^{\circ} C$ . Isto expressa a importância de uma análise quantitativa nos ensaios termográficos, pois embora o defeito não tenha sido visualizado no termograma, por meio da análise gráfica suspeita-se que ele exista.

Com base nos resultados obtidos na análise dos termogramas capturados no instante inicial de resfriamento, pode-se concluir que, de forma qualitativa, a visualização do defeito para o mesmo tempo de aquecimento não foi nítida à profundidade de  $3 cm$ . No entanto, por meio da análise quantitativa, pôde-se perceber a existência da anomalia em ambos os casos, embora em menor proporção para o defeito com maior cobertura de concreto. Como apresentado por Cotic *et al.* (2015), uma melhor visualização do defeito na profundidade de  $3 cm$ , e consequentemente um aumento do contraste térmico, pode ser obtida aumentando-se o tempo de aquecimento da amostra.

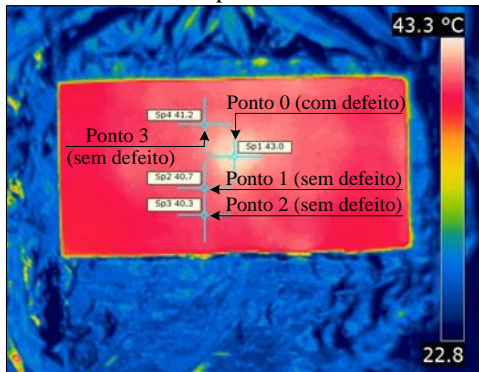
No que diz respeito ao efeito do vento, percebe-se que sua influência na visualização do defeito é mais significativa, quanto mais próximo da superfície o defeito estiver.

### 6.1.3. Análise Temporal das Temperaturas da Superfície

No item anterior, apresentaram-se as temperaturas da amostra no instante inicial, após cessar-se o aquecimento. No entanto, as

temperaturas da superfície da amostra foram monitoradas durante os primeiros 20 minutos de resfriamento. Com o objetivo de analisar temporalmente as temperaturas durante este período, são apresentados gráficos que representam a evolução da temperatura da superfície em diferentes pontos. Para este fim, considerou-se a temperatura em quatro pontos distintos, localizados dentro e fora do defeito. A Figura 6.8 apresenta o posicionamento destes quatro pontos.

Figura 6.8. Localização dos pontos empregados para a análise temporal das temperaturas.



Para a representação gráfica, utilizou-se a nomenclatura representada na Figura 6.8. O Ponto 0 (com defeito) está localizado ao centro dele e os demais (Ponto 1, Ponto 2 e Ponto 3) estão localizados em regiões sem defeito, sendo o Ponto 2 o mais afastado do centro do defeito. Durante o monitoramento das temperaturas registrou-se uma imagem a cada 10 segundos, totalizando-se 120 imagens. Para cada uma delas, coletou-se a temperatura dos quatro pontos, empregando-se a função ponto, disponível no *software* FLIR.

A análise temporal é apresentada para cada experimento realizado (sem vento e com vento de 1, 2 e 5 m/s), e encontra-se dividida em quatro etapas. Primeiramente, apresentam-se os termogramas obtidos após 2, 3, 4 e 5 minutos de resfriamento, com o intuito de fazer-se uma análise qualitativa. Na segunda etapa, expõem-se as curvas da variação da temperatura de cada ponto (1, 2, 3 e 4) ao longo dos 20 minutos de resfriamento. Por último, apresenta-se o contraste térmico absoluto obtido para cada ponto.

Inicia-se com a apresentação dos resultados obtidos sem a ação do vento, para as amostras com defeito nas profundidades de 2 e 3 cm.

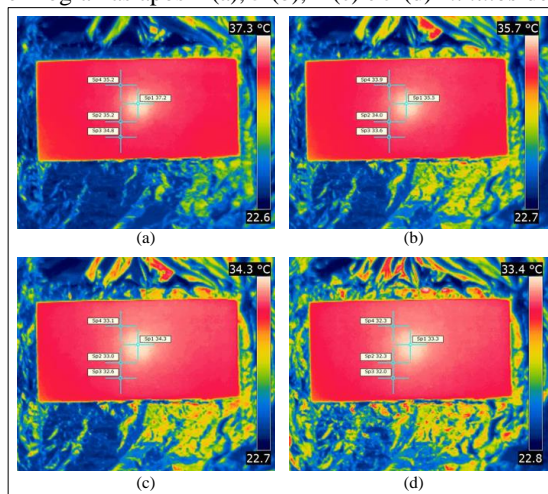


Na sequência, expõe-se os resultados dos ensaios realizados com velocidade de 1 e 2 m/s, para a amostra com defeito a 2 cm de profundidade. Por fim, são expostos os resultados dos ensaios com vento de 5 m/s, para as amostras com defeito a 2 e 3 cm de profundidade.

### 6.1.3.1 Sem Vento

Uma análise temporal qualitativa é realizada empregando-se os termogramas capturados ao longo do resfriamento da amostra. A Figura 6.9 apresenta os termogramas capturados no ensaio sem a ação de vento, para a amostra com defeito a 2 cm de profundidade, em diferentes períodos de tempo: 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) minutos de resfriamento.

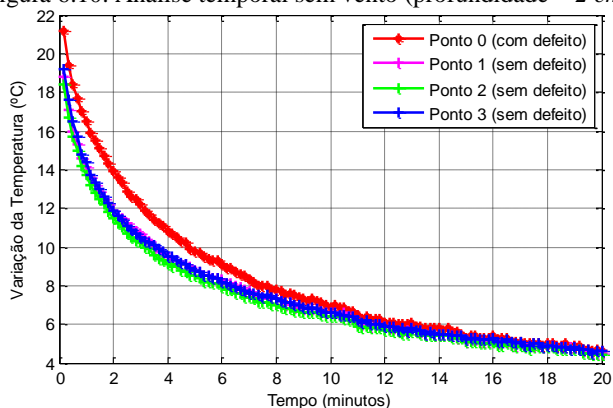
Figura 6.9. Termogramas após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) minutos de resfriamento.



Após 2 minutos de resfriamento, o defeito é ainda visualizado. Entretanto, esta visualização tende a ficar menos nítida com o aumento do tempo de resfriamento. Observa-se ainda que a região em torno do defeito fica mais aquecida durante o resfriamento, o que evidencia as trocas de calor entre o concreto sobre o defeito e o adjacente a ele.

A variação das temperaturas da superfície foram monitoradas durante os 20 minutos posteriores ao aquecimento. A Figura 6.10 ilustra, para os Pontos 0, 1, 2 e 3, os resultados obtidos.

Figura 6.10. Análise temporal sem vento (profundidade = 2 cm).

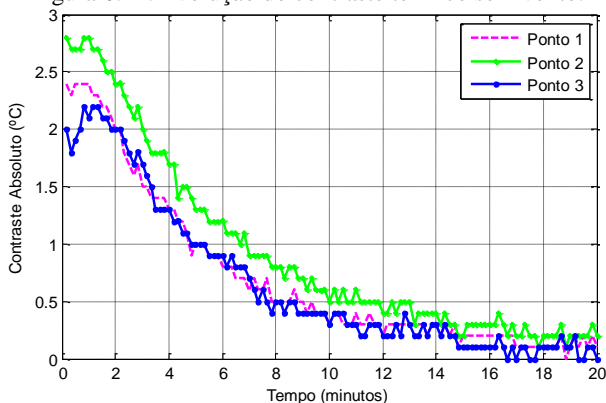


Para o instante inicial de resfriamento, o aumento registrado da temperatura no Ponto 0 (com defeito) foi de  $21,2^{\circ} C$ .

Nos pontos sem defeito (Ponto 1, Ponto 2, Ponto 3), os respectivos aumentos de temperatura, no instante inicial, foram:  $18,8^{\circ} C$ ;  $18,4^{\circ} C$ ; e  $19,2^{\circ} C$ .

Considerando-se o contraste térmico absoluto entre o ponto com defeito (Ponto 0), e os demais pontos sem defeito (Pontos 1, 2 e 3), têm-se três diferentes curvas que mostram o seu comportamento ao longo do tempo. A Figura 6.11 ilustra tais curvas.

Figura 6.11. Evolução do contraste térmico sem vento.



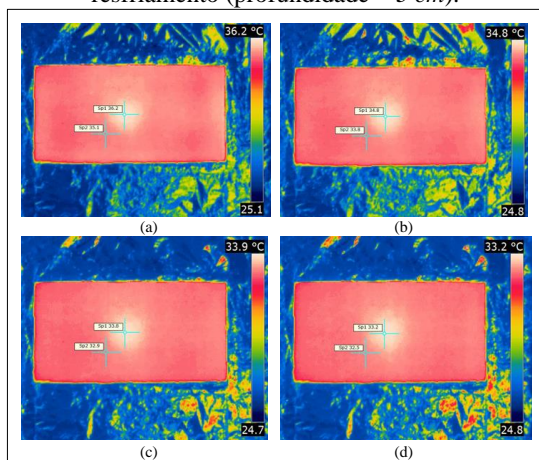
Observa-se que o Ponto 2, localizado próximo à borda da superfície, possui um contraste térmico maior. Já as curvas dos Pontos 1

e 3 têm comportamento semelhante, apresentando uma magnitude de contraste térmico menor.

Verifica-se também que, durante os primeiros 2 minutos, o contraste térmico de todos os pontos tende a manter-se constante. Após este período, dentre os instantes 2 e 8 minutos, ele apresenta um decréscimo significativo nos seus valores. Verifica-se que, após 2 minutos de resfriamento, obtém-se contrastes de  $2^{\circ}\text{C}$ ;  $2,4^{\circ}\text{C}$ ; e  $2^{\circ}\text{C}$  nos Pontos 1, 2 e 3 respectivamente. Após 8 minutos, o contraste térmico diminui para  $0,5^{\circ}\text{C}$ ;  $0,8^{\circ}\text{C}$ ; e  $0,5^{\circ}\text{C}$  nos Pontos 1, 2 e 3, de forma respectiva.

O monitoramento das temperaturas da superfície foi também realizado para a amostra com defeito a 3 cm de profundidade. A Figura 6.12 apresenta os termogramas obtidos após 2, 3, 4 e 5 minutos de resfriamento para esta amostra.

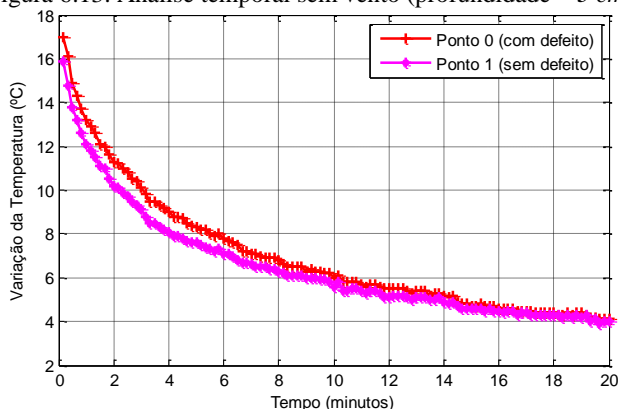
Figura 6.12. Termogramas após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) minutos de resfriamento (profundidade = 3 cm).



Nota-se que o defeito é visualizado em ambos os tempos, embora com pouca nitidez. Após 5 minutos de resfriamento, a visualização do defeito é menos nítida quando comparada aos 2 minutos.

A Figura 6.13 apresenta a evolução das temperaturas nos Pontos 0 e 1, para a amostra com defeito a 3 cm de profundidade.

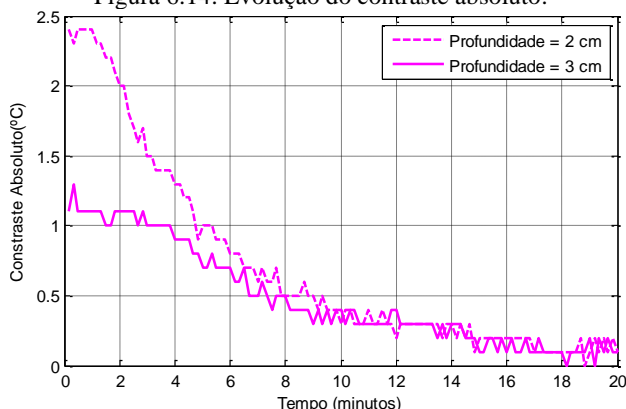
Figura 6.13. Análise temporal sem vento (profundidade = 3 cm).



Os aumentos de temperatura nos Pontos 0 e 1, no instante inicial de resfriamento, foram respectivamente:  $17^{\circ}C$  e  $15,9^{\circ}C$ .

A Figura 6.14 apresenta o comportamento do contraste absoluto do Ponto 1, para as amostras com defeito em profundidades de 2 e 3 cm.

Figura 6.14. Evolução do contraste absoluto.



O contraste obtido após 2 minutos de resfriamento tem a magnitude de  $1,1^{\circ}C$ . Este valor é  $0,9^{\circ}C$  inferior ao obtido na amostra com defeito a 2 cm de profundidade. Para a amostra com defeito a 3 cm de profundidade, nota-se ainda que o contraste absoluto tende a manter-se constante durante os primeiros 4 minutos de resfriamento, e sofre um decréscimo significativo nos 4 minutos posteriores.

De acordo com os resultados apresentados, verifica-se que, para o mesmo tempo de aquecimento, o contraste térmico obtido para a profundidade de 3 cm foi inferior ao obtido na profundidade de 2 cm. Além disso, constata-se que o contraste obtido para a profundidade de 2 cm tende a manter o seu máximo valor até aproximadamente 2 minutos de resfriamento. No entanto, para o defeito a 3 cm de profundidade, este valor se mantém constante por um tempo maior. Tais resultados estão em concordância com os obtidos por Maierhofer *et al.* (2002). Este trabalho aponta que o intervalo de tempo onde o máximo contraste se mantém constante é influenciado pela profundidade do defeito. Por fim, constata-se que, até os 5 minutos de resfriamento, o defeito é visualizado em todas as situações, embora com menor nitidez para o defeito mais profundo.

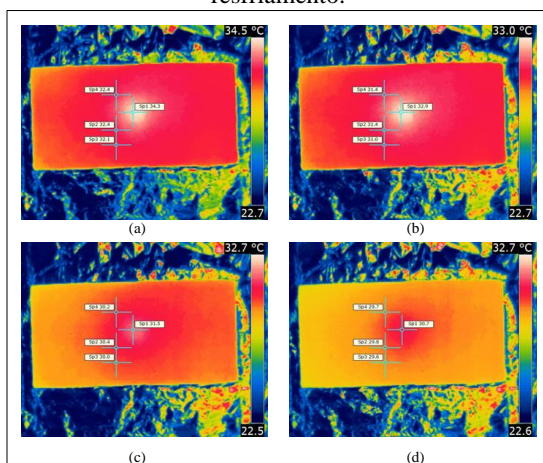
Na sequência, são expostos os resultados obtidos no ensaio realizado com vento de 1 m/s.

#### 6.1.3.2 Com vento de 1 m/s

O ensaio com vento de 1 m/s foi realizado na amostra que possui defeito a 2 cm de profundidade.

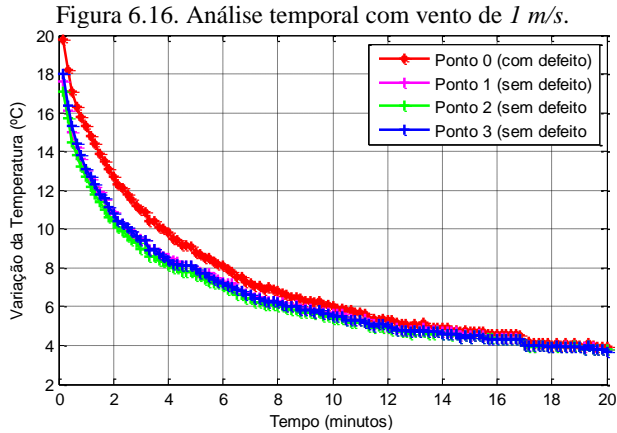
A Figura 6.15 apresenta a análise qualitativa, efetuada para os termogramas obtidos nos períodos de tempo de: 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) minutos de resfriamento.

Figura 6.15. Termogramas obtidos após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) minutos de resfriamento.



Nota-se que o defeito perde sua nitidez, à medida em que se avança o tempo de resfriamento. No entanto, embora de forma pouco nítida, ele pode ainda ser visualizado após os 5 minutos de resfriamento.

A Figura 6.16 apresenta a análise temporal das temperaturas para os Pontos 0, 1, 2 e 3.



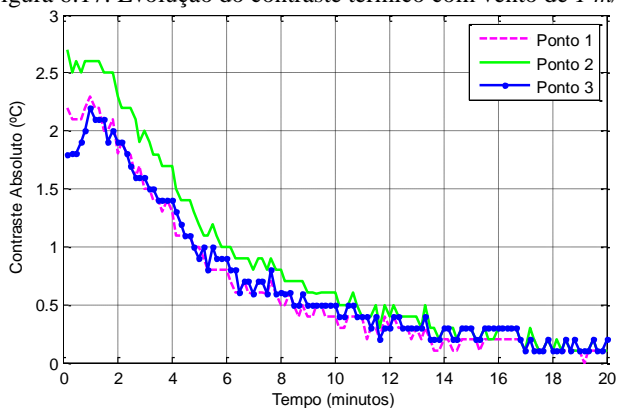
O aumento de temperatura registrado no Ponto 0 foi de  $19,8^{\circ} C$  para o instante inicial de resfriamento. Este aumento foi  $1,4^{\circ} C$  menor do que o registrado no ensaio realizado sem a ação do vento.

Nos pontos sem defeito (Pontos 1, 2 e 3), os aumentos de temperatura, no instante inicial, foram respectivamente:  $17,6^{\circ} C$ ;  $17,1^{\circ} C$ ; e  $18^{\circ} C$ .

Para os Pontos 1 e 3, tais aumentos apresentaram uma intensidade de  $1,2^{\circ} C$  inferior à verificada no ensaio realizado sem a ação do vento. Já no Ponto 2, o aumento de temperatura constatado teve uma intensidade de  $1,3^{\circ} C$  inferior.

Na Figura 6.17, apresentam-se as três curvas de contraste absoluto para cada ponto.

Figura 6.17. Evolução do contraste térmico com vento de 1 m/s.



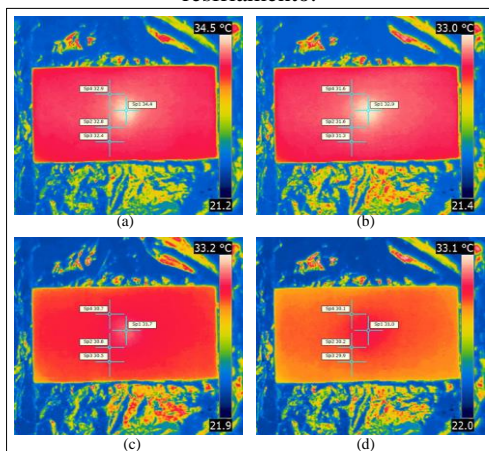
Observa-se que o contraste térmico diminui gradativamente no intervalo de 2 a 6 minutos. Após 2 minutos de resfriamento, os contrastes são  $1,8^{\circ}\text{C}$ ;  $2,3^{\circ}\text{C}$ ; e  $1,9^{\circ}\text{C}$  nos Pontos 1, 2 e 3 respectivamente. Após 6 minutos, o contraste térmico destes pontos diminui para  $0,8^{\circ}\text{C}$ ;  $1^{\circ}\text{C}$ ; e  $0,9^{\circ}\text{C}$ .

A seguir, são expostos os resultados obtidos no ensaio realizado com vento de 2 m/s.

### 6.1.3.3 Com Vento de 2 m/s

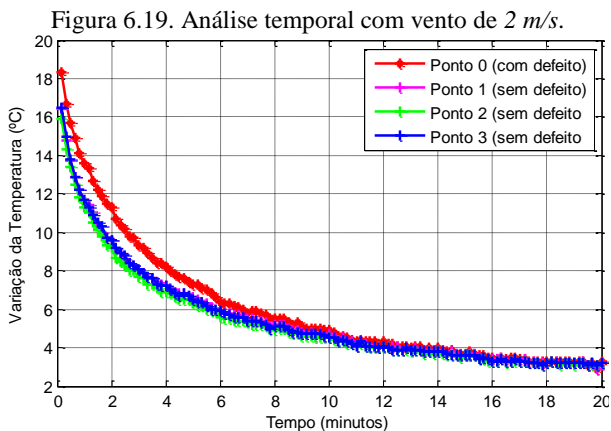
Na Figura 6.18, apresentam-se os termogramas obtidos nos tempos: 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) minutos de resfriamento, para a amostra com defeito a 2 cm de profundidade.

Figura 6.18. Termogramas obtidos após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) minutos de resfriamento.



Após 2 minutos de resfriamento, verificou-se que o defeito pode ainda ser visualizado. Esta visualização fica menos nítida gradativamente até que, decorridos 5 minutos de resfriamento, a uniformidade das temperaturas da superfície impossibilita a visualização do defeito.

Na Figura 6.19, ilustra-se a análise temporal da variação das temperaturas da superfície para este ensaio.



O aumento da temperatura no Ponto 0 foi de  $18,3^{\circ} C$  para o instante inicial de resfriamento. Este aumento foi de  $2,9^{\circ} C$  e  $1,5^{\circ} C$ ,



menor do que o registrado, respectivamente, no ensaio realizado sem a ação do vento e com vento de  $1\text{ m/s}$ .

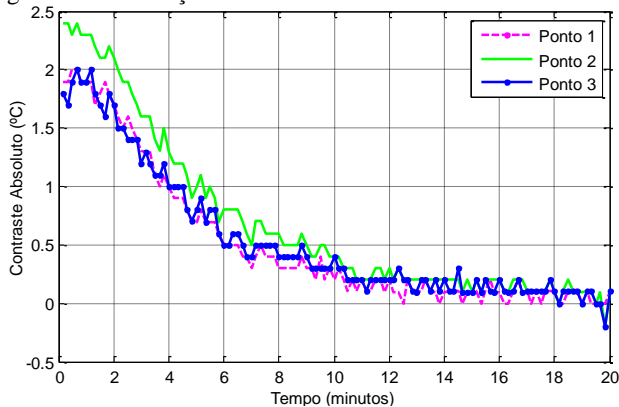
Nos pontos sem defeito (Pontos 1, 2 e 3), os aumentos de temperatura, no instante inicial, foram respectivamente de:  $16,4^\circ\text{ C}$ ;  $15,9^\circ\text{ C}$ ; e  $16,5^\circ\text{ C}$ .

Comparando-se aos aumentos registrados sem a ação do vento, no Ponto 1, verificou-se uma diferença de  $2,4^\circ\text{ C}$ , no Ponto 2, a diferença constatada foi de  $2,5^\circ\text{ C}$  e no Ponto 3 uma diferença de  $2,7^\circ\text{ C}$ .

Relacionando-se com os aumentos registrados com vento de  $1\text{ m/s}$ , os Pontos 1 e 2 apresentaram um aumento  $1,2^\circ\text{ C}$  inferior. No Ponto 3, constatou-se um aumento  $1,5^\circ\text{ C}$  inferior.

As três curvas que representam o contraste térmico absoluto, obtido para cada ponto, são mostradas nas Figuras 6.20.

Figura 6.20. Evolução do contraste absoluto com vento de  $2\text{ m/s}$ .



Uma diminuição significativa do contraste térmico é verificada entre 2 e 6 minutos.

Após 2 minutos de resfriamento, obtêm-se contrastes de  $1,7^\circ\text{ C}$ ;  $2,1^\circ\text{ C}$ ; e  $1,7^\circ\text{ C}$  nos Pontos 1, 2 e 3 respectivamente.

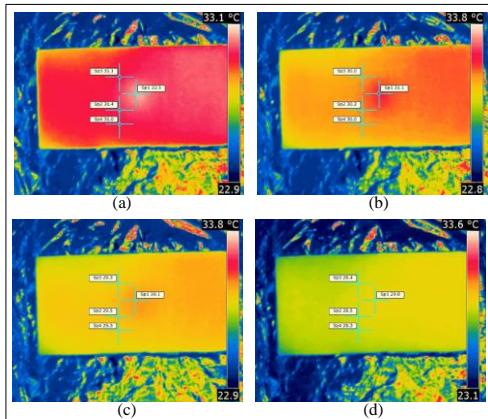
Após 6 minutos, o contraste térmico diminui para  $0,5^\circ\text{ C}$ ;  $0,8^\circ\text{ C}$ ; e  $0,5^\circ\text{ C}$  nos Pontos 1, 2 e 3, de forma respectiva.

A seguir, são expostos os resultados obtidos nos ensaios realizados com vento de  $5\text{ m/s}$ , para as amostras com defeito a 2 e 3 cm de profundidade.

### 6.1.3.4 Com Vento de 5 m/s

Na Figura 6.21, apresentam-se os termogramas obtidos para os tempos de 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) minutos de resfriamento, na amostra com defeito a 2 cm de profundidade.

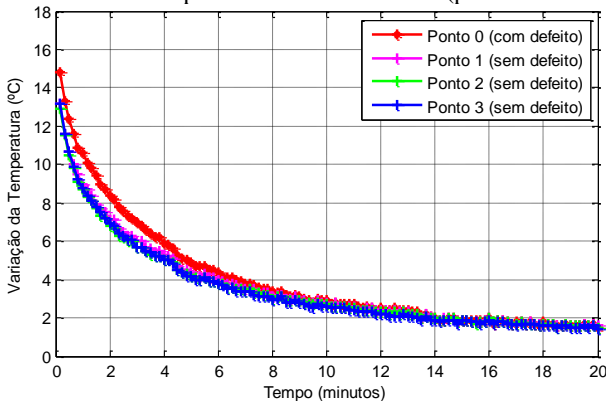
Figura 6.21. Termogramas obtidos após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) minutos de resfriamento.



Após 2 minutos de resfriamento, o defeito pode ainda ser visualizado, porém de forma pouco nítida. Após 4 minutos de resfriamento (Figura 6.21 (c)), o defeito não é mais visível.

A Figura 6.22 expõe a análise temporal da variação das temperaturas da superfície.

Figura 6.22. Análise temporal com vento de 5 m/s (profundidade = 2 cm).



O aumento da temperatura registrado no Ponto 0 foi de  $14,8^{\circ} C$ , para o instante inicial de resfriamento. Este aumento foi  $6,4^{\circ} C$ ;  $5^{\circ} C$  e  $3,5^{\circ} C$  menor do que o registrado no ensaio realizado sem a ação do vento, e com ventos de  $1$  e  $2 m/s$ , de forma respectiva.

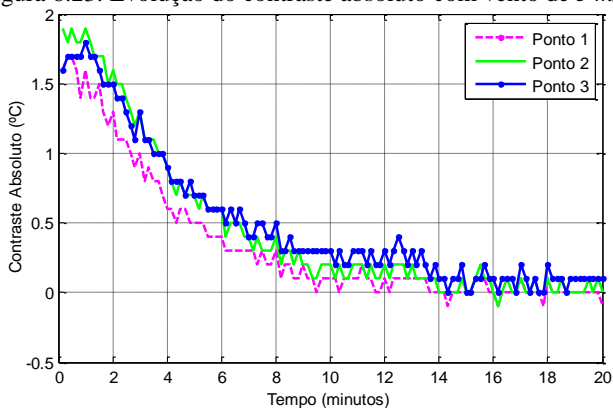
Nos Pontos 1 e 3, o aumento de temperatura, no instante inicial, foi de  $13,2^{\circ} C$ , enquanto que no Ponto 2 o aumento registrado foi de  $12,9^{\circ} C$ .

Comparando-se estes aumentos aos registrados sem a ação do vento, e com velocidades de  $1$  e  $2 m/s$ , no Ponto 1, verificou-se uma intensidade  $5,6^{\circ} C$ ;  $4,4^{\circ} C$ ;  $3,2^{\circ} C$  menor.

Já no Ponto 2, observou-se uma diferença de  $5,5^{\circ} C$ ;  $4,2^{\circ} C$ ; e  $3^{\circ} C$ . No Ponto 3, o aumento constatado foi, de forma respectiva,  $6^{\circ} C$ ;  $4,8^{\circ} C$ ; e  $3,3^{\circ} C$  inferior.

O contraste absoluto obtido é apresentado na Figura 6.23.

Figura 6.23. Evolução do contraste absoluto com vento de  $5 m/s$ .



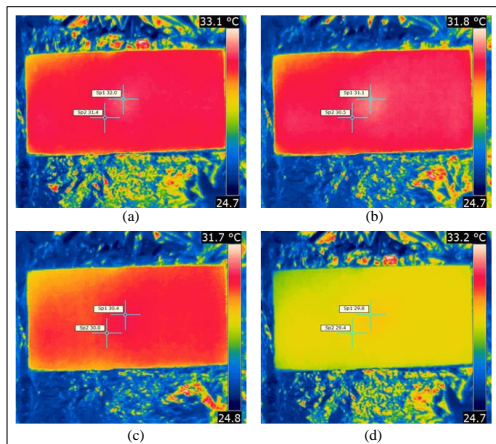
Uma diminuição significativa do contraste térmico ocorre no intervalo de  $2$  a  $4$  minutos.

Após  $2$  minutos de resfriamento, obtêm-se contrastes de  $1,3^{\circ} C$ ;  $1,6^{\circ} C$ ; e  $1,5^{\circ} C$  nos Pontos 1, 2 e 3 respectivamente.

Após  $4$  minutos, o contraste térmico diminui para  $0,6^{\circ} C$  no Ponto 1; e  $0,9^{\circ} C$  para os Pontos 2 e 3.

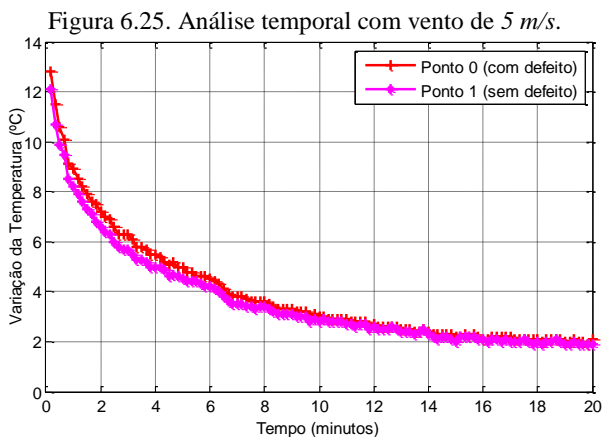
Os ensaios com vento de  $5 m/s$  foram também realizados na amostra que contém o defeito a  $3 cm$  de profundidade. A Figura 6.24 apresenta os termogramas obtidos após  $2$  (a),  $3$  (b),  $4$  (c) e  $5$  (d) minutos de resfriamento.

Figura 6.24. Termogramas obtidos após 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d) minutos de resfriamento.



Após 2 minutos de resfriamento, a diferença de temperatura entre a região com defeito e a região sem defeito é pequena, tornando a visualização do defeito pouco nítida. Observa-se ainda que, após 4 minutos (Figura 6.24 (c)), não é mais possível visualizar o defeito.

A Figura 6.25 apresenta a análise temporal da variação das temperaturas nesta amostra para os Pontos 0 e 1.



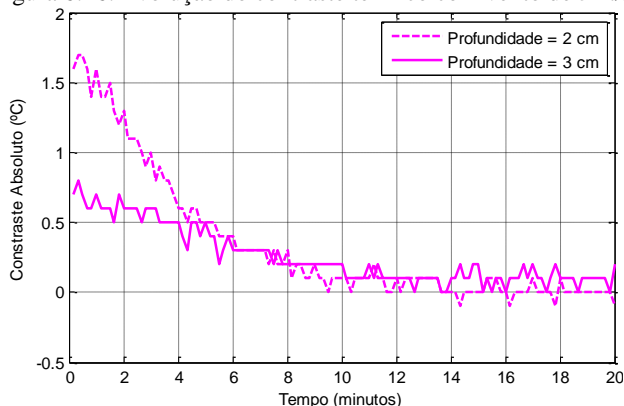
Nota-se um aumento da temperatura no Ponto 0 de 12,8° C para o instante inicial de resfriamento. Este aumento foi 2° C menor do que o

registrado no ensaio da amostra com defeito a 2 cm de profundidade, submetida às mesmas condições.

No Ponto 1, o aumento de temperatura, no instante inicial, foi de  $12,1^{\circ} C$ . Comparando-se ao aumento registrado na amostra com defeito a 2 cm de profundidade, obtêm-se uma magnitude  $1,1^{\circ} C$  inferior.

A Figura 6.26 expõe as curvas de contraste absoluto para os experimentos efetuados nas amostras com defeito a 2 e 3 cm de profundidade, com vento de 5 m/s.

Figura 6.26. Evolução do contraste térmico com vento de 5 m/s.



O contraste obtido, para a amostra com defeito a 3 cm de profundidade, após 2 minutos de resfriamento, tem a magnitude de  $0,6^{\circ} C$ . Este valor é  $0,7^{\circ} C$  inferior ao obtido na amostra com defeito a 2 cm.

Conforme os resultados apresentados, observa-se que, para a profundidade de 2 cm, a visualização do defeito é possível até os 3 minutos iniciais de resfriamento, quando obtêm-se contrastes superiores a  $1^{\circ} C$ . No entanto, para a profundidade de 3 cm, contrastes inferiores a  $1^{\circ} C$  são obtidos em todos os instantes de tempo, o que impossibilita a visualização nítida do defeito. Quanto ao tempo em que se mantém o máximo contraste térmico, verificou-se comportamento análogo ao registrado no ensaio sem a ação do vento. Como se pode verificar, o máximo contraste se mantém constante por um tempo maior, para a amostra com defeito na profundidade de 3 cm.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos na análise de incertezas dos ensaios realizados sem vento, e com vento de 5 m/s.

### 6.1.4. Incertezas das Medições

Com o objetivo de analisar-se as incertezas das medições, os ensaios realizados sem a ação do vento e com vento de  $5\text{ m/s}$  foram repetidos cinco vezes. Estes ensaios foram executados na amostra com defeito a  $2\text{ cm}$  de profundidade.

Considerando-se as temperaturas obtidas nos Pontos 0 e 1, com defeito e sem defeito respectivamente, foram obtidas as curvas do contraste térmico absoluto para cada repetição. As Figuras 6.27 e 6.28 representam tais curvas, obtidas para as repetições realizadas sem ação do vento, e com vento de  $5\text{ m/s}$ .

Figura 6.27. Repetições sem ação do vento.

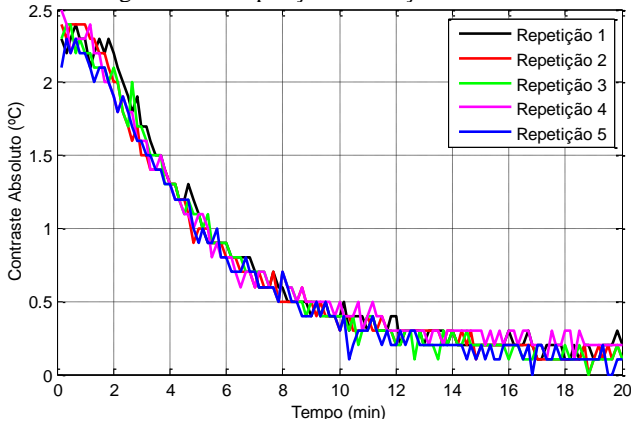
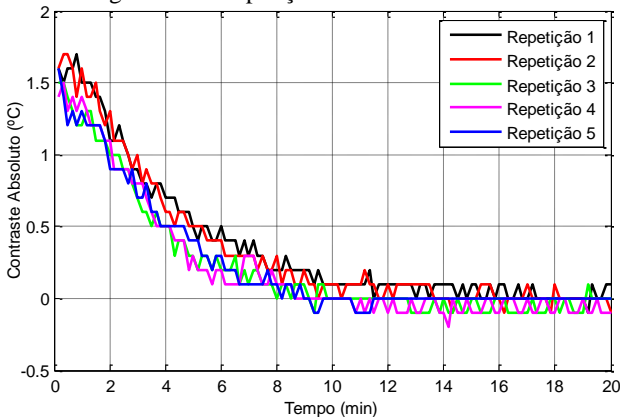


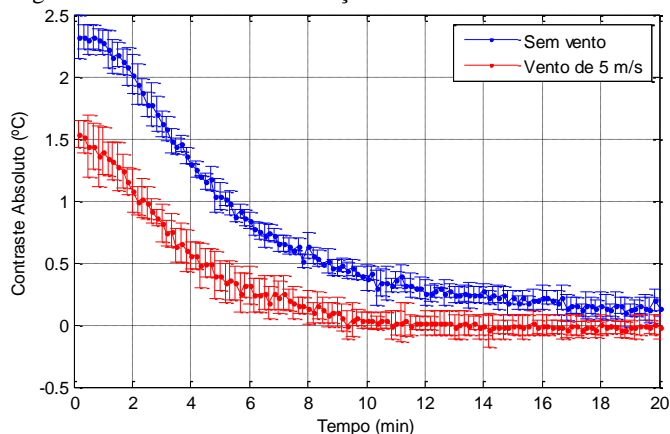
Figura 6.28. Repetições com vento de  $5\text{ m/s}$ .



Constata-se que as repetições realizadas sem a ação do vento apresentaram um valor similar. No entanto, as repetições do ensaio realizado com vento de  $5\text{ m/s}$  apresentaram valores mais dispersos.

Considerando-se a análise da incerteza expandida da medição, obtida por meio do procedimento descrito no Capítulo 4, obtiveram-se as curvas médias do contraste absoluto, e o intervalo de erro correspondente a cada medição. A Figura 6.29 apresenta estes resultados para os ensaios realizados sem vento e com vento de  $5\text{ m/s}$ .

Figura 6.29. Resultado das medições considerando as incertezas.



Uma menor magnitude nas incertezas é verificada para o ensaio realizado sem a ação do vento. Nota-se ainda que, para o contraste sem a ação do vento, as incertezas são maiores nos instantes iniciais.

Por fim, a partir da análise de incertezas, conclui-se que os resultados das repetições realizadas com vento de  $5\text{ m/s}$  são mais dispersos do que os registrados sem vento. Este aumento na incerteza ocorre devido ao acréscimo de uma nova variável (vento) ao experimento. Embora as repetições sejam realizadas com a mesma velocidade, existem turbulências originadas durante o escoamento do fluido, que ocasionam uma maior dispersão nos resultados.

No próximo item, serão analisados os contrastes térmicos absolutos obtidos para cada experimento, considerando-se as diferentes profundidades e velocidades de vento, juntamente com as incertezas associadas.

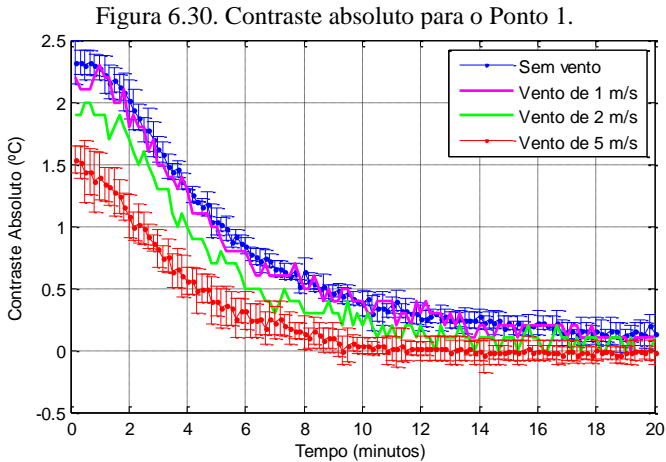
### 6.1.5. Análise do Contraste Térmico

Neste item, analisam-se os contrastes térmicos obtidos para todas as velocidades de vento. Inicialmente são apresentados os contrastes térmicos padrão e normalizado, obtidos para o Ponto 1. Após, apresentam-se os contrastes obtidos para os Pontos 2 e 3.

#### 6.1.5.1 Contrastes para o Ponto 1

A análise da influência do vento, nos resultados obtidos, é realizada comparando-se os contrastes absolutos de cada caso.

Para o defeito na profundidade de 2 cm, os ensaios foram realizados sem a ação do vento, e com vento de 1, 2 e 5 m/s. A Figura 6.30 apresenta o contraste absoluto obtido para cada situação, juntamente com as incertezas das repetições.

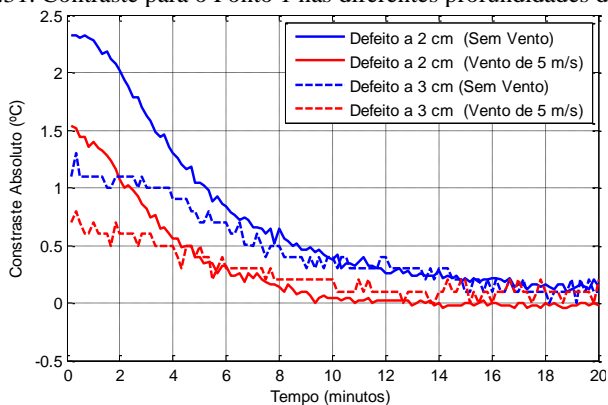


O contraste obtido no ensaio realizado com vento de 1 m/s se encontra dentro do intervalo de incertezas do ensaio realizado sem a ação do vento. Para o ensaio realizado com vento de 2 m/s, o contraste possui um valor inferior, não estando entre nenhum dos intervalos de incertezas. Por fim, o ensaio com vento de 5 m/s possui um contraste absoluto com valores distantes dos demais. A diferença média entre o contraste do ensaio realizado sem vento, e com vento de 5 m/s, observada nos 2 minutos iniciais de resfriamento, é de 0,87 °C.



Como já descrito, os ensaios realizados sem a ação do vento, e com vento de  $5\text{ m/s}$ , foram efetuados em amostras com defeitos a  $2\text{ cm}$  e  $3\text{ cm}$  de profundidade. A Figura 6.31 apresenta o contraste absoluto do Ponto 1, obtido para cada profundidade, considerando-se o ensaio realizado sem a ação do vento, e com vento de  $5\text{ m/s}$ .

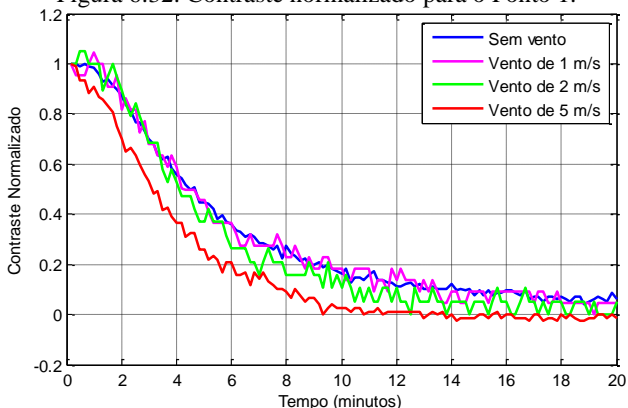
Figura 6.31. Contraste para o Ponto 1 nas diferentes profundidades de defeito.



A diferença média dos contrastes sem vento e com vento, obtido nos  $2\text{ minutos}$  iniciais de resfriamento, é de  $0,46^\circ\text{C}$  para a profundidade de  $3\text{ cm}$ . Este valor é  $0,41^\circ\text{C}$  inferior ao obtido na profundidade de  $2\text{ cm}$ . Isto indica que a influência do vento diminui com o avanço da profundidade do defeito.

A Figura 6.32 apresenta o contraste normalizado para o Ponto 1.

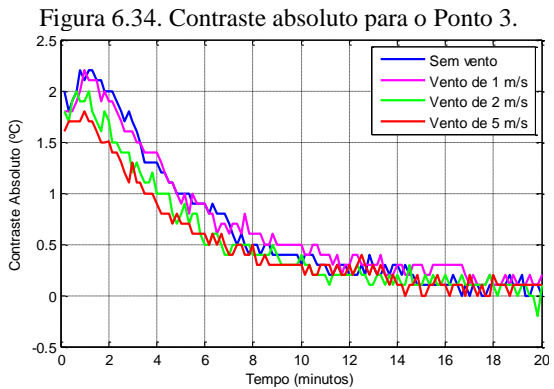
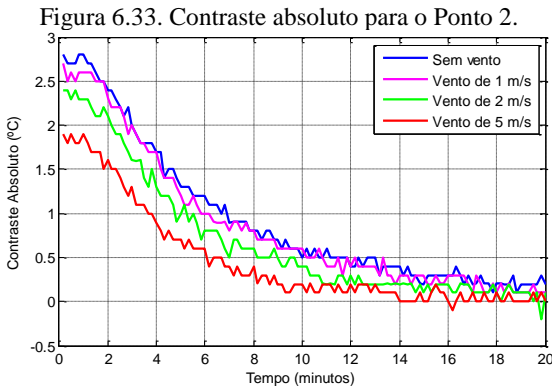
Figura 6.32. Contraste normalizado para o Ponto 1.



O contraste absoluto normalizado mostra ainda uma maior decréscimo no contraste térmico quando aumentada a velocidade do vento e mantido o mesmo tempo de aquecimento.

### 6.1.5.2 Contrastes para os Pontos 2 e 3

As Figuras 6.33 e 6.34 apresentam o contraste absoluto obtido para os Pontos 2 e 3 respectivamente, na amostra com defeito a 2 cm de profundidade.



O comportamento das curvas de contraste absoluto, para os Pontos 2 e 3, manteve-se análogo ao obtido no Ponto 1.

Ao final da apresentação dos resultados provenientes do procedimento experimental proposto nesta dissertação, constata-se que o vento exerce influência nos contrastes térmicos obtidos. Sendo que, para

velocidades de até  $1 \text{ m/s}$ , esta influência não foi tão significativa. No entanto, com o aumento da velocidade do vento, percebe-se uma elevada queda nos contrastes obtidos.

Para o ensaio realizado na amostra com defeito a  $2 \text{ cm}$  de profundidade, com velocidade de  $5 \text{ m/s}$ , a média do contraste obtido nos primeiros  $2 \text{ minutos}$  de resfriamento teve um valor  $40\%$  inferior ao obtido no ensaio sem a ação do vento. Estes resultados estão em concordância com os obtidos por Lehmann (2013), Balaras e Argiriou (2002), e com a ASTM D4788. Pois tais documentos citam que o ensaio não deve ser realizado com velocidades acima de  $4,5 - 5 \text{ m/s}$ . Além de Washer *et al.* (2009), o qual cita que maiores contrastes térmicos são obtidos com baixas velocidades de vento e altos carregamento solares.

## 6.2. RESULTADOS TEÓRICOS

A seguir, estão dispostos os resultados obtidos por meio da simulação matemática realizada nesta pesquisa. Nesta seção, inicialmente são expostos os valores adotados do coeficiente de convecção, natural e forçada. Na sequência, apresenta-se a análise temporal das temperaturas da superfície na região com e sem defeito. Nesta etapa, consideram-se as diferentes profundidades de defeito ( $2$  e  $3 \text{ cm}$ ), e as diferentes velocidades de vento. Por fim, apresenta-se a análise do contraste térmico absoluto obtido para cada caso.

### 6.2.1. Coeficiente de convecção

Como apresentado nos capítulos anteriores, fisicamente o vento exerce influência na temperatura de uma superfície, pelo fenômeno da convecção. Com o intuito de quantificar as influências do vento no ensaio, foram determinados os valores do coeficiente de convecção para cada velocidade, considerando-se a geometria do elemento estudado. Os valores obtidos para o defeito localizado a  $2 \text{ cm}$  de profundidade estão dispostos a seguir.

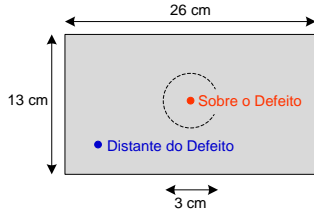
#### 6.2.1.1 Coeficiente de convecção natural

O coeficiente de convecção natural varia de acordo com a diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente. Durante a etapa de análise desta pesquisa, a temperatura da superfície esteve em

constante variação (período de aquecimento e resfriamento). Logo, não há um valor fixo para o coeficiente de convecção natural.

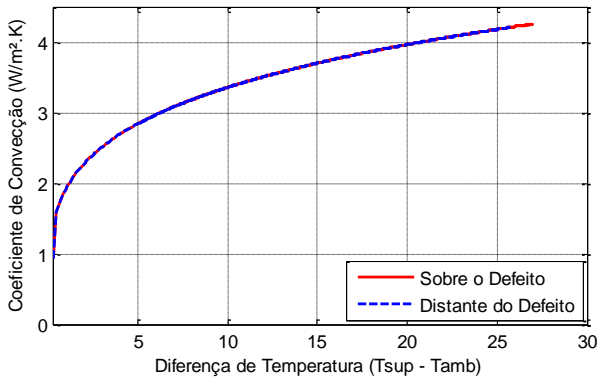
A análise do coeficiente é realizada em dois pontos, um sobre o defeito, e outro distante dele. A Figura 6.35 ilustra suas localizações.

Figura 6.35. Localização dos pontos sobre e distante do defeito.



A Figura 6.36 apresenta a variação do coeficiente de convecção para os pontos sobre o defeito, e distante dele, de acordo com a diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente.

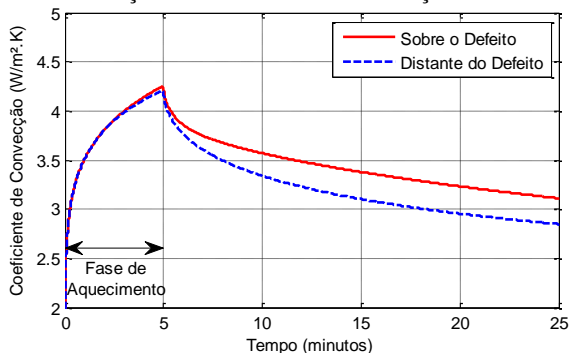
Figura 6.36. Evolução do coeficiente de convecção natural.



Observa-se que o coeficiente de convecção não se altera para os pontos. Isto ocorre pelo fato de que as propriedades do fluido e a dimensão do elemento paralela à sua passagem serem iguais para tais pontos. No entanto, o ponto sobre o defeito alcança uma temperatura superior a do ponto distante dele. Em virtude disso, tem-se um valor de coeficiente máximo maior.

É possível ainda se analisar a variação do coeficiente de convecção natural em função do tempo. A Figura 6.37 apresenta esta variação.

Figura 6.37. Evolução do coeficiente de convecção natural no tempo.

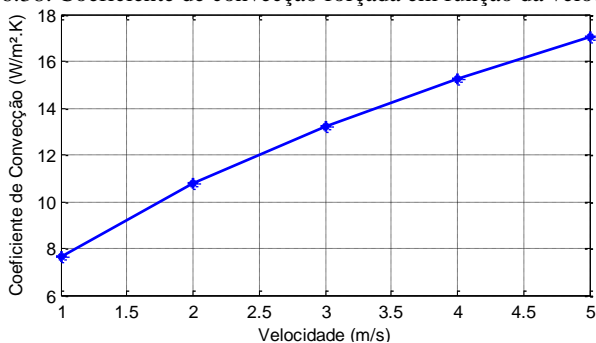


Nos instantes iniciais, o coeficiente de convecção tem o mesmo comportamento para ambos os casos. Isto ocorre devido à profundidade do poliestireno. Observa-se também que a magnitude máxima do coeficiente de convecção ocorre no instante de *5 minutos*, em ambos os pontos, e diminui gradativamente após este instante.

#### 6.2.1.2 Coeficiente de convecção forçada

O vento, como anteriormente citado, está presente no balanço de energia, devido à sua influência no coeficiente de convecção forçada. A Figura 6.38 apresenta a magnitude do coeficiente de convecção forçada, em função da velocidade de escoamento do fluido.

Figura 6.38. Coeficiente de convecção forçada em função da velocidade.



O valor do coeficiente aumenta em decorrência do incremento da velocidade de escoamento do fluido. Logo, quanto maior a velocidade, mais elevada será a sua influência nas trocas de calor por convecção.

A seguir, expõem-se as temperaturas obtidas para a superfície, nos pontos sobre o defeito, e afastado dele, em função do tempo. Apresenta-se também o contraste térmico absoluto obtido para cada velocidade de vento.

### 6.2.2. Análise Temporal das Temperaturas da Superfície

A análise temporal das temperaturas da superfície, para a profundidade de 2 cm, foi desenvolvida em duas etapas. Uma considera apenas a atuação da convecção natural (sem vento), e outra considera a atuação da convecção forçada (com vento de 1, 2 e 5 m/s).

Já para a profundidade de 3 cm, a modelagem foi desenvolvida para a primeira etapa (sem vento), e para a segunda etapa apenas com a velocidade de 5 m/s.

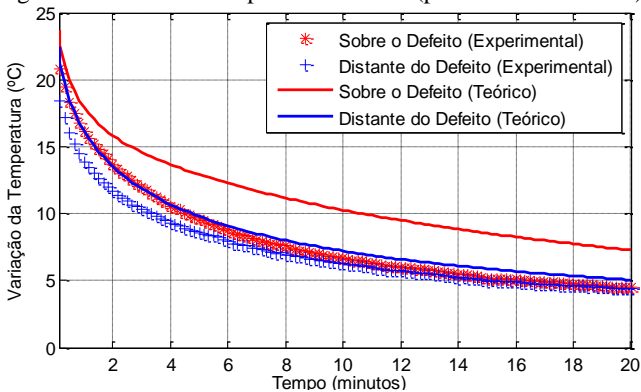
Na sequência, apresentam-se os resultados obtidos sem a ação do vento, para a amostra com defeito a 2 e 3 cm de profundidade.

#### 6.2.2.1 Sem Vento

Os resultados obtidos por meio da simulação (teóricos) são apresentados juntamente com os resultados experimentais, obtidos para a mesma condição. Para representar os valores experimentais, adotaram-se os valores médios obtidos a partir das repetições.

A Figura 6.39 expõe as curvas de variação da temperatura ao longo do tempo (teórica e experimental), para a amostra com defeito a 2 cm de profundidade.

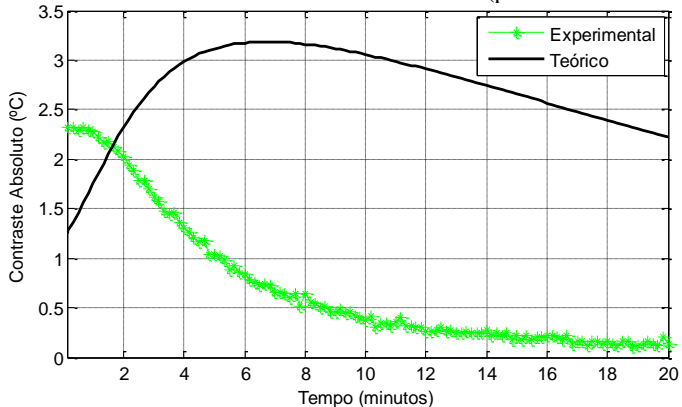
Figura 6.39. Análise temporal sem vento (profundidade = 2 cm).



Para o ponto sobre o defeito, no momento inicial de resfriamento, registrou-se uma variação de temperatura de  $22,5^{\circ} C$ . Na região distante do defeito, obteve-se uma variação de  $21,3^{\circ} C$ .

A Figura 6.40 apresenta o contraste absoluto, teórico e experimental obtidos, durante a fase de resfriamento, na simulação numérica e por meio dos ensaios.

Figura 6.40. Contraste térmico absoluto sem vento (profundidade = 2 cm).

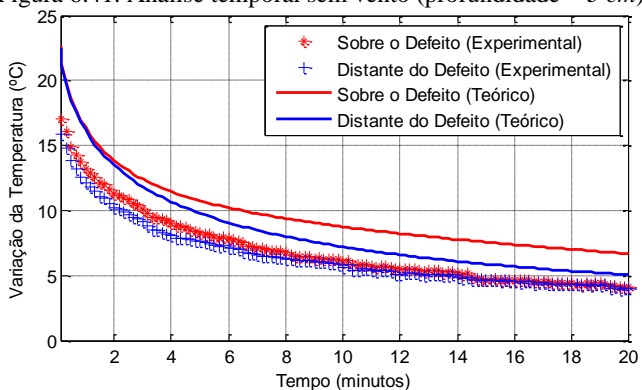


Após os 5 minutos de aquecimento, o contraste absoluto teórico obtido foi de  $1,2^{\circ} C$ . Nota-se ainda que a magnitude do contraste absoluto é máxima no intervalo compreendido entre 6 e 8 minutos, quando obtém-se um valor de  $3,2^{\circ} C$ .

Nesta análise pode-se perceber uma sensível discrepância entre os valores teóricos e experimentais. Na análise experimental, o máximo contraste ocorre logo no início do resfriamento e na análise teórica o máximo contraste ocorre após 6 minutos de resfriamento. Desta forma, nota-se que a concordância entre teórico experimental não é total, mas a tendência de variação é semelhante.

A Figura 6.41 apresenta as variações de temperatura da superfície, teórica e experimental, obtidas para a amostra com defeito a 3 cm de profundidade.

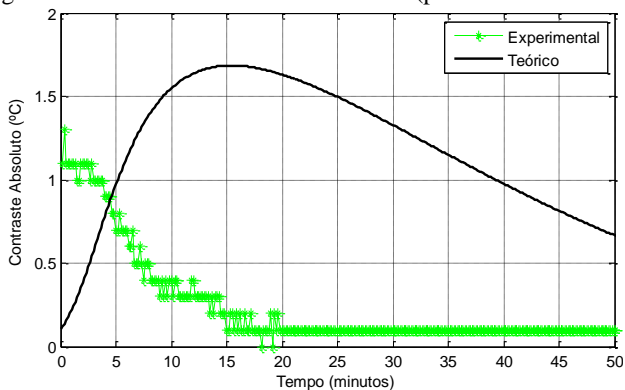
Figura 6.41. Análise temporal sem vento (profundidade = 3 cm).



Constata-se que o aumento de temperatura na região sobre o defeito, e distante dele, no instante inicial, é a mesma para os resultados teóricos. No entanto, durante a etapa de resfriamento, a temperatura da região com defeito diminui de forma mais lenta, originando um contraste térmico neste período.

Como base nos resultados da Figura 6.41, optou-se por plotar o contraste térmico absoluto teórico durante 50 minutos de resfriamento, para obter-se uma melhor visualização do seu comportamento. A Figura 6.42 ilustra o comportamento desta curvas.

Figura 6.42. Contraste absoluto sem vento (profundidade = 3 cm).



Após 5 minutos de aquecimento, o contraste absoluto teórico obtido foi inferior a 0,5°C, e sua magnitude máxima é alcançada aos 15 minutos, quando se alcança o valor de 1,7°C.



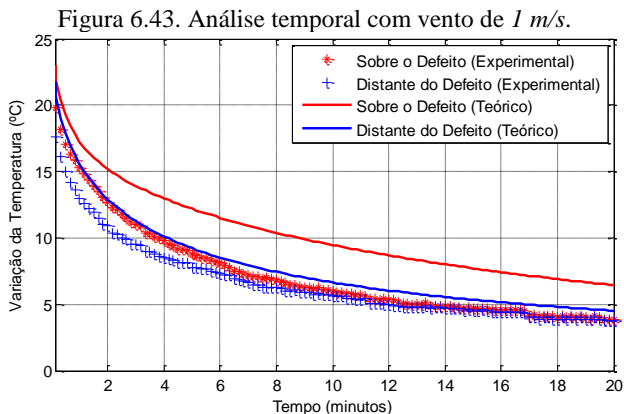
Novamente ocorreu uma sensível discrepância dos valores de contraste teórico e experimental. Uma das possíveis causas é o fato da análise teórica ser unidimensional e, por conta disso, não representar integralmente as condições reais do experimento. Ademais, de acordo com Maierhofer; Arndt e Rolling (2007), a discrepância nos valores de contraste pode ocorrer em virtude das incertezas relacionadas às propriedades térmicas do concreto. Outra fonte de incerteza é relacionada com a migração de umidade que está presente no experimento e não é contemplada na análise teórica.

Verifica-se ainda que, para o defeito na profundidade de 3 cm, o valor do contraste máximo tende a manter-se constante durante um maior período de tempo, o que também é observado nos resultados experimentais.

A seguir, são dispostos os resultados obtidos para a simulação realizada considerando-se a velocidade de 1 m/s.

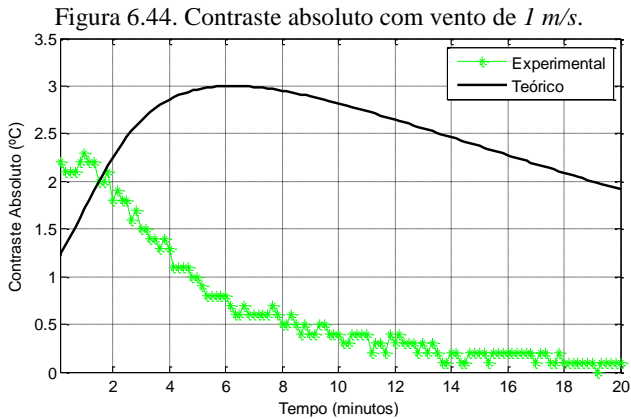
#### 6.2.2.2 Com Vento de 1 m/s

A modelagem que considera a velocidade de 1 m/s foi desenvolvida para a amostra com defeito a 2 cm de profundidade. A Figura 6.43 apresenta a evolução das temperaturas da superfície, teórica e experimental, durante o período de resfriamento.



O aumento teórico de temperatura registrado foi de 21,9° C e 20,6° C para o ponto sobre o defeito, e afastado dele, respectivamente. Este aumento é 0,6° C e 0,7° C inferior ao obtido sem a ação do vento.

A Figura 6.44 apresenta o contraste térmico absoluto teórico e experimental obtido durante a fase de resfriamento.

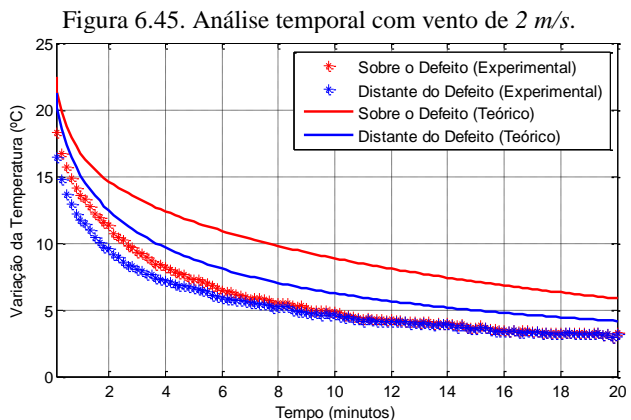


Após 5 minutos de aquecimento, nota-se que o contraste absoluto teórico obtido foi de 1,3° C. Sua magnitude máxima ocorre aos 6 minutos, quando se obtém um valor de 3° C.

Na sequência, apresentam-se os resultados obtidos para a velocidade de 2 m/s, para o defeito a 2 cm de profundidade.

### 6.2.2.3 Com Vento de 2 m/s

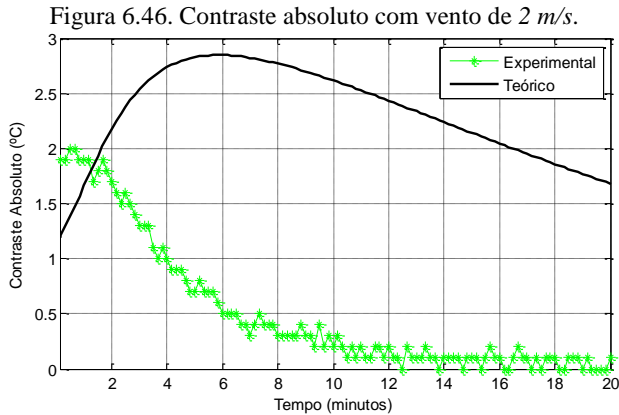
A Figura 6.45 expõe a variação das temperaturas da superfície durante a fase de resfriamento, obtidas experimental e numericamente.



O aumento na temperatura, obtido por meio da simulação, foi de  $21,4^{\circ} C$  e  $20,1^{\circ} C$  para o ponto sobre o defeito, e afastado dele, respectivamente.

Este aumento é  $1,1^{\circ} C$  e  $1,2^{\circ} C$  inferior ao alcançado sem a ação do vento. Comparando-se estes valores aos observados na simulação com vento a  $1 m/s$ , percebe-se que o aumento foi  $0,5^{\circ} C$  inferior, em ambos os pontos.

A Figura 6.46 apresenta as curvas obtidas do contraste térmico absoluto teórico e experimental durante a fase de resfriamento.



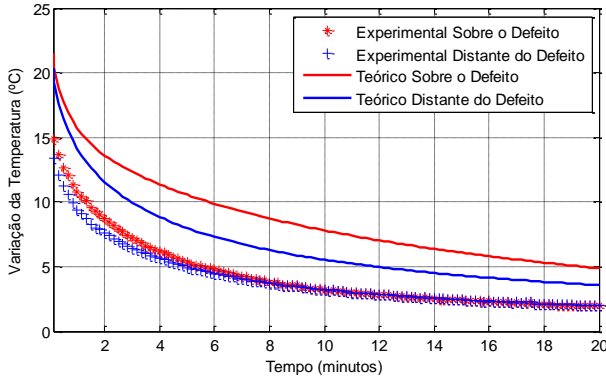
Após  $5 minutos$  de aquecimento, o contraste absoluto teórico obtido foi de  $1,2^{\circ} C$ . Sua magnitude máxima ocorre aos  $6 minutos$ , quando se obtém um valor de  $2,8^{\circ} C$ .

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos com vento de  $5 m/s$ .

#### 6.2.2.4 Com Vento de $5 m/s$

Para a velocidade de  $5 m/s$ , foram realizadas simulações para as amostras com defeito a  $2$  e  $3 cm$  de profundidade. A Figura 6.47 ilustra as curvas da variação temporal das temperaturas da superfície, obtidas para a profundidade de  $2 cm$ .

Figura 6.47. Análise temporal com vento de 5 m/s (profundidade = 2 cm).

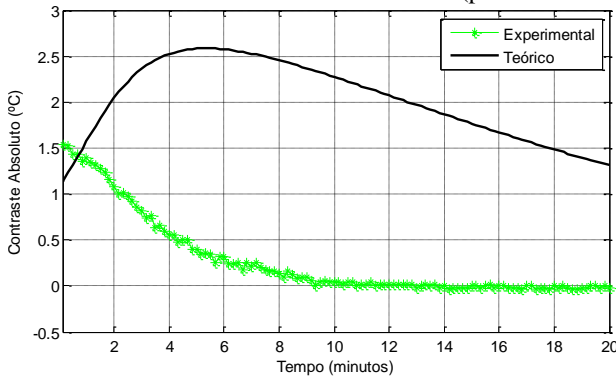


O aumento na temperatura simulada foi de  $20,4^{\circ}C$  e  $19,2^{\circ}C$ , para o ponto sobre o defeito e o ponto afastado dele respectivamente.

Para ambos os pontos, este aumento é  $2,1^{\circ}C$  inferior ao alcançado sem a ação do vento. Comparando-se aos valores observados na simulação com vento de  $1\text{ m/s}$ , o aumento para o ponto sobre, e afastado do efeito, foi respectivamente de  $1,5^{\circ}C$  e  $1,4^{\circ}C$ . Por fim, comparando-se aos resultados da simulação com vento de  $2\text{ m/s}$ , os valores foram  $1^{\circ}C$  e  $1,1^{\circ}C$  inferiores.

A Figura 6.48 apresenta os contrastes térmicos absolutos teórico e experimental obtidos durante a fase de resfriamento.

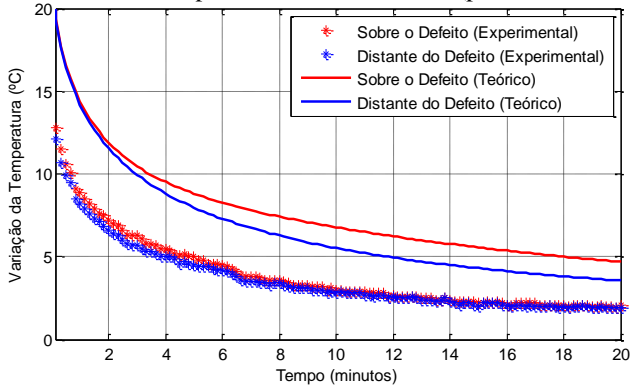
Figura 6.48. Contraste absoluto com vento de 5 m/s (profundidade = 2 cm).



Após 5 minutos de aquecimento, o contraste absoluto teórico obtido foi de  $1,1^{\circ}C$ . Sua magnitude máxima ocorre no intervalo entre 4 e 6 minutos, quando se obtém um valor de  $2,6^{\circ}C$ .

A Figura 6.49 apresenta a variação temporal das temperaturas da superfície, obtidas para a profundidade de 3 cm.

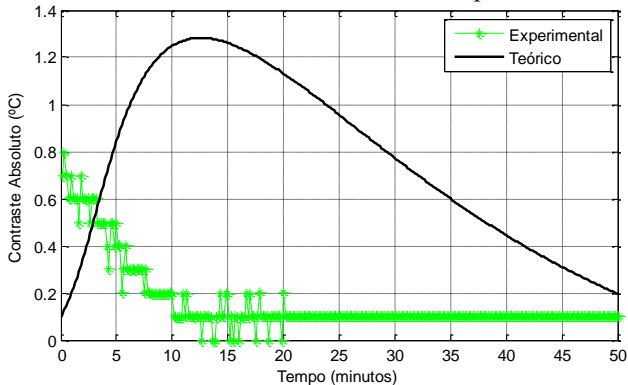
Figura 6.49. Análise temporal com vento de 5 m/s (profundidade = 3 cm).



Assim como na simulação realizada sem a ação do vento, no instante inicial de resfriamento, os pontos sobre e afastado do defeito se encontram na mesma temperatura. Observa-se ainda que o tempo necessário para a região sobre o defeito resfriar-se é maior do que o tempo verificado para a região distante do defeito.

Em virtude do aumento do contraste absoluto teórico, durante os minutos iniciais de resfriamento, optou-se por demonstrar o seu comportamento durante 50 minutos. Para os dados experimentais do intervalo entre 20 e 50 minutos, repetiram-se os valores obtidos entre 19 e 20 minutos. A Figura 6.50 apresenta tais resultados.

Figura 6.50. Contraste absoluto com vento de 5 m/s (profundidade = 3 cm).



Constata-se que, após 5 *minutos* de aquecimento, o contraste absoluto teórico obtido foi inferior a  $0,2^{\circ} C$ . Sua magnitude máxima ocorre entre 5 e 10 *minutos*, quando se obtém um valor de  $1,3^{\circ} C$ .

Com base nos resultados apresentados, acerca da análise temporal das temperaturas, conclui-se que os resultados obtidos na simulação possuem uma tendência similar aos obtidos experimentalmente. No tocante às temperaturas da superfície, a simulação que não emprega a ação do vento (convecção natural) possui um resultado mais próximo do obtido no experimento. No entanto, à medida em que se aplica a velocidade do vento (convecção forçada), as diferenças entre as temperaturas, obtidas experimental e numericamente, tornam-se maior. Isto é claramente observado na simulação realizada com vento de  $5 m/s$ , onde, para a profundidade de  $2 cm$ , constata-se uma diferença de aproximadamente  $5^{\circ} C$  entre o valor experimental e o teórico. Isto indica que o modelo adotado possui restrições. Dentre elas, a principal é o fato da simulação matemática considerar apenas uma dimensão.

De forma geral, o fato da análise ser unidimensional pode ser elencado com umas das principais causas de discrepância entre os resultados. Além disso, conforme apresentado por Maierhofer; Arndt e Rolling (2004) e Cotic *et al.* (2015), o tamanho do defeito tem grande influência no valor do contraste máximo, e no tempo de resfriamento necessário para obtê-lo. Sendo que, quanto menor o tamanho do defeito, menor será o valor do contraste máximo e do tempo necessário para obtê-lo. Como em uma análise unidimensional não é possível a representação do tamanho do defeito, as perdas de calor entre ele e o seu entorno não são quantificadas, o que pode gerar divergências entre os resultados desta análise e os obtidos experimentalmente.

Na sequência, são analisados os contrastes térmicos absolutos (teórico e experimental), obtidos considerando-se diferentes profundidades de defeito e velocidades de vento.

### **6.2.3. Análise do Contraste Térmico**

Anteriormente, apresentaram-se os resultados obtidos por meio da simulação numérica para as profundidades de  $2$  e  $3 cm$ . No entanto, esta simulação foi também realizada para as profundidades de  $1$  e  $4 cm$ , considerando-se convecção natural e vento com velocidade de  $5 m/s$ .

Nesta seção, apresenta-se uma análise dos contrastes térmicos obtidos teórica e experimentalmente. Inicialmente, é apresentado um comparativo entre os contrastes absolutos máximos. Após, apresenta-se

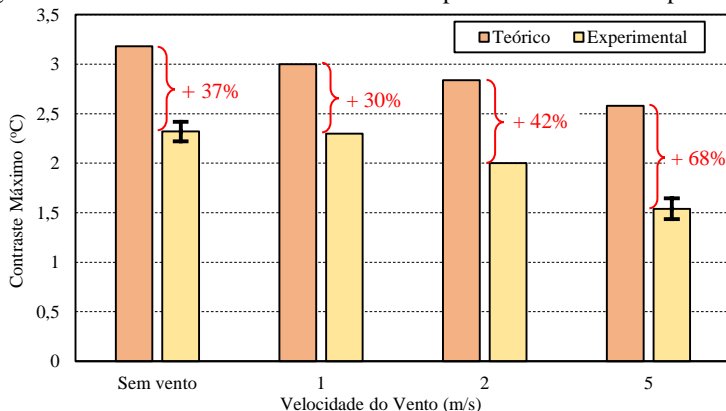
a análise temporal da evolução do contraste absoluto teórico, para diferentes velocidades e profundidades de defeito.

### 6.2.3.1 Contrastes Teórico e Experimental Absolutos Máximos

Inicialmente, é dada ênfase à amostra com defeito a 2 cm de profundidade, submetida a diferentes velocidades de vento. Após, são comparados os contrastes obtidos sem a ação do vento e com vento de 5 m/s, considerando-se diferentes profundidades de defeito.

A Figura 6.51 apresenta os contrastes absolutos (teórico e experimental) máximos para o defeito na profundidade de 2 cm, considerando-se as diferentes velocidades de vento testadas.

Figura 6.51. Contrastes absolutos teóricos e experimentais máximos para 2 cm.



Verifica-se que o comportamento dos contrastes máximos teóricos e experimentais é similar, diminuindo com o aumento da velocidade do vento. No entanto, é nítido que a discrepância entre os resultados aumenta com o incremento da velocidade do vento.

Considerando-se os resultados obtidos sem a ação do vento, e com vento de 5 m/s, além das profundidades de 2 e 3 cm, foram simulados os contrastes térmicos para as profundidades de 1 e 4 cm. A Figura 6.52 apresenta graficamente os resultados obtidos, que são ainda ilustrados numericamente na Tabela 6.1.

Figura 6.52. Contrastes máximos para diferentes profundidades.

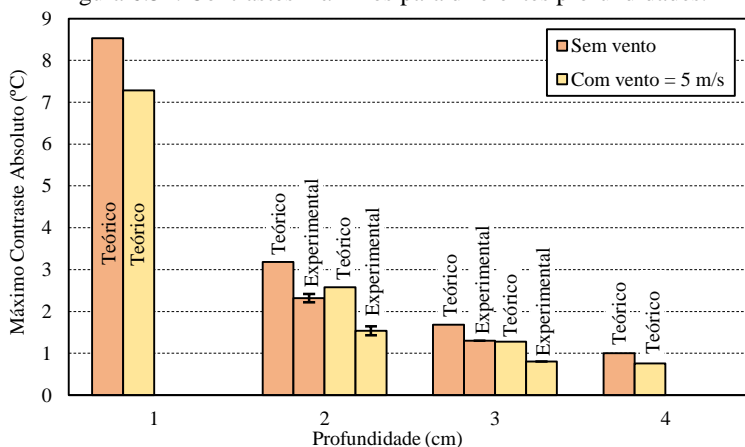


Tabela 6.1. Contrastes máximos para diferentes profundidades.

Condição	Contraste Absoluto (°C)					
	1 cm	2 cm		3 cm		4 cm
	Teor.	Teor.	Exp.	Teor.	Exp.	Teor.
Sem Vento	8,53	3,18	2,32	1,68	1,30	1,00
Vento de 5 m/s	7,28	2,58	1,54	1,28	0,80	0,76
Diferença	1,25	0,60	0,78	0,40	0,50	0,24

Constata-se que o contraste térmico absoluto aumenta com a diminuição da profundidade do defeito. Isso ocorre mesmo sob a ação do vento. No entanto, observa-se que, quanto mais próximo da superfície o defeito estiver, maior será a influência do vento na sua visualização.

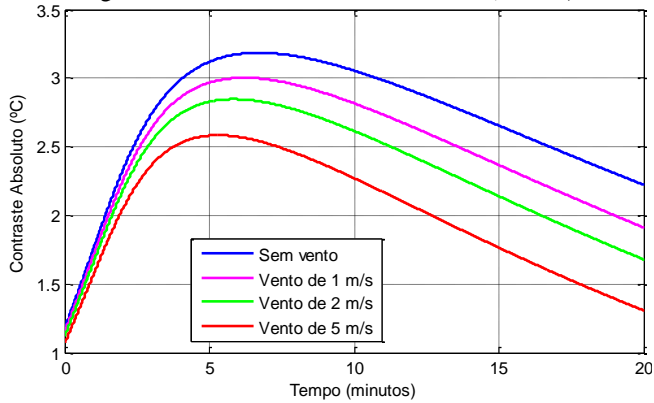
Na sequência, apresenta-se a evolução temporal do contraste térmico teórico.

### 6.2.3.2 Evolução Temporal do contraste Térmico Teórico

A Figura 6.53 apresenta a evolução do contraste térmico para a profundidade de 2 cm, considerando-se as diferentes velocidades de vento, obtidos durante a fase de resfriamento.



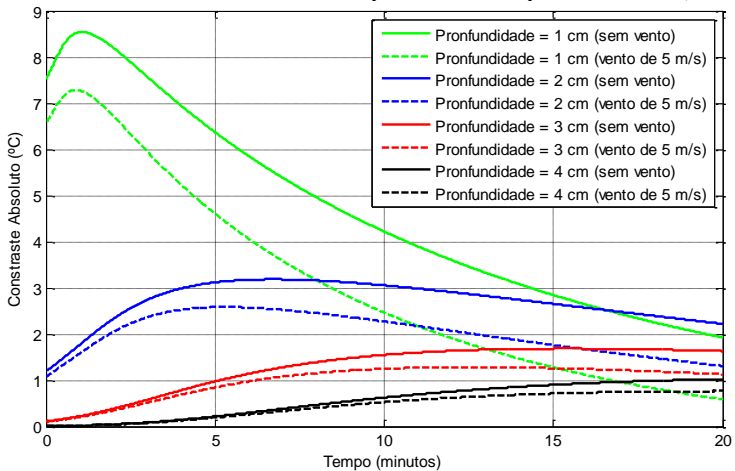
Figura 6.53. Contraste térmico absoluto (teórico).



O contraste máximo obtido é alcançado no intervalo entre 5 e 10 minutos de resfriamento, em ambas as situações. Nota-se ainda que o tempo necessário para alcançar-se este valor máximo, bem como sua magnitude, diminui, à medida que se aumenta a velocidade do vento.

Por fim, a Figura 6.54 apresenta a evolução temporal do contraste absoluto teórico, obtido sem a ação do vento, e com vento de 5 m/s, considerando-se as diferentes profundidades de defeito simuladas.

Figura 6.54. Contraste térmico absoluto para diferentes profundidades (teórico).



Observa-se que os máximos contrastes ocorrem para as menores profundidades. Verifica-se também que os tempos para obterem-se os

valores máximos de contraste aumentam, com o incremento da profundidade do defeito.

Para o mesmo tempo de aquecimento, o contraste térmico diminui drasticamente, à medida em que se aumenta a profundidade do defeito. Nota-se ainda que, com o incremento da profundidade, aumenta-se o tempo de resfriamento necessário para obter-se o máximo contraste, sendo estes resultados similares aos obtidos por Maierhofer *et al.* (2002), Laaide e Belattar (2014) e Cotic *et al.* (2015). Além disso, constata-se que, com o avanço do resfriamento, as curvas tendem a aproximar-se de um mesmo valor mínimo. Por fim, verifica-se que as diferenças entre os resultados sem vento, e com vento de  $5 \text{ m/s}$ , diminuem, à medida em que a profundidade do defeito aumenta.

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

---

Este trabalho teve por objetivo principal analisar a influência do vento na detecção de defeitos em estruturas de concreto, utilizando o ensaio não destrutivo de termografia infravermelha. Para isso, realizaram-se análises considerando-se diferentes velocidades de vento, e diferentes profundidades de defeito.

Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas com esta pesquisa, e sugestões de trabalhos futuros relacionados ao tema.

#### **7.1 CONCLUSÕES**

A influência do vento na detecção dos defeitos foi analisada experimental e numericamente, utilizando-se o método das diferenças finitas unidimensional.

De maneira geral, pôde-se verificar aderência entre os resultados obtidos de forma numérica e experimental. No entanto, foram observadas diferenças no valor máximo do contraste térmico, e no tempo de resfriamento necessário para que ele ocorra. Estas diferenças ocorreram em virtude da simulação desenvolvida ser unidimensional, e não representar exatamente as condições reais do experimento. Além disso, existem incertezas associadas às propriedades térmicas dos materiais, e à possibilidade de haver migração de umidade durante a realização do ensaio.

Com relação à análise quantitativa dos resultados, observou-se que ela é de extrema importância para a detecção dos defeitos. Pois em alguns casos, apenas uma análise qualitativa não é suficiente para detectar a presença de uma anomalia. Isto ficou bastante evidente para o ensaio realizado na amostra com defeito a 3 cm de profundidade.

Em uma análise quantitativa, verificou-se que o máximo contraste térmico diminuiu consideravelmente na amostra com defeito a 3 cm, quando comparada à amostra com defeito na profundidade de 2 cm. Entretanto, para os defeitos mais profundos, de acordo com Cotic *et al.* (2015), um aumento no valor do contraste térmico máximo pode ser obtido aumentando-se tempo de aquecimento da amostra.

Por meio dos resultados numéricos e experimentais, constatou-se uma associação entre a profundidade do defeito e o intervalo de tempo em que o contraste máximo se mantém constante. Sendo que, quanto maior a profundidade, maior o intervalo de tempo. De acordo com a simulação, realizada para as profundidades de 1, 2, 3 e 4 cm, verificou-se ainda que o máximo contraste térmico não é obtido no instante inicial de resfriamento. Com o incremento da profundidade do defeito, aumenta-se o tempo de resfriamento necessário para obter-se o máximo contraste. Este comportamento foi também verificado por Maierhofer *et al.* (2002).

Quanto à análise das repetições, realizadas nos ensaios sem ação do vento, e com vento de 5 m/s, verificou-se uma considerável dispersão nos resultados obtidos com a ação do vento. Isto ocorre pois, embora as repetições tenham sido efetuadas na mesma velocidade, o vento é uma variável estocástica, e não se distribui uniformemente ao longo da superfície.

Para a amostra com defeito a 2 cm de profundidade, observou-se que, quando aumentada a velocidade do vento, ocorre uma diminuição no valor do contraste térmico obtido. Para a velocidade de 1 m/s, estas diferenças observadas não foram muito significativas. Entretanto, com a velocidade de 2 m/s, observou-se que o contraste médio, obtido durante os 2 minutos iniciais de resfriamento, foi aproximadamente 0,35° C inferior ao obtido sem a ação do vento. No ensaio realizado com vento de 5 m/s, verificou-se que este valor foi 0,88° C menor do que o obtido sem vento. Estes resultados indicam que o vento influencia o desempenho do ensaio de forma crescente, à medida que sua velocidade é incrementada. Além disso, tais resultados estão em concordância com as recomendações da ASTM D4788, Balaras e Argiriou (2002) e de Lehmann *et al.* (2013), que não indicam a realização do ensaio de termografia para velocidades de vento acima de 5 m/s.

Quando analisada a amostra com defeito a 3 cm de profundidade, verificou-se experimentalmente que a diminuição do contraste absoluto médio, obtido nos 2 minutos iniciais de resfriamento, foi de  $0,46^{\circ} C$ . Considerando-se os resultados obtidos numericamente, para o defeito na profundidade de 1 cm, constatou-se uma diminuição de  $1,25^{\circ} C$  no contraste máximo. Já para o defeito na profundidade de 4 cm, observou-se um decréscimo de  $0,24^{\circ} C$ . Desta forma, pode-se concluir que, quanto menor a profundidade do defeito, maior a influência do vento no contraste térmico.

Pelo exposto, pode-se concluir, de forma geral, que para as condições laboratoriais nas quais o estudo foi desenvolvido, velocidades de vento de 2 m/s começam a mostrar influência no contraste térmico obtido. Uma análise cautelosa acerca dos resultados deve então ser feita quando os ensaios forem realizados com velocidades acima desta, principalmente quando a análise objetivar a busca de defeitos muito próximos à superfície.

Uma forma de diminuir o efeito do vento nos resultados obtidos é o aumento do tempo de exposição da amostra ao aquecimento, uma vez que o tempo de exposição, e sua magnitude, exerce grande influência nos contrastes térmicos obtidos.

## 7.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Na sequência, apresentam-se algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros, que visam aperfeiçoar e expandir esta pesquisa.

- Estudo do comportamento do contraste térmico, variando-se o tempo de aquecimento da amostra.
- Estudo do comportamento do contraste térmico para diferentes tamanhos de defeito.
- Estudo da influência das condições iniciais de aplicação do vento.
- Quantificação das incertezas associadas às propriedades térmicas dos materiais, e às características estocásticas do vento.
- Melhoria do modelo matemático, com implementação de uma análise tridimensional considerando migração de umidade e demais incertezas envolvidas.

- Estimação das probabilidades estatísticas de detecção do defeito em elementos estruturais, quantificando-se o grau de incerteza associado às dimensões reais do defeito.
- Análise da probabilidade de falha estrutural de um elemento que contenha um defeito com as características estatísticas estimadas no item anterior.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGELIS, D.G.; KORDATOS, E.Z.; SOULIOTI, D.V.; MATIKAS, T.E.; Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. **Construction and Building Materials**, v24, p. 1888-1897, 2010.

ALLPORT, J.; MCHUGH, J. **Quantitative evaluation of transient video thermography**. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, p. 253-262, 1998.

ASTM E1862-97, **Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers**, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2010.

ASTM 1933-99, **Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared**, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 1999.

ASTM 4788-03, **Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography**, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2003.

BALARAS, C. A; ARGIRIOU, A. A. Infrared thermography for building diagnostics. **Energy and Buildings**, p.171-183, 2002.

BARREIRA, E. S. B. M. **Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004.

BUNGEY, J.H.; MILLARD, S.J.; GRANTHAM, M.G. **Testing of concrete in structures**, 4 ed. Taylor & Francis, New York, 2006.

CALDEIRA, M. M. **Aplicação da Termografia Infravermelha para Identificação de Danos na Aderência entre Concreto e Polímero Reforçado com Fibras**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CARCIOFI, B.; GÜTHS, S.; LAURINDO, J.B. Uso de transdutores de fluxo de calor no estudo da transferência de calor em alimentos embalados. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. nº 22, p. 314-318, 2002.

ÇENGEL, Y. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 3 ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 2009. 902 p.

CHRZANOWSKI, K. **Non-Contact Thermometry - Measurement errors**. Warsaw: SPIE Polish Chapter, 2001. 140 p.

CORTIZO, E. C. **Avaliação da Técnica de Termografia Infravermelha para Identificação de Estruturas Ocultas e Diagnóstico de Anomalias em Edificações: Ênfase em Edificações do Patrimônio Histórico**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

COTIC, P.; KOLARIC, D.; BOSILJKOV, V.B.; BOSILJKOV, V. Determination of the applicability and limits of void and delamination detection in concrete structures using infrared thermography. **NDT&E International**, v74, p. 87-93, 2015.

CRAVEIRO, M. A. C. **Desenvolvimento de um sistema para avaliação dos fatores de influência sobre análises termográficas em subestações desabrigadas**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

DE MELO, A. G. B. **Inspeção em juntas coladas de tubos feitos por compósitos por termografia ativa pulsada**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, metalúrgica e dos materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DOS SANTOS, L. **Classificação e Modelagem de Fatores de Influência sobre Inspeções Termográficas em Ambientes Desabrigados**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

FARRAG, S.; YEHIA, S.; QADDOUMI, N. Investigation of Mix-Variation Effect on Defect-Detection Ability Using Infrared



Thermography as a Nondestructive Evaluation Technique. **Journal of Bridge Engineering**, v21, p. 1-15, 2016.

GARCIA, J. R. R. **Potencialidades da Termografia para o Diagnóstico de Patologias em Edifícios**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2014.

GAUSSORGUES, G.; **Infrared Thermography**. Dordrecht: Springer Science+Business Media BV, 1994. 552 p.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de física**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2009. p 295.

HOLST, Gerald C. **Common Sense approach to thermal imaging**. Winter Park: JCD Publishing, 2000. p. 377.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2008. p 643.

KERSUL, G. M. **Uso da Termografia para Inspeções e Manutenção Predial - Estudo de Caso**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2014.

LAAIDI, N.; BELATTAR, S.; Application of infrared thermography in the characterization of voids and honeycomb in concrete structure. **International Journal of Structural Integrity**, v5, p. 107-119, 2014.

LEHMANN, B.; WAKILI, G. K.; FRANK, TH.; COLLADO, V. B.; TANNER, CH. Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings. **Applied Energy**, v110, 29-43, 2013.

MAIERHOFER, Ch.; BRINK, A.; RÖLLING, M.; WIGGENHAUSER, H. Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the near surface region. **Infrared Physics & Technology**, v43, p. 271-278, 2002.

MAIERHOFER, Ch.; WIGGENHAUSER, H.; BRINK, A.; RÖLLING, M. Quantitative numerical analysis of transient IR-experiments on buildings. **Infrared Physics & Technology**, v46, p. 173-180, 2004.

MAIERHOFER, Ch.; ARNDT, R.; RÖLLING, M. Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography. **Infrared Physics & Technology**, v49, p. 213-217, 2007.

MALDAGUE, X. **Infrared and Thermal testing: Nondestructive testing handbook**. 3 ed. Columbus, OH: Patrick O. Moore, 2001.

MALDAGUE, X. Introduction to DNT by Active Infrared Thermography. **Materials Evaluation**, p. 1060-1073, 2002.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2 ed. New York: CRC Press, 2004.

MENDONÇA, L.V.; AMARAL DO, M. M.; CATARINO, P. S. **A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios**. Spy building, 2008.

MANUAL DO UTILIZADOR FLIR, T. **Manual do utilizador FLIR B series FLIR T**, FLIR Systems, 2010.

OLIVEIRA, T. M. D. **Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com recurso a termografia**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de computadores, Universidade do Porto, Porto, 2012.

OMAR, M.; HASSAN, K.; DONOHUE, K.; SAITO, R.; ALLOO, R. Infrared thermography for inspecting the adhesion integrity of plastic welded joints. **NDT&E International**, v39, p. 1-7, 2006.

PEREIRA, J. C. A. **Contribuição para a Análise de Manifestações Patológicas em Madeira na Construção com Recurso à Termografia. Determinação da Emissividade de algumas espécies de madeira empregues em Portugal**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, 2014.

RODRÍGUEZ, F.J.L. **Detecção e Caracterização de Defeitos Internos por Termografia Infravermelha Pulsada**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

RUMBAYAN, R.; WASHER, G.; Modeling of environmental effects on thermal detection of subsurface damage in concrete. **Research in Nondestructive Evaluation**, vol. 25, p. 235-252, 2014.

SCHOROEDER, J.; AHMED, B.; CHAUDHRY, B.; SHEPARD, S. Non-Destructive testing of structural composites and adhesively bonded composite joints: pulsed thermography. **Composites Part A** 33, p. 1511-1517, 2002.

VAN DE VIJVER, S.; STEEMAN, M.; VAN DEN BOSSCHE, N.; CARBONEZ, K.; JANSSENS, A. The influence of environmental parameters on the thermographic analysis of the building envelope. **QIRT - Civil Engineering & Buildings**, 2014.

WASHER, G.; FENWICK, R. G.; BOLLENI, N. K.; HARPER, J. Effects of Environmental Variables on Infrared Imaging of Subsurface Features of Concrete Bridges. **Transportation Research Record**, n° 2108, p.107–114, 2009.

WASHER, G.; FENWICK, R.; BOLLENI, N. Effects of Solar Loading on Infrared Imaging of Subsurface Features in Concrete. **Journal of Bridge Engineering**, v15, p. 384-390, 2010.

WEISER, M.; ROLLING, M.; ARNDT, R.; Development and test of a numerical model for pulse thermography in civil engineering. **Heat Mass and Transfer**, v46, p. 1419-1428, 2010.



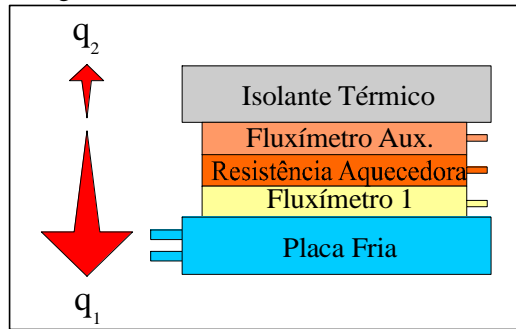
## ANEXOS

### A.1 MÉTODO DE CALIBRAÇÃO

---

Na calibração pelo método do "a fluxímetro auxiliar", utiliza-se uma placa isotérmica, como fonte de temperatura fria, uma resistência elétrica de *constantan* e um fluxímetro pré-calibrado (chamado auxiliar), conforme mostrado na Figura A.1.

Figura A.1. Método a fluxímetro auxiliar.



A soma dos fluxos de calor, registrados por cada um dos fluxímetros, é igual à potência dissipada pela resistência aquecedora ( $q$ ):

$$q = Ri^2 = c_1V_1 + c_{aux}V_{aux} \quad (A.1)$$

Onde:  $i$  é a corrente elétrica que atravessa o filme aquecedor, que possui resistência elétrica  $R$ ).

Conhecendo a constante de calibração do fluxímetro auxiliar ( $C_{aux}$ ), obtém-se o valor da constante de calibração do fluxímetro 1.

$$c_1 = \frac{Ri^2 - c_{aux}V_{aux}}{V_1} \quad (A.2)$$

Obs: A potência dissipada na resistência aquecedora também pode ser medida pela relação  $P=U^2/R$

