

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PARA AVALIAÇÃO DE
DANOS EM OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DE CONCRETO
ARMADO

Sandra Pozzer

Passo Fundo
2020



Sandra Pozzer

**Termografia infravermelha para avaliação de danos em
obras de arte especiais de concreto armado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob orientação do Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa e coorientação do Prof. Dr. Zacarias Chamberlain Pravia.

Passo Fundo

2020

CIP – Catalogação na Publicação

- P893t Pozzer, Sandra
Termografia infravermelha para avaliação de danos em obras de arte especiais de concreto armado [recurso eletrônico] / Sandra Pozzer. – 2020.
10 MB ; PDF.
- Orientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa.
Coorientador: Prof. Dr. Zacarias Chamberlain Pravia.
Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, 2020.
1. Engenharia civil. 2. Concreto armado – Estrutura.
3. Concreto armado – inspeção. 4. Testes não destrutivos.
I. Dalla Rosa, Francisco, orientador. II. Pravia, Zacarias Chamberlain, coorientador. III. Título.

CDU: 691.328

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

Universidade de Passo Fundo
Faculdade de Engenharia e Arquitetura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a dissertação de mestrado “Termografia infravermelha para avaliação de danos em obras de arte especiais de concreto armado”, elaborada por Sandra Pozzer, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Data da aprovação: 19/02/2020.

Comissão Examinadora:

Prof. PhD. Ehsan Rezazadeh Azar- Lakehead University

Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto- Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Fernando Busato Ramires- Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa, Orientador

Prof. Dr. Zacarias Chamberlain Pravia, Co-orientador

Passo Fundo, 2020.

AGRADECIMENTOS

Existe um número grande de pessoas a quem eu desejo expressar minha gratidão. Todas elas me ajudaram, de alguma forma, na jornada do meu mestrado na Universidade de Passo Fundo e Lakehead University.

Meu agradecimento especial aos meus supervisores, Professores Francisco Dalla Rosa e Zacarias Martin Chamberlain Pravia, por seu constante suporte e ensinamentos. O conhecimento, experiência e encorajamento compartilhados foram de grande valor para mim. Eles estiveram constantemente disponíveis durante todo o trabalho de pesquisa e para mim foi uma honra trabalhar sob a supervisão destes grandes mestres.

Minha gratidão se estende ao Professor Ehsan Rezazadeh Azar, que foi meu supervisor durante o período de pesquisa na Lakehead University. Obrigada por todo o tempo de supervisão, por ter ampliado o espectro da minha pesquisa de mestrado e por ter assistido com tanto conhecimento, paciência e efetividade esta rica pesquisa indisciplinar desenvolvida. Meu agradecimento também aos Professores Pedro Domingos Marques Prietto e Fernando Busato Ramires, pelas contribuições durante todas as fases do mestrado, e ao Professor Marcos Antonio Leite Frandaloso, pelo compartilhamento do termovisor para realização da fase experimental da pesquisa.

Meu agradecimento também aos profissionais do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade de Passo Fundo, pela ajuda na execução das amostras de concreto, à secretaria e aos colegas de mestrado que se tornaram grandes amigos, por conhecer de perto a jornada. À meus amigos antigos e novos, aos presentes e aos conquistados durante esse caminho: vocês são muito importantes e foram meu suporte físico e emocional nesta jornada.

E por fim, minha profunda gratidão aos meus pais e minha família pela inspiração e amor incondicional durante toda a jornada. Eles são sempre meus maiores apoiadores.

“If I have seen further it is by standing on the shoulders of Giants”

Isaac Newton

RESUMO

O gerenciamento de estruturas de concreto armado constitui um dos desafios contínuos da engenharia, onde além de projetar e construir, há uma preocupação constante em assegurar o desempenho das obras. Uma importante parcela da gestão das estruturas ocorre através das inspeções, que permitem a formulação de diagnósticos e prognósticos a respeito de seu comportamento estrutural, funcional e da durabilidade ao longo do tempo. Esta pesquisa faz uma análise qualitativa e quantitativa do desempenho da termografia infravermelha passiva, um ensaio não destrutivo, para inspeções de estruturas de concreto armado em obras de arte especiais. Três amostras de laje e uma amostra de pilares foram construídas com a simulação de diferentes configurações de danos subsuperficiais e ensaiadas por meio de termografia infravermelha passiva em diferentes períodos do dia e do ano. Além da análise qualitativa e quantitativa, foi realizada abordagem estatística e modelagem numérica. Uma análise de regressão multivariada foi utilizada para explicar e prever o comportamento térmico das áreas inspecionadas. Dentro do horizonte deste estudo, períodos de tempo entre às 12:00 e as 16:00 horas, com temperaturas entre 27.5°C e 37.9°C, grande quantidade de radiação solar direta e baixos valores de pressão atmosférica configuram o cenário ideal para inspeções termográficas em obras de arte de concreto armado sob aquecimento passivo. Além disso, meses com clima mais quente (novembro e fevereiro) permitiram detectar uma quantidade maior de contrastes térmicos robustos do que meses de clima mais frio (março, abril, junho e julho). A análise numérica por elementos finitos obteve sucesso em reproduzir inspeções termográficas com uso de aquecimento passivo, via radiação solar, com resultados de termogramas e valores de contraste convergentes com o programa experimental, apresentando uma média de diferença de 0,2°C entre contrastes observados e simulados. Os resultados mostram que a termografia infravermelha é efetiva na detecção de danos subsuperficiais em lajes de pontes de concreto armado, porém é sensível especialmente às condições ambientais e ao horário em que a inspeção é conduzida.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos, pontes de concreto armado, infraestrutura, inspeção de pontes, termografia infravermelha

ABSTRACT

Structural management is one of the continuous engineering challenges, where in addition to the project and construction there is a constant concern to ensure reliability in the performance of the structures. The inspections have been an important activity in the structure management, which allows diagnoses and prognoses based on the structural, functional and durability conservation state of the elements. In this context, is increasing the use of non-destructive testing to minimize the inspection damages and to optimize the inspection procedure. This study approached a qualitative and quantitative performance analysis of passive infrared thermography as a non-destructive test for inspections of concrete structures. Three samples of bridge slabs and one sample of bridge column were fabricated, which included the simulation of different subsurface damage configurations, and tested using passive infrared thermography at different times of day and year. A statistical approach was developed, where a multivariate regression analysis was used to explain and predict the thermal behavior of the inspected areas. Within the study horizon, periods between 12:00 noon and 4:00 in the afternoon, with temperatures between 27.5°C and 37.9°C, a large amount of direct solar radiation and low atmospheric pressure set the ideal scenario for thermographic inspections in reinforced concrete bridge under passive heating. In addition, months with hotter weather (November and February) allowed detecting a greater amount of robust thermal contrasts than months of colder weather (March, April, June, and July). A numerical simulation using finite element model was performed to test the use of the computational tool in the field of passive infrared thermography and has successfully replicated the thermographic inspections using solar radiation, with convergent observed and simulated results of both thermograms and contrast values, and an average difference of just 0.2°C. In general, the passive infrared thermography technique was capable of detect delaminations in inspection of reinforced concrete bridge slabs and columns samples, being especially sensitive to the environmental conditions.

Keywords: non-destructive testing, reinforced concrete bridges, infrastructure, bridge inspection, infrared thermography

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Danos comuns em pontes de concreto armado.....	24
Figura 2- Delaminação induzida por processo de corrosão.....	25
Figura 3- Espectro eletromagnético.....	30
Figura 4- Emissividade para materiais comuns.....	32
Figura 5- Objeto sob incidência de radiação.....	33
Figura 6- Valores de absorvidade para materiais comuns.....	35
Figura 7- Relações entre parâmetros do corpo negro e de corpos reais.....	35
Figura 8- Princípio de detecção de danos em estruturas de concreto.....	36
Figura 9- Procedimentos e equipamentos para inspeção termográfica.....	37
Figura 10- Variação da emissividade de materiais segundo o ângulo de tomada das fotos em relação à observação perpendicular para: 1) madeira 2) papel 3) vidro.....	41
Figura 11- Componentes da trajetória solar.....	43
Figura 12- Componentes de trajetória solar em uma carta solar.....	44
Figura 13- Cartas solares para diferentes latitudes: a) Linha do Equador b) Passo Fundo.....	45
Figura 14- Transferência de calor em regime: (a) permanente (b) transiente.....	48
Figura 15- Modelo de regressão a) matemático: $Y = f(X_h)$ b) estatístico: $Y = f(X_h) + \varepsilon$	51
Figura 16- Inspeção termográfica estimada pelo modelo.....	54
Figura 17- Inspeção termográfica medida.....	54
Figura 18- Imagens termográficas em ponte.....	56
Figura 19- Comparação entre resultados obtidos experimentalmente e numericamente.....	57
Figura 20- Geometria para modelagem numérica.....	59
Figura 21- Resultados da simulação numérica para cada profundidade.....	60
Figura 22- Planejamento das amostras de lajes e pilares.....	64
Figura 23- Construção de amostras de lajes e pilar de ponte -Posicionamento dos defeitos... ..	64
Figura 24- Amostras de elementos após a cura.....	65
Figura 25- Câmera termográfica TESTO 881-1.....	66
Figura 26- Local de posicionamento do sensor térmico de contato.....	69
Figura 27- Esquema de medida de temperatura no interior do concreto usando sensor LM35 e placa de prototipagem Arduíno.....	69
Figura 28- Disposição das amostras.....	70
Figura 29- Trajetória solar no local de ensaio das amostras - 23 de Fevereiro de 2019, imagem obtida via http://www.sunearthtools.com	70
Figura 30- Radiação solar em superfícies verticais em períodos frios e quentes para latitude 30° ($\text{kcal} \cdot 10^6 \text{dia}^{-1}$).....	72
Figura 31- Procedimento para quantificação de temperaturas superficiais.....	73
Figura 32- Características geométricas da amostra de laje simulada.....	76
Figura 33- Malha “Finer” utilizada na discretização da amostra de laje simulada.....	77
Figura 34- Comparação entre temperatura ambiente medida no local e calculada pela Equação 10.....	80
Figura 35- Ensaio de verificação de profundidade dos danos usando serra manual com disco de concreto.....	81
Figura 36- Ensaio de verificação de profundidade dos danos com serra copo.....	82
Figura 37- Profundidade exata dos danos simulados.....	82
Figura 38- Ensaio para determinação da emissividade.....	83

Figura 39- Ensaio para determinação de temperatura refletida.....	84
Figura 40- Foto tradicional das amostras	85
Figura 41- Análise termográfica qualitativa para amostra de laje.....	86
Figura 42- Danos observados na análise termográfica de L3: a) Durante o dia b) Durante a noite	88
Figura 43- Perfil termográfico para os danos registrados na Figura 42: a) Durante o dia b) Durante a noite.....	88
Figura 44- Trajetória solar nas diferentes faces das amostras de pilares: a) Face Nordeste b) Face Sudeste c) Sudoeste d) Noroeste	90
Figura 45- Análise termográfica qualitativa para amostra pilar na face Nordeste	91
Figura 46- Análise termográfica qualitativa para amostra de pilar na face Sudeste	92
Figura 47- Análise termográfica qualitativa para amostra de pilar na face Sudoeste	93
Figura 48- Análise termográfica qualitativa para amostra de pilar na face Noroeste	94
Figura 49- Defeitos utilizados para análise quantitativa	96
Figura 50- Variabilidade do contraste em amostra de laje em função do horário e mês.....	97
Figura 51- Variabilidade do índice de radiação solar ao longo dos meses.....	97
Figura 52- Variabilidade do contraste em amostra de pilar em função do horário e mês -Face Nordeste.....	99
Figura 53- Variabilidade do contraste em amostra de pilar em função do horário e mês -Face Sudeste.....	100
Figura 54- Variabilidade do contraste em amostra de pilar em função do horário e mês -Face Sudoeste.....	100
Figura 55- Variabilidade do contraste em amostra de pilar em função do horário e mês -Face Noroeste.....	102
Figura 56- Variabilidade da temperatura superficial em função da temperatura ambiente- Fevereiro.....	103
Figura 57- Variabilidade da temperatura superficial em função da temperatura ambiente- Julho	104
Figura 58- Relação entre valores de contraste e de temperatura ambiente	105
Figura 59- Variabilidade da temperatura superficial em função da umidade relativa do ar - Fevereiro.....	106
Figura 60- Variabilidade da temperatura superficial em função da umidade relativa do ar - Julho	106
Figura 61- Relação entre valores de contraste e de umidade relativa do ar	107
Figura 62- Variabilidade da temperatura superficial em função da radiação solar - Fevereiro	108
Figura 63- Variabilidade da temperatura superficial em função da radiação solar - Julho....	108
Figura 64- Relação entre valores de contraste e radiação solar.....	109
Figura 65- Variabilidade da temperatura superficial em função da pressão atmosférica – Fevereiro.....	110
Figura 66- Variabilidade da temperatura superficial em função da pressão atmosférica - Julho	110
Figura 67- Relação entre valores de contraste e pressão atmosférica	111
Figura 68- Variabilidade da temperatura superficial em função da velocidade do vento- Fevereiro.....	112
Figura 69- Variabilidade da temperatura superficial em função da velocidade do vento - Julho	113

Figura 70- Relação entre valores de contraste e velocidade do vento.....	113
Figura 71- Relação entre a temperatura medida pelo termovisor e pelo termômetro de superfície	114
Figura 72- Dados de temperatura do Sensor LM35-Fevereiro.....	115
Figura 73- Dados de temperatura do Sensor LM35-Julho	116
Figura 74- Relação entre o contraste e a profundidade e área dos danos para amostra de laje	117
Figura 75- Relação entre os valores de contraste e área do dano para amostra de laje	118
Figura 76- Relação entre os valores de contraste e profundidade do dano para amostra de laje	119
Figura 77- Relação entre o contraste e a profundidade e área dos danos para amostra de pilar	120
Figura 78- Relação entre os valores de contraste e área dos danos para amostra de pilar	121
Figura 79- Relação entre os valores de contraste e profundidade dos danos para amostra de pilar.....	121
Figura 80- Diagrama de correlação entre as variáveis da regressão de X1 a X8	123
Figura 81- Suposições de regressão para y_c	128
Figura 82- Suposições de regressão para y_D	129
Figura 83- Ajuste do modelo de regressão para a temperatura superficial do concreto sem danos y_c	130
Figura 84- Ajuste do modelo de regressão para a temperatura superficial do concreto danificado y_D	130
Figura 85- Comparação entre valores de contrastes previstos e observados.....	132
Figura 86- Contraste previsto para os diferentes horários de levantamento.....	137
Figura 87- Contraste observado para os diferentes horários de levantamento	137
Figura 88- Temperaturas superficiais medidas por termografia infravermelha e simuladas pelo MEF	142
Figura 89- Contrastes medidos por termografia infravermelha e simulados pelo MEF	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Teste de convergência de malha.....	77
Tabela 2- Propriedades dos materiais utilizados na simulação	78
Tabela 3- Dados meteorológicos utilizados na simulação	80
Tabela 4- Valor de Inflação de Variância (FIV) para a variáveis	124
Tabela 5- Análise da equação do modelo de regressão	124
Tabela 6- Resultados do modelo de regressão para temperatura superficial do concreto danificado (y_D).....	126
Tabela 7- Resultados do modelo de regressão para temperatura superficial do concreto sem danos (y_C)	126
Tabela 8 - Agentes de validação das equações de regressão	132
Tabela 9- Coeficientes de regressão padronizados (beta)	134
Tabela 10- Porcentagem de contrastes conclusivos e inconclusivos para diferentes períodos de tempo	137
Tabela 11- Porcentagem de contrastes conclusivos e inconclusivos para diferentes níveis de temperatura ambiente	138
Tabela 12- Porcentagem de contrastes conclusivos e inconclusivos para diferentes níveis de radiação solar.....	138
Tabela 13- Porcentagem de contrastes conclusivos e inconclusivos para diferentes níveis de pressão atmosférica.....	138

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Regulamentações para inspeções de pontes a nível global	21
Quadro 2-Principais ensaios não destrutivos para concreto.....	27
Quadro 3-Normas brasileiras para termografia infravermelha.....	38
Quadro 4- Instrumentação de apoio às medições de variáveis ambientais.....	67
Quadro 5-Incidência de radiação solar nas amostras ao longo do dia durante o levantamento termográfico realizado no mês de fevereiro de 2019.....	71
Quadro 6- Comparação entre temperaturas superficiais medidas por termografia infravermelha e simuladas por MEF para a amostra de laje de concreto com danos subsuperficiais.....	141

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
	2.1 Inspeção de pontes	20
	2.2 Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado	23
	2.3 Ensaaios não destrutivos	26
	2.4 Termografia infravermelha	28
	2.4.1 Radiação térmica: conceitos fundamentais	29
	2.4.1.1 Emissividade	31
	2.4.1.2 Absorção, reflexão e transmissão	33
	2.4.2 Uso da termografia para inspeção de pontes de concreto armado	36
	2.4.3 Fatores potencialmente interferentes em um ensaio termográfico	39
	2.4.3.1 Operador do equipamento termográfico	40
	2.4.3.2 Emissividade da superfície	40
	2.4.3.3 Temperatura refletida	41
	2.4.3.4 Atenuação atmosférica	42
	2.4.3.5 Geometria solar	42
	2.5 Métodos numéricos	45
	2.5.1 Métodos numéricos aplicados à transferência de calor	46
	2.5.2 Análises térmicas pelo MEF	47
	2.6 Estudos estatísticos	49
	2.6.1 Estatística descritiva	49
	2.6.2 Teste de hipóteses	49
	2.6.3 Modelos de regressão	50
	2.7 Estudos anteriores	52
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	63
	3.1 Configuração experimental	63
	3.1.1 Construção das amostras	63
	3.1.2 Instrumentação da pesquisa	65
	3.1.2.1 Câmera térmica	65
	3.1.2.2 Equipamentos de controle das variáveis ambientais	67
	3.1.3 Disposição das amostras	69
	3.2 Metodologia de análise	72
	3.2.1 Levantamento termográfico	72

3.2.1.1	Determinação das temperaturas superficiais	73
3.2.2	Análise estatística	74
3.2.3	Modelagem numérica	75
3.2.3.1	Geometria do modelo	76
3.2.3.2	Malha aplicada	76
3.2.3.3	Propriedade dos materiais	78
3.2.3.4	Condições de contorno	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1	Verificação das profundidades dos danos simulados	81
4.2	Definição da emissividade das amostras	83
4.3	Temperatura refletida	83
4.4	Análise qualitativa dos ensaios termográficos	85
4.4.1	Amostras de lajes	85
4.4.1.1	Perfis de temperatura	87
4.4.2	Amostra de pilar	89
4.5	Análise quantitativa dos ensaios termográficos	95
4.5.1	Variabilidade em função das configurações de inspeção: horário e mês	96
4.5.2	Variabilidade em função das condições ambientais	102
4.5.2.1	Temperatura ambiente	103
4.5.2.2	Umidade relativa do ar	105
4.5.2.3	Radiação solar	108
4.5.2.4	Pressão atmosférica	110
4.5.2.5	Velocidade do vento	112
4.5.3	Instrumentação de apoio	114
4.5.3.1	Termômetro de superfície	114
4.5.3.2	Sensores LM35	115
4.5.4	Variabilidade em função das configurações dos danos: área e profundidade	117
4.6	Abordagem estatística	122
4.6.1	Definição do modelo de regressão linear multivariada	122
4.6.2	Implementação do modelo de regressão	125
4.6.3	Suposições em análise de regressão múltipla	128
4.6.4	Validação dos resultados	129
4.6.5	Análise dos resultados modelo de regressão	133
4.6.5.1	Variáveis explicativas	133

4.6.5.2	Previsão de janela de tempo favoráveis para inspeção	135
4.7	Modelagem numérica por elementos finitos	140
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	146
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
	APÊNDICE 1 – Especificações técnicas da câmera termográfica TESTO 881-1	158
	APÊNDICE 2 – Dados das condições ambientais em cada levantamento	159

1 INTRODUÇÃO

Pontes e viadutos são estruturas importantes da rede de transportes global e representam um meio de interposição entre civilizações a datar de períodos anteriores à era cristã, consolidando-se desde então como elementos cruciais do modal rodoviário, ferroviário, ciclístico e de pedestres. Essas obras de arte especiais estão relacionadas ao bem-estar das populações, em virtude de que, em muitos casos, configuram a única solução para mobilidade de pessoas e produtos perante obstáculos naturais e antrópicos, como corpos d'água, vales, rios, mares e intersecções (VITÓRIO, 2015). Além disso, sua forma e integração ao ambiente representam muitas vezes um ganho turístico, tornando-se um patrimônio singular para as cidades em que estão inseridas.

Deficiências nos componentes estruturais de obras de arte especial (OAE) de concreto armado, como pavimento, tabuleiro, vigas, pilares, guarda-corpos, fundações, encontros, entre outros, são de comum ocorrência devidos as ações ambientais e de degradação ao longo do tempo. Os custos para o trabalho de engenharia necessários ao gerenciamento e à manutenção de uma rede viária ou ferroviária em condições satisfatórias é alto. Porém, os custos indiretos de consequências como congestionamento e interrupção do tráfego podem ser muito maiores e originar penalidades econômicas e sociais (TRIMIS, 2018).

A vida útil de serviço de uma OAE depende diretamente de sua condição de uso e das corretas medidas de preservação da estrutura (FERREIRA, 2018). Conforme revisão feita por Dorafshan e Maguire (2018), inspeções visuais são o tipo mais antigo e frequente para vistoria dos elementos estruturais das obras de arte. No entanto, existem alguns desafios associados a este tipo de inspeção, principalmente no que diz respeito a subjetividade da interpretação atribuída unicamente ao inspetor e a limitação na capacidade de identificar manifestações patológicas subsuperficiais.

As obras de arte brasileiras são relativamente jovens se comparadas com as mesmas estruturas de países europeus e norte-americanos. Neste contexto, estas nações estão mais avançadas no estudo e na utilização de tecnologias para inspeção que possam trazer vantagens sobre as limitações dos procedimentos convencionais (RAUBER et al., 2018). No Brasil, enfrentam-se problemas com a ausência de dados consolidados sobre a real quantidade de OAEs em condições que expõem risco à conservação e segurança da estrutura, além de que as inspeções rotineiras para segurança de pontes são escassas. Em âmbito acadêmico, há necessidade de maior produção de conhecimento sobre o tema (VITÓRIO, 2015).

Neste sentido, ensaios não destrutivos são eficazes para identificar e monitorar a deterioração do concreto desde suas fases iniciais de maneira rápida e minimamente invasiva. Dentre estes ensaios, enfatiza-se a termografia infravermelha, uma tecnologia utilizada no diagnóstico estruturas, onde câmeras termográficas têm a possibilidade de identificar danos devido à diferença de temperaturas superficiais (OMAR; NEHDI; ZAYED, 2018). Por ser embutida em uma câmera, veículo ou até mesmo em um celular, a tecnologia de análise infravermelha pode ser aplicada de maneira rápida e prática, capturando imagens de áreas amplas sem nenhum contato direto e sem interrupção do tráfego (CUNHA, 2016).

A abordagem da termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de estruturas civis tem obtido resultados satisfatórios (GARRIDO; LAGÜELA; ARIAS; 2018; HUH et al., 2016; MENDONÇA, 2005; COTIč et al., 2015; BAGAVATHIAPPAN et al., 2013), e seu emprego para inspeção de pontes está sendo progressivamente consolidado (WATASE et al., 2015; FARRAG; YEHA; QADDOUMI, 2016; HIASA et al., 2016; 2017a; 2017b; 2017c e 2018; OMAR et al., 2017; DABOUS et al., 2017; JANKö; BřEZINA; GROLEK, 2017; ROCHA; PÓVOAS, 2017; TRAN et al., 2017; WASHER et al., 2009; 2010a; 2010b e 2013; ASTM, 2013). Conforme Rocha e Póvoas (2017), a alternativa de utilização da câmera térmica em inspeções de obras de arte de concreto armado tem o intuito de aumentar a precisão na detecção de danos na estrutura da ponte. Além disso, a capacidade de levantamento de danos sob a superfície do concreto, como delaminações, representa um avanço quando comparado às inspeções visuais tradicionais.

No entanto, é pressuposto que fatores externos exerçam influência sobre a técnica estudada (ASTM, 2013; RAPOSO, 2017; WASHER et al., 2013; HIASA et al., 2018; TRAN et al. 2017). Assim surgiu a questão desta pesquisa: conhecer quais destes fatores exercem influência sobre a inspeção termográfica, bem como a significância dos mesmos nos processos de transferência de calor que fornecem a resposta em termos de mensuração de danos pelo equipamento. Além disso, investigar o desempenho da técnica na detecção de danos em pontes de concreto armado. Como hipótese, assumiu-se que variáveis como temperatura ambiente, pressão atmosférica, radiação solar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, horário para inspeção, profundidade e área do dano são variáveis potencialmente interferentes nos resultados de inspeção oferecidos pela câmera térmica. Em termos de desempenho, foi pressuposto que a técnica é capaz de levantar informações que não são alcançadas pela inspeção visual tradicional.

O potencial da termografia infravermelha como método não destrutivo para inspeção de pontes de concreto armado, assim como o domínio dos cenários em que sua utilização é conduzida de maneira adequada, é relevante tanto para profissionais técnicos quanto para

dirigentes de níveis estratégicos e econômicos que atuam no processo de gerenciamento da infraestrutura. O progresso no uso de instrumentos que priorizam a automatização e a precisão na coleta e reconhecimento de dados durante a inspeção de obras de arte representa um avanço destes processos. Isso porque uma maior acurácia na condução de inspeções permite prognósticos mais adequados para os programas de gestão, contribuindo para a vida útil e para a segurança estrutural das estruturas da infraestrutura e, conseqüentemente, de toda a população que delas usufrui. A fundamentação da aplicabilidade de um método alternativo de inspeção também vai ao encontro das premissas da sustentabilidade, pois alinha-se ao objetivo de usar e preservar de maneira inteligente aquilo que foi construído, de forma que seja mantido para as próximas gerações.

Dentro das linhas de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo (PPGEng UPF), o estudo abordou um tema que faz parte da grande área de Gestão de Estruturas da Infraestrutura, buscando contribuir para o aperfeiçoamento de métodos de inspeção e manutenção de pontes de concreto armado. Dentro das pesquisas feitas no PPGEng UPF, o assunto abordado tem temática similar às dissertações de Milani (2010), Braido (2014) e Tozzeto (2016), por apresentar uma proposta de metodologia voltada à verificação de desempenho de obras de arte existentes.

Desta forma, teve-se como objetivo avaliar o desempenho da termografia infravermelha na detecção de danos em obras de arte especiais de concreto armado, especificamente no que tange à sua sensibilidade aos fatores ambientais, às características dos danos e às configurações práticas de inspeção. A partir dos dados levantados estimou-se um modelo estatístico capaz de explicar e representar os resultados das inspeções em função da variabilidade dos fatores interferentes. Nesta mesma linha, foi feita a modelagem numérica do levantamento termográfico e os resultados foram comparados com os termogramas obtidos experimentalmente, a fim de avaliar a possibilidade de utilizar ferramentas computacionais para simular a inspeção de estruturas através da termografia infravermelha passiva e identificar defeitos através do contraste térmico em diferentes períodos de tempo. Com todos esses objetivos alcançados, foi possível fundamentar a aplicabilidade do método de análise termográfica passiva para inspeções de pontes de concreto armado, com o escopo de contribuir para o progresso na automatização dos processos de inspeção em relação às técnicas convencionais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A história da construção de pontes é antiga, a datar de quando as civilizações encontraram as primeiras dificuldades para travessia de rios, riachos e vales. Os primeiros materiais utilizados em suas estruturas foram pedras e madeira. Com a Revolução Industrial, em meados do século XVIII, consolidou-se o uso do ferro, seguido do aço e, então, do concreto armado. Junto com o orgulho de seus projetistas e usuários, as pontes são, desde então, símbolos de progresso e desenvolvimento de uma nação (PINHO; BELLEI, 2007).

2.1 Inspeção de pontes

A inspeção de ponte é definida pela Norma brasileira 010/2004-PRO do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) como uma atividade técnica para levantamento de informações referentes ao projeto e construção de pontes novas e para avaliação do estado de obras existentes, a fim de manter um desempenho adequado e seguro durante sua vida útil. Além disso, as inspeções embasam recomendações para novas vistoriais, intervenções de manutenção, reforço ou reconstrução. Identifica-se através das inspeções os problemas existentes em obras de arte de concreto armado para que, se cabíveis, as manutenções possam sanar as avarias que comprometem a durabilidade e a vida útil antes que a falha possa comprometer a segurança estrutural da ponte e de toda a infraestrutura envolta.

Cada país ou estado possui normas regulamentadoras, concebidas pelo departamento de transporte máximo dentro de sua jurisdição, que orientam o procedimento de inspeção das obras de arte. Esse conjunto de instruções, chamado de manual, seja federal ou estadual, tem o objetivo de simplificar e padronizar as inspeções das obras, apresentando clareza e flexibilidade para ser adaptado a toda e qualquer dimensão e configuração de obra de arte (AASHTO, 2010).

Em relação aos tipos, procedimentos e periodicidade de inspeções, o Quadro 1 apresenta as recomendações de alguns países para vistorias de obras de arte de concreto armado. No Brasil, o gerenciamento das obras de arte é uma atividade que compete ao órgão de transporte responsável pela administração da rodovia em que ela está inserida. Desse modo, a inspeção de pontes e viadutos localizadas ao longo de rodovias federais ocorrem ao cargo do DNIT, obras de arte no percurso de rodovias estaduais são inspecionadas pelo Departamento de Estradas e Rodagem de cada estado e infraestruturas dentro da área de jurisdição dos municípios são de responsabilidade de sua respectiva prefeitura. No que concerne às pontes ferroviárias, as inspeções são feitas pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT).

Quadro 1- Regulamentações para inspeções de pontes a nível global

PAÍS	INSPEÇÕES	FREQUÊNCIA MÍNIMA	TIPO
BRASIL	Cadastral	Pontes novas, com mudança de configuração estrutural	Documentação de todos os elementos
	Rotineira	Anual	Verificação e/ou acompanhamento de manifestações patológicas
	Especial	5 anos	Mapeamento pormenorizado, gráfico e quantitativo das anomalias em todos os elementos
	Extraordinária	Quando ocorrem danos antrópicos ou ambientais	Avaliação de danos e gerenciamento de cargas/tráfego
JAPÃO	Regular	5 anos	Inspeção Visual de todos os elementos
ESTADOS UNIDOS	Inicial	Pontes novas ou com mudança de configuração estrutural	Inventário da ponte
	De Rotina	2 anos	Inspeção Visual de todos os elementos
	De Dano	Quando ocorrem danos antrópicos ou ambientais	Investigação dos danos
	Profunda	Programada	Investigação de deficiências não detectadas em inspeções de rotina
	Especial	Programada	Monitoramento de defeito particular ou suspeita de deficiência
	Subaquática	Depende da idade, material constituinte, tipo, histórico de danos, profundidade, entre outros fatores.	Inspeção da subestrutura embaixo d'água e do canal
	<i>Hands-on</i>	Programada	Inspeção visual e com ensaios não destrutivos, feita a partir do passeio das pontes
	Crítica de Fratura	Programada	Inspeção visual e com ensaios não destrutivos em membros em situação crítica
REINO UNIDO	Aceitação	Pontes novas, com mudança de configuração estrutural ou com novo contrato de manutenção	Avaliação da qualidade final de entrega de elementos
	Superficial	Anual	Verificação de defeitos que representam risco à segurança
	Geral	2 anos	Para elementos de fácil acesso
ÁFRICA DO SUL	Principal	6 anos	Para todos os elementos da ponte. Inspeção visual e com ferramentas
	Especial	Programada	Detalhes de componentes particulares
	Monitoramento	Anual	Checagem defeitos Não avalia a obra
	Monitoramento	Anual	Checagem de novos defeitos, ou defeitos antes levantados. Não avalia a obra
	Verificação	Anual	Verifica a acurácia dos dados de inspeções
	Nível de projeto	Programada	Coleta informações para documentos contratuais
	Aceitação	Durante e após um contrato	Verifica trabalho de contratadas

Quadro 1- Regulamentações para inspeções de pontes a nível global

(cont.)

PAÍS	INSPEÇÕES	FREQUÊNCIA MÍNIMA	TIPO
DINAMARCA	Inventário	Pontes novas, com mudança de configuração estrutural	Coleta dados iniciais da ponte
	Diária	Diária	Verifica, através de patrulhas de manutenção sob veículos, defeitos das pontes
	Rotina	Anual	Verifica de limpeza, danos e manutenção de rotina
	Opinião dos Usuários	Conforme necessidade	Danos causados por impacto, vandalismo, detritos ou erosão
	Principal	6 anos	Para todos os elementos da ponte
	Especial	Recomendada pela Inspeção de Rotina	Coleta informações mais detalhadas para eventos de manutenção
	Especial Econômica	Quando há desenvolvimento de projetos/ manutenção/ reparo	Para grandes reparos, comparação de alternativas
	Especial Técnica	Em eventos extremos ou quando há dúvidas de desempenho	Investigação de danos, tráfego e capacidade de carga
ALEMANHA	Teste Maior	6 anos, em início e final de contrato de garantia	Inspeção de todos os elementos, inclusive submersos. Visual e com equipamentos.
	Teste Menor	3 anos ou quando há eventos extremos	Verificação de segurança e verificação de danos e defeitos conhecidos
CANADÁ	Detalhada	2 anos, em todas as pontes	Verificação profunda de todos os componentes da estrutura
		Anual em pontes móveis	
	Geral	2 anos em todas as pontes (exceto pontes móveis)	Inspeção visual da estrutura e/ou seus componentes
	Inspeção de manutenção	Mensal	Inspeção visual para fins de manutenção programada
	Inspeção embaixo d'água	4 anos	Pilares ou fundações submersas
	Inspeção de componentes especiais	Anual em pontes móveis	Inclui inspeção em componentes mecânicos, elétricos, hidráulicos
	Inspeção de monitoramento	Conforme necessidade	Inclua observações no local e/ou medições de campo em componente deficiente
	Especial	Conforme necessidade	Inspeção visual não programada que deve ser realizada durante ou imediatamente após um evento significativo
	Inspeção de condição	Conforme necessidade	Avaliação de capacidade de carga
Inicial	Inspeção de todos os detalhes	No final do período de garantia de manutenção (normalmente após o primeiro ano de serviço)	

A norma brasileira NBR 9452 (ABNT, 2016) preconiza que a coleta de dados em inspeções deve possibilitar um diagnóstico e prognóstico da estrutura em termos de segurança estrutural, funcionalidade e durabilidade. Em termos estruturais, devem ser seguidos os parâmetros de estabilidade e capacidade portante referentes aos estados limites últimos e de

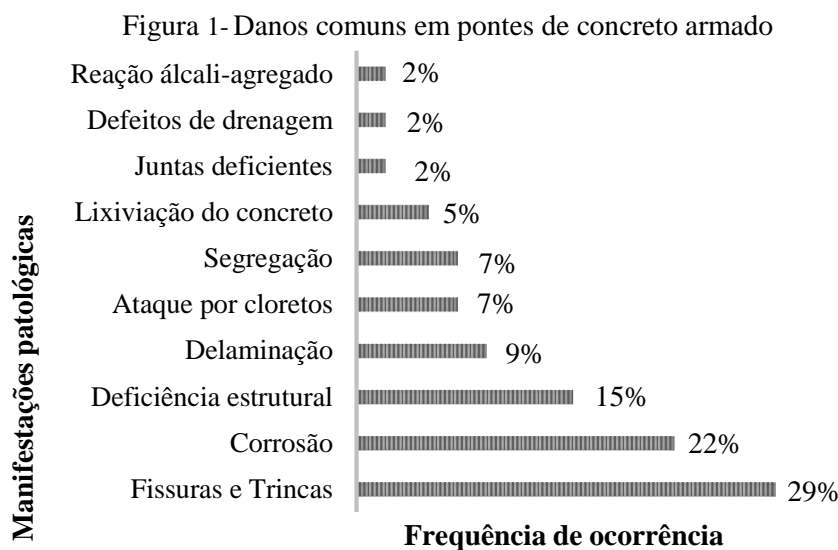
utilização prescritos pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Os parâmetros funcionais devem assegurar que os elementos da ponte apresentem geometria adequada, garantindo conforto e segurança aos usuários. Com a durabilidade associa-se o desempenho de serviço da estrutura durante sua vida útil, com parâmetros vinculados à resistência da estrutura contra os ataques de agentes agressivos.

Em unanimidade, em seu procedimento, as inspeções consistem em uma ferramenta para cadastro e avaliação de obras. Como medida de avaliação, os inspetores atribuem uma nota para cada elemento, a fim de caracterizar a gravidade dos problemas levantados e, a partir disso, determinar os eventos de correção. Essas informações auxiliam a tomada de decisão de técnicos e gestores quanto às oportunidades com melhor benefício/custo para manutenção, restauração ou reconstrução das pontes. Nesse âmbito, para que o escopo das inspeções seja atingido é importante que a prática seja implantada na rotina de gerenciamento de pontes e que sejam cumpridos o planejamento, a execução e os prazos entre cada vistoria.

2.2 Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado

Segundo Hiasa et al. (2018), nos Estados Unidos, 93% dos tabuleiros de pontes (346 km² de 371 km²) são feitos de concreto. No Brasil, especificamente no estado do Rio Grande do Sul, segundo levantamento feito pela Superintendência de Obras de Arte Especiais (SOA) do Departamento de Estradas e Rodagens (DAER-RS, 2018), atualizado no início do ano de 2018, das 1.545 obras de arte documentadas no estado, 1.413 são de concreto, ou seja, 91,45% do total. Segundo Andrade Filho (2008), a preferência pelo concreto armado na execução de estruturas é justificada pela versatilidade executiva e alto desempenho estrutural do material, aliado a um baixo custo relativo.

Entretanto, a durabilidade do concreto armado é constantemente colocada à prova, visto que estruturas com pouca idade comumente apresentam manifestações patológicas. A Figura 1, produzida de acordo com a revisão de Wajdowicz et al. (2016), mostra as manifestações patológicas que são frequentemente registradas em pontes e viadutos de concreto armado, bem como sua frequência de manifestação.



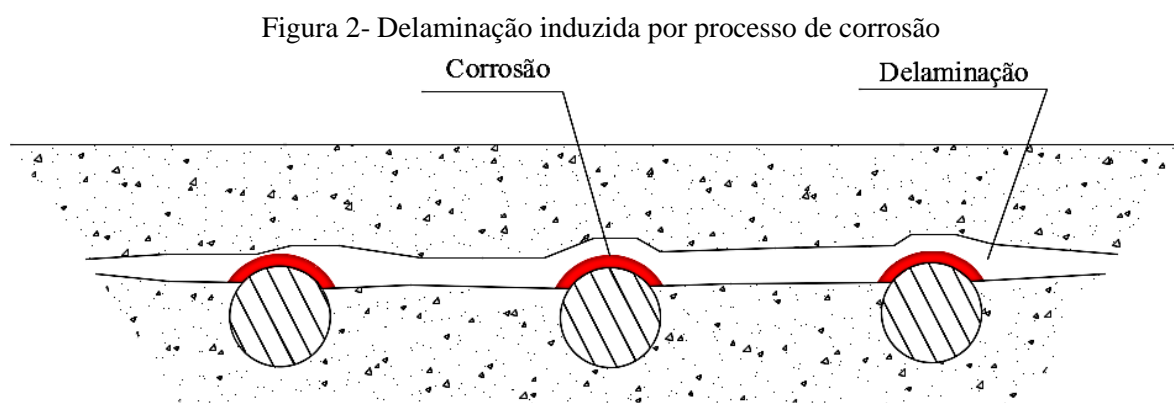
Fonte: Adaptado de Wajdowicz et al. (2016)

Obras de arte especiais apresentam anomalias que podem ser geradas pelos materiais que as constituem e técnicas construtivas, além de possíveis incidentes e intempéries que agem ao longo do tempo, como por exemplo as cheias. Para assegurar uma maior vida útil com bom desempenho e segurança é indispensável um programa de gestão, com avaliações e manutenções, a fim de identificar e corrigir possíveis danos e falhas (VITÓRIO, 2002). As manifestações patológicas simples, cujo diagnóstico é evidente, admitem a criação de um padrão de ocorrência e soluções descomplicadas, sem necessidade de conhecimento aprofundado. Porém, sistemas patológicos complexos requerem análise diferenciada e com um maior nível de detalhe, pois não são alcançados por mecanismos tradicionais de inspeção. Para esses sistemas, exige-se conhecimento na área e ferramentas que obtenham uma gama maior e mais profunda de informações (SOUZA; RIPPER, 1998).

Manifestações patológicas nas estruturas de concreto resultam da combinação de fatores internos e externos à estrutura, juntamente com descuidos na hora do projeto, execução, inspeção e manutenção. Estas falhas ou danos fazem com que a estrutura funcione com um desempenho abaixo do que foi projetada, situação que se agrava continuamente se não for solucionada. A cultura de projetistas e executores em considerar a resistência mecânica como principal critério de concepção e subestimar questões que envolvem a durabilidade e controle de execução configura uma das principais causas de deterioração prematura de estruturas de concreto armado (ISAIA, 2011). O conhecimento das origens, formas de manifestação e consequências de sistemas de degradação das estruturas precisa ir além da identificação e

tratamento das anomalias: deve estar presente na concepção, projeto de estruturas e na própria formação do engenheiro civil (SOUZA; RIPPER, 1998).

Dentre as inúmeras manifestações patológicas existentes em estruturas de concreto armado, a delaminação é um dos defeitos mais críticos e difíceis de inspecionar. Com o fenômeno de corrosão, os óxidos e hidróxidos passam a ocupar um volume maior que o aço original ocupava, ocorrendo um aumento de tensões no interior do concreto que tende à expansão. Com isso, ocorre a delaminação do concreto, que consiste na ruptura (ou destacamento) da ligação entre o reforço de aço e o concreto, criando vazios abaixo da superfície do concreto (LOTTERMANN, 2013), conforme visto na Figura 2.



Fonte: Adaptado de Gheitasi e Harris (2015)

Delaminações normalmente ocorrem em áreas próximas à superfície, acima das camadas de armadura. Como se trata de um dano com padrão aleatório e irregular, configura uma das manifestações patológicas mais complicadas em estruturas de concreto armado. Sua ocorrência não depende somente de questões ambientais, ao passo que varia de acordo com a espessura do cobrimento de concreto da estrutura, diâmetro e espaçamento das armaduras. Quando não controlada, chega a superfície causando o deslocamento do concreto em lajes, vigas ou pilares em funcionamento (GHEITASI; HARRIS, 2015). Apesar de não causar o colapso da estrutura, prejudicam a funcionalidade, durabilidade e aparência da estrutura, além de oferecer perigo ao trânsito de veículos e pedestres, principalmente em viadutos e passarelas.

Além disso, como trata-se de um defeito no interior do concreto, sua detecção em inspeções é complexa, visto que em inspeções visuais o olho humano normalmente não alcança sua ocorrência. Atualmente delaminações são inspecionadas com martelos de som ou arrastar de correntes, onde a porção de concreto sob uma área com presença de delaminação produz som diferente de uma porção de concreto sólida. Porém estes métodos exigem contato com a estrutura, necessitando grande quantidade de tempo e trabalho para inspeção, além da

necessidade de que as linhas de tráfego sejam fechadas. Neste quesito, a termografia infravermelha apresenta potencial na identificação de danos subsuperficiais em pontes de concreto armado de maneira rápida e sem contato com a estrutura, conforme observado em estudos feitos nos últimos anos, detalhados no item 2.7 deste trabalho e em estudo experimental, numérico e estatístico abordado nesta pesquisa.

2.3 Ensaios não destrutivos

O desempenho de uma estrutura depende diretamente da integridade dos elementos que a compõem, de modo que estes elementos devem ser impostos ao mínimo de intervenções possíveis com a estrutura em funcionamento. Nessa perspectiva, o uso e a validação de ensaios não destrutivos (END) tem sido cada vez mais recomendado para inspeções, ao passo que estes representam uma forma rápida e eficaz de inspecionar a estrutura sem interromper e nem prejudicar seu funcionamento.

Existem diversos tipos e equipamentos de ensaios não destrutivos que abrangem vários aspectos do concreto armado, como resistência, permeabilidade, integridade, deformação, tensões e ataques químicos (RAIKAR, 2017). Muitos técnicos, gestores e construtores ainda não reconhecem a importância dos END, pois existem poucos órgãos públicos ou empresas que dispõem da gama completa de equipamentos para análise de estruturas, especificamente pontes. Os equipamentos são custosos e precisam de um valor presente de investimento grande, em especial aqueles com sensoriamento remoto. Porém, seu auxílio técnico e preciso no levantamento de dados pode compensar rapidamente o investimento feito, quando, por otimizar procedimentos e análises, gera economia de recursos destinados à inspeção, manutenção e reabilitação de pontes.

No âmbito de obras de arte especiais, os ensaios não destrutivos são utilizados sobretudo nas verificações relacionadas às estruturas já vistoriadas que apresentam algum tipo de dano incomum, e não como parte integrante do programa de inspeção. Entretanto tecnologias de avaliação não destrutivas, como a termografia infravermelha, têm se mostrado eficazes na identificação de danos, especialmente aqueles que não podem ser detectados visualmente (YEHIA et al., 2007).

O Quadro 2 apresenta brevemente os ensaios não destrutivos mais usados para estruturas de concreto armado, bem como suas principais características.

Quadro 2- Principais ensaios não destrutivos para concreto

ENSAIO	DESCRIÇÃO
Inspecões Visuais	<p>Princípio: Dados levantados visualmente pelo inspetor.</p> <p>Vantagens: Método antigo, já estabelecido e acessível para a maioria dos inspetores.</p> <p>Limitações: Certo grau de subjetividade. São, em sua grande maioria, qualitativos.</p>
Emissões acústicas	<p>Princípio: Uso de ondas transientes, geradas quando o material é submetido a tensões mecânicas, detectadas por sensores conectados à superfície da estrutura.</p> <p>Vantagens: Capaz de detectar defeitos e localizá-los.</p> <p>Limitações: Custo alto do equipamento, necessidade de carregamento da estrutura e instalação de sensores.</p>
Resistividade	<p>Princípio: É medida por meio de eletrodos, inseridos em pequenos orifícios na superfície, seguido por passagem de uma corrente alternada por eles.</p> <p>Vantagens: Equipamento barato e fácil de operar, resultados rápidos.</p> <p>Limitações: Confiabilidade baixa quando a umidade é alta, necessita calibragem do equipamento e bom contato do eletrodo com a superfície para ter bom funcionamento. Presença de armaduras afeta o resultado.</p>
Pacômetro	<p>Princípio: Presença de aço afeta o campo magnético embutido no equipamento, apontando localização das armaduras.</p> <p>Vantagens: Potencial para detecção e quantificação de armaduras</p> <p>Limitações: Alcance máximo, aproximadamente, 120mm. Não indica qualidade do concreto, nem proteção proporcionada ao reforço.</p>
Potencial de corrosão (half-cell)	<p>Princípio: É a medida do potencial elétrico da armadura em relação a um eletrodo de referência (meia-célula), instalado na superfície do concreto.</p> <p>Vantagens: Equipamento portátil, resultados rápidos e confiáveis.</p> <p>Limitações: Não fornece dados sobre a velocidade de corrosão, apenas de seu potencial. Requer acesso físico às barras de aço.</p>
Endoscopia	<p>Princípio: Um equipamento com fibras ópticas flexíveis, lentes e sistemas de iluminação é inserido em furos em elementos de concreto sob investigação para examinar sua condição.</p> <p>Vantagens: Ferramenta para inspeção de compartimentos com dificuldade de acesso.</p> <p>Limitações: Ensaio semi-destrutivo, por necessitar a realização de um pré-furo.</p>
Radiografia/Gamagrafia	<p>Princípio: Fontes radioativas são utilizadas na superfície do concreto para obter uma imagem radiográfica, que indica a posição e a natureza dos elementos imersos no mesmo, devido às suas diferentes densidades.</p> <p>Vantagens: Equipamento simples de operar, relativamente barato e o ensaio é aplicável a uma ampla gama de materiais.</p> <p>Limitações: Dificuldade de posicionar o equipamento em estruturas altas, irregulares. Emite radiação.</p>
GeoRadar - Radar de penetração no solo	<p>Princípio: Ondas se propagam através do material até que uma característica elétrica diferente é encontrada, parte da onda é refletida e permite o desenho de um perfil para cada característica de material.</p> <p>Vantagens: Rápido para inspeções em grandes áreas, sem contato, e localiza a armadura, profundidade do cobrimento, vazios, rachaduras, diferença de densidade de materiais e variação de umidade.</p> <p>Limitações: Aumento da profundidade prejudica resultados, antieconômico para pequenas áreas.</p>
Medidor de umidade com nêutrons	<p>Princípio: Hidrogênio retarda a dissipação de nêutrons. Esta dissipação é medida, microscopicamente, e quanto maior o espalhe de volta dos nêutrons, maior a umidade do concreto.</p> <p>Vantagens: Equipamento portátil, que fornece resultado rápido.</p> <p>Limitações: Mede apenas o teor de umidade da camada superficial (50 mm), emite radiação e os resultados muitas vezes tornam-se imprecisos porque os átomos de hidrogênio dos materiais de construção são medidos junto aos de água.</p>
Dispositivos de arrancamento (pull-out)	<p>Princípio: Perfuração de um buraco no qual uma âncora roscada padrão ou cunha é colocada. Este dispositivo é então puxado até que promova o arrancamento do concreto. Com a ajuda de gráficos de calibração, a força máxima de arrancamento é correlacionada com a resistência do concreto.</p> <p>Vantagens: O equipamento é leve, barato e a medida pode ser feita rapidamente, com resultado instantâneo e boa precisão</p> <p>Limitações: Ensaio semi-destrutivo e de superfície.</p>

Quadro 2- Principais ensaios não destrutivos para concreto

(cont.)

ENSAIO	DESCRIÇÃO
Esclerometria	<p>Princípio: Consiste em um êmbolo de metal, ligado à uma extremidade do aparelho, a qual é impactada contra a superfície de concreto, enquanto a extremidade livre é atingida por uma mola massa que repercute em uma escala graduada. Fornece a dureza superficial do concreto e a relaciona com a resistência a compressão do concreto.</p> <p>Vantagens: Permite também avaliar a uniformidade e qualidade do concreto.</p> <p>Limitações: Superficialidade.</p>
Sonda de penetração (Windsor)	<p>Princípio: Consiste em disparar uma sonda padrão no concreto, com um cartucho padrão. A extensão da penetração é medida e está relacionada com a resistência do concreto.</p> <p>Vantagens: Equipamento de fácil manuseio, não requer preparação da superfície antes do teste. Bom ensaio para determinar a qualidade do concreto em campo.</p> <p>Limitações: As condições de superfície, umidade e temperatura ambiente interferem no resultado. O ensaio requer uma considerável espessura de penetração e uma distância mínima da borda do elemento.</p>
Ultrassom	<p>Princípio: Utilizado para mensurar a velocidade de propagação de ondas longitudinais ao longo de um componente de concreto. Determina a variabilidade e qualidade dos materiais e misturas do concreto através da variação da velocidade de pulso.</p> <p>Vantagens: A extensão de defeitos tais como vazios, delaminação, rachaduras pode ser identificada e monitorada. Pode também ser utilizado para examinar concreto danificado pelo fogo. Determina localização e profundidade de danos.</p> <p>Limitações: Contato com a superfície, limpa e preparada. Necessário conhecimento e habilidade para análise dos resultados, a presença de umidade e das armaduras podem interferir no resultado. Não fornece informações precisas sobre a forma do defeito.</p>
Eco impacto	<p>Princípio: Ondas de compressão pulsadas são induzidas em materiais através de um impacto elástico e, quando refletidas, são detectados por um acelerômetro de mão.</p> <p>Vantagens: Equipamento portátil, simples e com custo relativamente baixo. Permite a tomada de fotografias e a estimativa de localização e quantificação de danos internos.</p> <p>Limitações: Necessita limpeza da superfície, calibração e possui interpretação de resultados relativamente complexa.</p>
Medida de carbonatação	<p>Princípio: Com a realização de um furo no concreto, uma solução de fenolftaleína é borrifada no furo e observa-se a sua mudança de cor. Se a superfície permanecer incolor, significa que está carbonatada, se apresentar coloração rosa/violeta significa que é saudável.</p> <p>Vantagens: Pode-se medir a área atingida pela manifestação patológica e planejar a sua recuperação.</p> <p>Limitações: Trata-se de um método semi-destrutivo, pela necessidade da realização do furo. Esta perfuração precisa ser planejada, a fim de não danificar as armaduras.</p>
Martelo de mão e arrastar de correntes	<p>Princípio: Concreto sobre defeitos subsuperficiais provocam sons diferentes do que concreto sem defeitos, quando o ruído é estimulado por estes equipamentos.</p> <p>Vantagens: Simples, de baixo custo.</p> <p>Limitações: Precisa interromper o tráfego, subjetividade, extenso trabalho a campo.</p>
Análise termográfica	<p>Princípio: Uma câmera de varredura infravermelha é usada para detectar variações de emissão de radiação de uma superfície. Contrastes térmicos surgem pela diferença na temperatura da superfície entre o concreto sem defeitos e danificado, causados pelas diferentes propriedades de transferência de calor.</p> <p>Vantagens: Portátil, rápido, sem contato. Descontinuidades internas podem ser localizadas.</p> <p>Limitações: Equipamento (câmera térmica) caro, interferência de fatores externos.</p>

2.4 Termografia infravermelha

Termografia, decomposta como palavra, significa “escrever com calor”, da mesma maneira que fotografia significa “escrever com luz”. A origem da termografia infravermelha data do século passado, empregada primordialmente em âmbito militar, para detectar possíveis

alvos inimigos durante confrontos em guerras. Deste tempo até hoje o método foi aperfeiçoado e é aplicado em diversas áreas, como indústria, medicina e engenharia (MILANEZ, 2017).

Trata-se de uma técnica que permite a visualização da temperatura superficial de um objeto sem contato direto com o mesmo. Seu mecanismo funciona através do registro de sinais eletromagnéticos, devido à emissão de calor em forma de radiação infravermelha, não vista naturalmente pelo olho humano. No entanto, este tipo de radiação pode ser reconhecido por câmeras infravermelhas, que realizam a transmissão simultânea destas informações de radiação aos seus microprocessadores, devolvendo estes dados de um modo que possa ser visível ao olho nu. Este é o princípio da técnica, que detecta através da radiação emitida a temperatura superficial de objetos sob análise ou inspeção. (KERSUL, 2014). A técnica termográfica é capaz de reconhecer a radiação emitida pela maioria dos objetos ao nosso redor. Segundo Çengel e Ghajar (2012), radiações emitidas por superfícies com temperatura menor que 800 graus Kelvin (K), equivalente a 526,85 graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), estão quase inteiramente inseridas na faixa do infravermelho.

A diferença de temperatura entre regiões distintas de um corpo pressupõe uma transmissão espontânea de energia em busca do equilíbrio térmico, que pode se dar através de três mecanismos: radiação, convecção e condução. O calor chega até o objeto sólido por meio de radiação e convecção, externamente, e se espalha pelo material através da condução. Na maioria das situações práticas, a transferência de calor se dá pelos três modos simultaneamente, em diferentes níveis (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). A termografia infravermelha registra a parcela de transferência de calor emitida por um corpo através da radiação térmica. A seguir são vistos conceitos relacionados à radiação térmica que auxiliam na compreensão da transferência de calor, principalmente no que tange a termografia infravermelha.

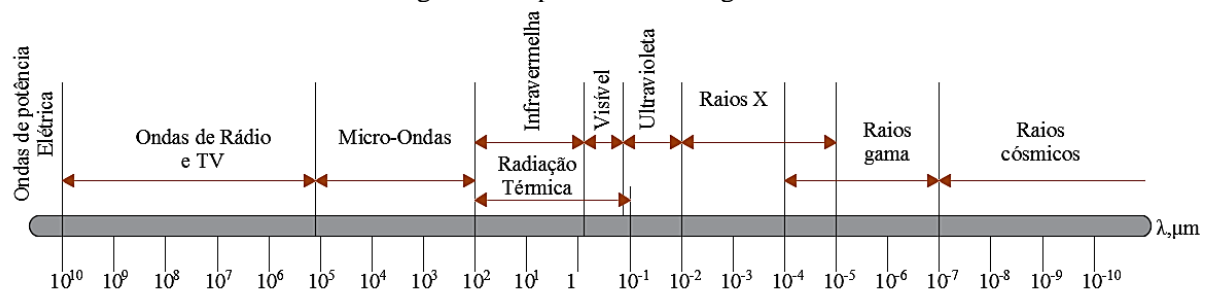
2.4.1 Radiação térmica: conceitos fundamentais

A natureza composta da luz branca foi demonstrada pela primeira vez por Newton, quando decompôs a luz solar usando um prisma. A imagem alongada e colorida pela luz do Sol recebeu o nome de espectro. Em 1864, o físico James Clerk Maxwell estabeleceu a teoria da radiação, postulando que campos elétricos e magnéticos (ondas eletromagnéticas) são criados a partir de cargas aceleradas ou variações de correntes elétricas. Primordialmente, as ondas eletromagnéticas foram demonstradas em 1887, por Heinrich Hertz (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A radiação configura o mecanismo de transferência de calor que não necessita de um meio físico para se dissipar. A energia é transportada por meio de ondas eletromagnéticas, através da modificação das configurações dos átomos e moléculas que a constituem, onde uma fração do calor proveniente de um corpo de maior temperatura é transferido para um corpo de temperatura mais baixa. Este calor é absorvido em quantidade relativa às características de superfície receptora e, com existência de diferença de temperatura no meio, uma quantidade deste calor é devolvido novamente ao ambiente em forma de radiação (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). A radiação é continuamente emitida por todos os corpos com temperatura superior ao zero absoluto em escala Kelvin (-273,15 °C). Assim, tudo ao nosso redor desde móveis, estruturas, pessoas e animais emitem e absorvem radiação constantemente. A intensidade desta radiação depende da capacidade de emissão do corpo e da temperatura do objeto, motivo pelo qual corpos que estão em uma mesma temperatura ambiente podem apresentar emissões de radiações diferentes, devidos suas propriedades térmicas.

O espectro eletromagnético (Figura 3) representa os tipos de radiação eletromagnéticas, classificadas de acordo com seu comprimento de onda (λ). A unidade de medida do comprimento de onda é o micrômetro (μm), onde 1 μm equivale a 10^{-6} metros.

Figura 3- Espectro eletromagnético



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar (2012)

A radiação térmica constitui o intervalo de comprimento de ondas que se estende desde 0,1 até 100 μm . A totalidade da parcela de radiação eletromagnética infravermelha, visível e uma pequena parcela da radiação ultravioleta configuram a radiação térmica, que difere das demais radiações eletromagnéticas, como raio gama, raio x e micro-ondas, por estas não se relacionarem com a temperatura. A faixa de radiação visível (luz) compreende comprimentos de onda que vão de 0,38 a 0,70 μm , conforme visto na Figura 3, limitada entre as faixas de radiação infravermelha e ultravioleta.

Uma explicação prática do comprimento de onda e irradiação pode ser vista com o Sol, que possui uma temperatura superficial de aproximadamente 5.800 K e sua radiação térmica

emitida possui comprimento de onda relativamente curto, ou seja, dentro da faixa visível ao olho humano (SPEAKMAN; WARD, 1998). Os objetos ao nosso redor aquecem-se absorvendo radiação de onda curta e refletem a luz em um comprimento de onda parecido com a luz do Sol, motivo pelo qual conseguimos vê-los. No entanto, são consideravelmente mais frios que a superfície do Sol, resultando assim na emissão de radiação em comprimentos de onda mais longos, que não são visíveis ao olho humano, porém visíveis na faixa de radiação infravermelha do espectro eletromagnético.

2.4.1.1 Emissividade

Emissividade diz respeito a capacidade de um objeto emitir radiação eletromagnética. Para o conhecimento da quantidade máxima de radiação que uma determinada superfície pode emitir em uma determinada temperatura é preciso considerar como base um objeto padrão com as quais as superfícies verdadeiras podem ser comparadas. Os estudos de radiação partem da emissividade de um objeto idealizado, com uma temperatura padrão, denominado corpo negro. Este objeto é um absorvedor perfeito de radiação e também um emissor perfeito, sem refletividade nenhuma, cuja emissão depende apenas da sua temperatura. Com isso, o valor da emissividade de um corpo negro (ϵ_b) é sempre igual a 1, pois independentemente da direção e do comprimento de onda, ele absorve e emite toda a radiação que sobre ele incide (MORAES; VAN LIER, 2010). Descrita pela Lei de Stefan-Boltzmann, a energia de radiação emitida por um corpo negro é dada por:

$$Q_b = \sigma \cdot T_s^4 \quad \text{Equação 1}$$

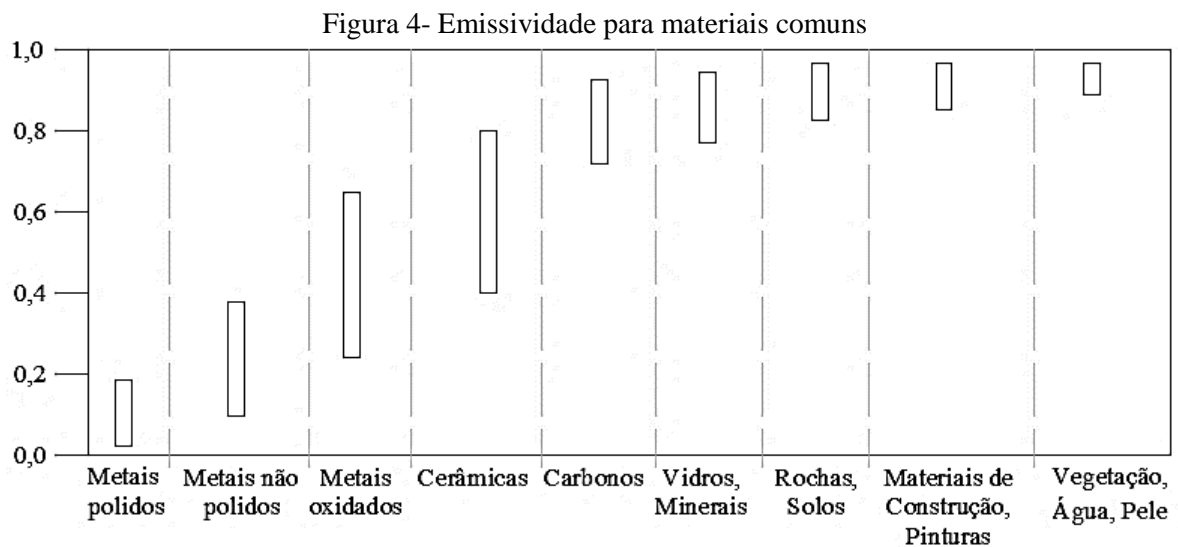
Onde Q_b é energia de radiação emitida pelo corpo negro (W/m^2 por unidade de tempo), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$), e T_s é a temperatura absoluta (K). A emissividade dos demais corpos reais (ϵ) é dada pela razão entre a radiação que este emite em uma determinada temperatura em relação à emissão de radiação do corpo negro na mesma temperatura. Logo, tem-se a seguinte equação para energia de radiação emitida para corpos reais (Q):

$$Q = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad \text{Equação 2}$$

Como os materiais normais não absorvem nem emitem todo o calor que neles atuam, o valor de sua emissividade sempre menor que 1. Isso porque além de absorver, estes são capazes de transferir e/ou refletir uma parte da energia que sobre eles incidem (MILANEZ, 2017).

Ao contrário do corpo negro, a emissividade de superfícies reais não é constante, sendo dependente da temperatura da superfície, do comprimento de onda incidente e da direção das radiações emitidas. No entanto, a dependência do valor de emissividade da direção e comprimento de onda torna os cálculos de radiação bastante complexos, sendo permitido que aproximações sejam feitas sem causar grandes prejuízos aos resultados de análise. Dessa forma, superfícies opacas normalmente são consideradas difusas, ou seja, assume-se que possuem propriedades independentes da direção da radiação refletida, e cinzas, por suas propriedades independentem do comprimento de onda. Ademais, em levantamentos termográficos regulares a partir de termografia passiva, os objetos não sofrem grande variação de temperatura. Dessa forma, para superfícies tomadas como cinzas e difusas, é comum a adoção de um valor de emissividade constante (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Intervalos típicos de valores de emissividade de materiais comuns estão listados na Figura 4. Metais polidos, com superfícies lisas possuem emissividade baixa, menores do que 0,2. Não metais como por exemplo o concreto, rochas e o solo, possuem emissividade alta, que varia entre 0,80 e valores próximos a 1.



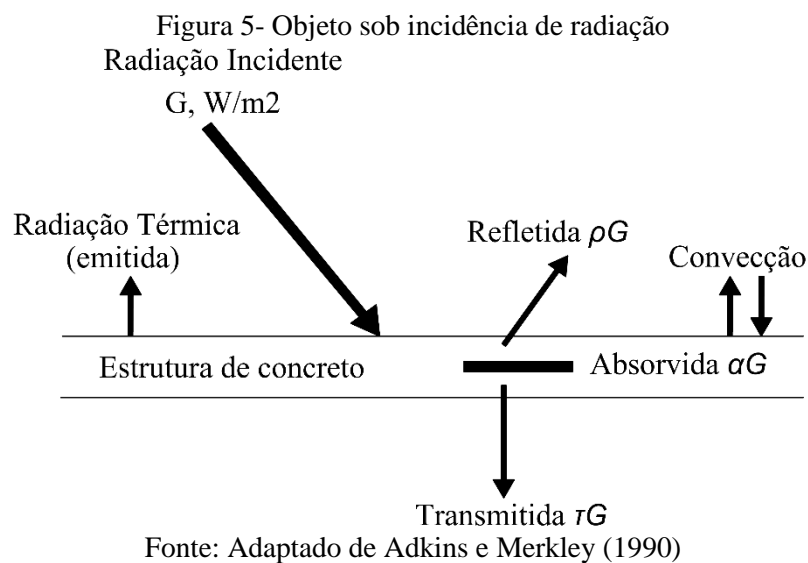
Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar (2012)

Em geral, recomenda-se que ensaios para determinação de emissividade sejam conduzidos em materiais sob estudo termográfico, pois a adoção de valores de emissividade relatados na literatura não abrange totalmente as condições variáveis de superfície como coloração, rugosidade, limpeza, oxidação, entorno e inclinação do elemento. Todos esses fatores podem influenciar no valor da emissividade e, conseqüentemente, na precisão do

levantamento. No Brasil, a norma que dita o procedimento para obtenção da emissividade de superfícies é a NBR 16485 (ABNT, 2016).

2.4.1.2 Absorção, reflexão e transmissão

Quando a radiação alcança a superfície, parte da energia é absorvida, parte é refletida e, dependendo do material em questão, parte é transmitida (ADKINS; MERKLEY,1990), conforme visto na Figura 5.



As propriedades de absorver, refletir e transmitir uma parcela da irradiação incidente chamam-se, respectivamente: absorvidade α , refletividade ρ e transmitividade τ . Considerando a quantidade de radiação incidente $G=1$, as demais porções terão valores sempre menores do que 1 e, segundo a primeira lei da termodinâmica, a soma da energia absorvida, refletida e transmitida resultará no total de radiação incidente:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad \text{Equação 3}$$

O comportamento das superfícies de elementos construtivos em relação à radiação térmica pode ser diferente dependendo do comprimento de onda e da superfície receptora (ADKINS; MERKLEY,1990). Para a maioria dos problemas aplicados, corpos considerados opacos, como o concreto, apenas absorvem e refletem a radiação, possuindo sua transmitância nula ($\tau=0$). Logo:

$$\alpha + \rho = 1 \quad \text{Equação 4}$$

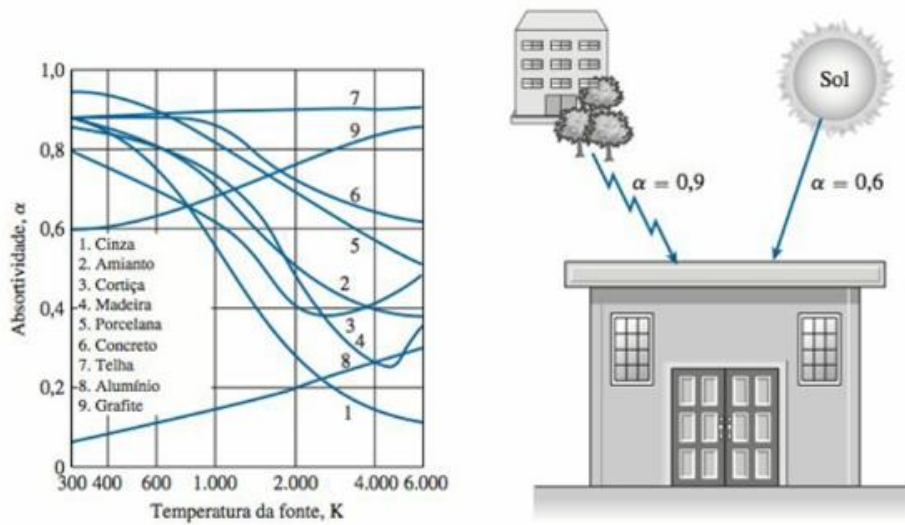
Sobre propriedades de superfície, a refletividade apresenta comportamento singular devido à sua natureza bidirecional, que depende não somente da direção do feixe de radiação incidente como também da direção de reflexão. No entanto, não existem dados em detalhe sobre o comportamento da refletividade para cada tipo de superfície, sendo que na prática, por simplicidade, considera-se que as superfícies refletem a radiação incidente em duas possíveis maneiras: especular, quando o ângulo de reflexão é igual ao ângulo incidente, ou difusa, onde os raios são refletidos igualmente entre todas as direções. As superfícies polidas possuem comportamento próximo à superfície especular enquanto superfícies irregulares tem tendência difusa (LAMBERTS et al., 2014).

Segundo a Lei de Kirchoff, para um objeto em situação de equilíbrio térmico, a capacidade de absorver energia incidente é igual a capacidade deste mesmo objeto de emitir energia, na mesma temperatura e para um determinado comprimento de onda. Porém, segundo Çengel e Ghajar (2012), esta igualdade depende da premissa de que a temperatura da superfície do objeto seja igual a temperatura da fonte de radiação. No caso da energia solar, portanto também da termografia infravermelha passiva, esta premissa não é atendida pois o Sol encontra-se milhares de graus Kelvin acima da temperatura dos objetos na superfície terrestre. Ainda, segundo Çengel e Ghajar (2012, p.711):

[...] a distribuição espectral da radiação solar incidente é muito diferente da distribuição espectral das radiações emitidas pelas superfícies, já que a primeira está concentrada na região de ondas curtas, e a segunda, na região do infravermelho. Portanto, as propriedades de radiação das superfícies são muito diferentes para radiações incidentes e emitidas[...] considerando-se que as superfícies têm dois conjuntos de propriedades: um para a radiação solar e outro para a radiação infravermelha na temperatura ambiente.

Dessa forma a porção de energia absorvida difere da porção de energia emitida, pois a parcela de absorção do objeto leva em conta a temperatura da fonte de radiação e a emissividade leva em conta os parâmetros do ambiente e da temperatura de superfície. O concreto, por exemplo, possui emissividades na faixa de 0,85-0,98 (Figura 4) e absorvidade de aproximadamente 0,6 quando se considera como fonte de radiação o Sol (Figura 6).

Figura 6- Valores de absorptividade para materiais comuns



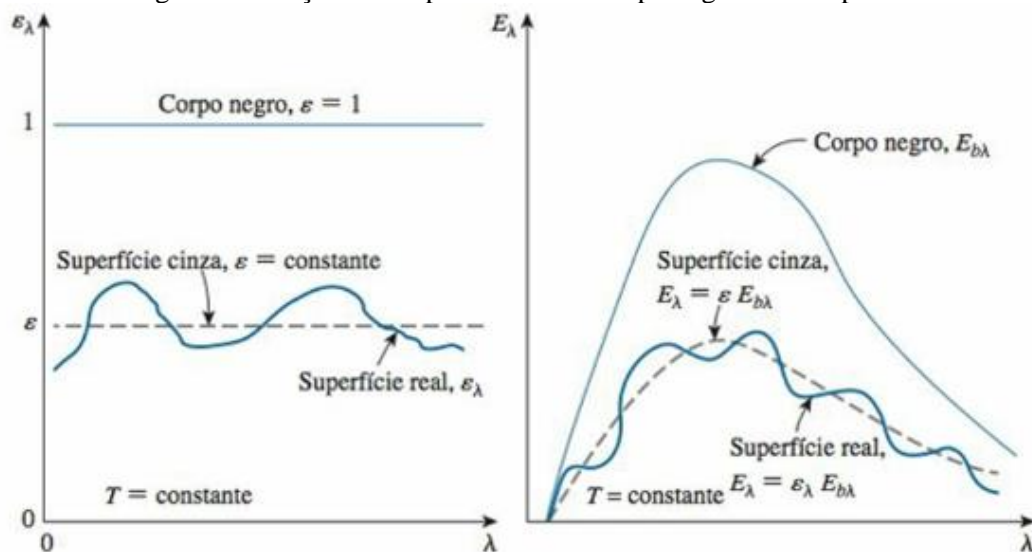
Fonte: Çengel e Ghajar (2012)

Segundo Moreira (2016), de maneira geral, exceto em estudos com alto nível de detalhe, os corpos reais são aproximados por corpos cinzas, para tornar o cálculo mais simplificado. Estes atendem a seguinte relação:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\lambda} = \text{constante} \text{ e } \alpha = \alpha_{\lambda} = \text{constante} \quad \text{Equação 5}$$

O efeito da aproximação da emissividade e da potência emissiva do corpo cinza ao corpo real, juntamente com a explanação dos mesmos parâmetros para o corpo negro, pode ser visto na Figura 7.

Figura 7- Relações entre parâmetros do corpo negro e de corpos reais

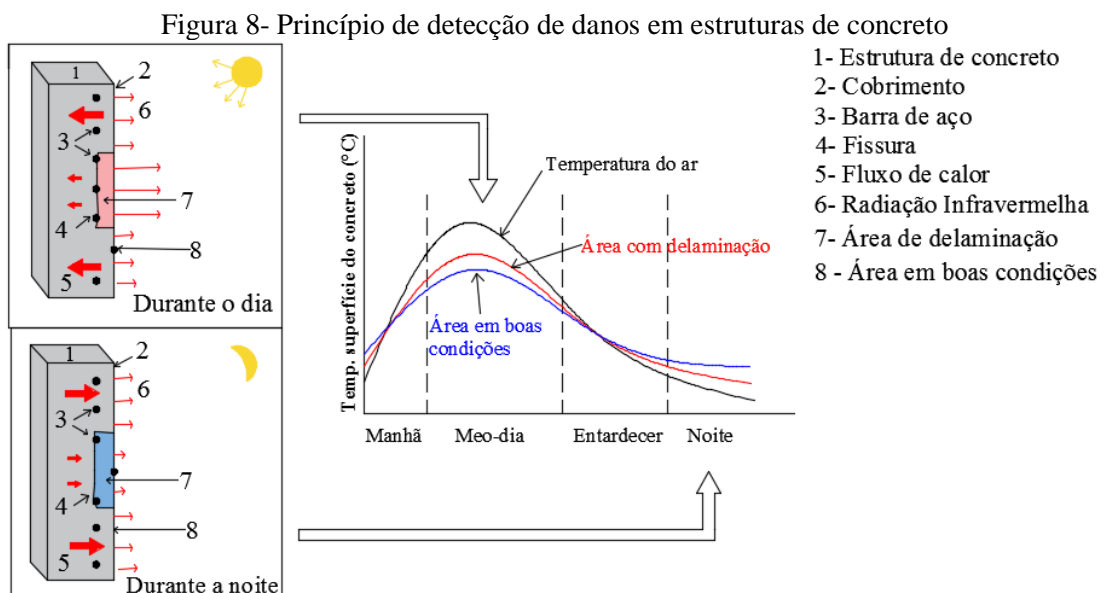


Fonte: Çengel e Ghajar (2012)

Nota-se que o valor de emissividade do corpo real é sempre menor do que 1, dado pela relação entre as potências emissivas do corpo real e do corpo negro em uma mesma temperatura. O poder emissivo do corpo negro segue a Lei de Stefan-Boltzmann (MOREIRA, 2016). Segundo Çengel e Ghajar (2012), o total de radiação emitida pelo corpo real deve ser equivalente ao total de radiação emitido pela superfície cinza, em temperaturas equivalentes. Isso nos leva à afirmação de que as áreas sobre as curvas de emissão de ambos devem ser iguais.

2.4.2 Uso da termografia para inspeção de pontes de concreto armado

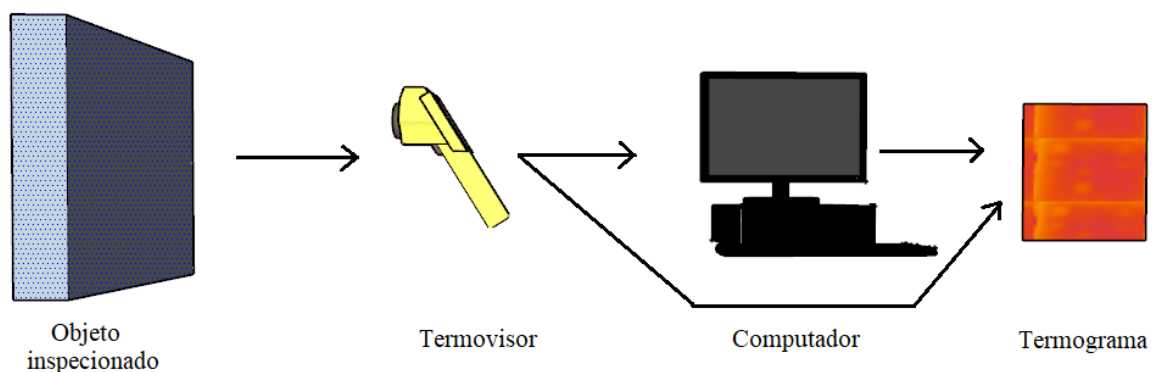
O princípio da inspeção de pontes de concreto armado por termografia infravermelha baseia-se nos processos de transferência de calor que ocorrem no elemento inspecionado que se modificam com a presença de danos como fissuras, vazios e delaminações (DABOUS, 2017). Devido a diferentes propriedades térmicas, uma porção de concreto saudável aquece-se de maneira distinta de uma porção de concreto danificada. Os danos, quando internos à estrutura, geralmente são preenchidos com ar ou água, que têm menor condutividade térmica que o concreto e interrompem o fluxo de calor (MALDAGE, 2001). Isso gera contraste térmico entre estas regiões, que pode ser registrado na superfície do elemento com o uso da câmera térmica, que indica a presença e a posição dos defeitos em seus termogramas. Conforme a temperatura aumenta durante o dia, ou diminui durante o período da noite, as áreas onde o concreto tem menor densidade ou onde os defeitos estão presentes aquecem-se (durante o dia) e resfriam-se (durante a noite) com maior intensidade do que o concreto, conforme visto na Figura 8.



Fonte: Adaptado de Jankö, Březina e Grolek (2017)

A inspeção de anomalias em concreto armado com o uso de termografia infravermelha é feita através de um scanner ou uma câmera térmica, de alta resolução, que determina a distribuição de temperaturas superficiais, registradas por um sensor que reconhece da radiação infravermelha emitida pela superfície. Com o uso do equipamento são produzidas imagens que podem visualizadas no termovisor e/ou transferidas para computadores regulares, onde os resultados podem ser analisados (Figura 9). Grande parte das câmeras térmicas comercializadas atualmente são compactas, permitindo que sejam usadas em automóveis, celulares e drones.

Figura 9- Procedimentos e equipamentos para inspeção termográfica



Para existir fluxo de energia térmica para o levantamento termográfico é necessário que exista uma fonte de calor. Em ambientes externos, a energia solar é a principal fonte de calor. Quando esta é utilizada, atua-se no campo da termografia passiva. Quando o aquecimento ocorre em ambientes internos sem energia solar ou quando necessita-se de um fluxo de calor intenso e concentrado, são utilizadas ferramentas artificiais para geração de calor, como lâmpadas halógenas. Neste caso, a técnica é chamada termografia ativa (MALDAGUE, 2001).

A análise termográfica pode ser feita pelo inspetor apenas de forma visual, diretamente na imagem gerada pela câmera térmica, de modo a determinar a presença de defeitos e sua posição através da identificação de pontos e/ou áreas quentes e frios. Este tipo de análise é chamado de termografia qualitativa. Por outro lado, as imagens termográficas podem ser pós processadas em softwares personalizados para destacar detalhes e quantificar o contraste entre pontos e/ou áreas onde há suspeitas de danos. Este tipo de análise caracteriza-se como termografia quantitativa (VOLLMER; MOLLMANN, 2010).

Alguns países já regulamentaram a utilização da termografia infravermelha para inspeção de edificações, sistemas elétricos, solares, insolação. Para pontes, os Estados Unidos possuem a norma D4788-03 (ASTM, 2013), que regulamenta a inspeção de delaminações em

tabuleiros de pontes de concreto usando termografia infravermelha. A câmera termográfica é montada sobre um veículo e faz o levantamento percorrendo as pistas da ponte, com possibilidade de levantamento de tabuleiros com camadas de asfalto de até 10 centímetros. As superfícies com presença de delaminações e danos aparecem em contraste nos termogramas dos vídeos, configurando áreas superficiais mais quentes durante o dia e mais frias durante a noite.

A norma americana regulamenta que a câmera térmica usada na inspeção de tabuleiros de ponte deve ter sensibilidade de pelo menos 0,2 °C e ser montada no veículo de modo a fazer o levantamento de imagens de, pelo menos, 4,3 metros de largura. As recomendações ditam a retirada de detritos da ponte antes do teste, condições meteorológicas com ausência de chuva nas últimas 24 horas antes do teste, Sol durante o dia da inspeção e um contraste térmico entre áreas sem defeitos e áreas com delaminações de, no mínimo 0,5 °C para indicação conclusiva do dano. A velocidade do vento não deve exceder 30 m/s e, recomenda-se que a temperatura não esteja abaixo de 0 °C, para evitar falsas detecções. Quanto à velocidade do veículo que transporta a câmera, recomenda que não sejam excedidos 16 km/h. Como resultado, a área com danos é fornecida em porcentagem relativa à área total do tabuleiro (ASTM, 2013).

No Brasil existem normas regulamentadoras do uso da termografia infravermelha como ensaio não destrutivo, porém não no âmbito de inspeção de estruturas de concreto. O Quadro 3 resume as normas brasileiras existentes no âmbito termográfico, na data do presente trabalho.

Quadro 3- Normas brasileiras para termografia infravermelha

Número	Título
ABNT NBR 15424:2016	Ensaio não destrutivo-Termografia-Terminologia
ABNT NBR 15572:2013	Ensaio não destrutivo-Termografia-Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos
ABNT NBR 15718:2009	Ensaio não destrutivo-Termografia-Guia para verificação de termovisores
ABNT NBR 15763:2009	Ensaio não destrutivo-Termografia-Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência
ABNT NBR 15866:2010	Ensaio não destrutivo-Termografia-Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos
ABNT NBR 16292:2014	Ensaio não destrutivo-Termografia-Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas
ABNT NBR 16485:2016	Ensaio não destrutivo-Termografia-Medição e compensação da emissividade utilizando câmeras termográficas ou radiômetros
ABNT NBR 16554:2016	Ensaio não destrutivo-Termografia-Medição e compensação da transmitância de um meio atenuante utilizando câmeras termográficas

Os fatores ambientais afetam a medição de temperatura em uma inspeção de ponte de concreto sob aquecimento passivo. Fatores como: intervalo de tempo em que a radiação solar produz aquecimento, quantidade de radiação, ausência ou presença de nuvens que refletem a

radiação infravermelha, temperatura ambiente, pressão atmosférica, velocidade do vento e umidade relativa do ar influenciam na quantidade de radiação incidente e emitida pela superfície de concreto, e conseqüentemente, nos resultados de seu termograma (IAEA, 2002).

Quanto às configurações de inspeção, durante a análise termográfica é importante considerar a localização e a condição de superfície. É importante a visão clara da área a ser medida, direta e sem obstáculos, além da proximidade do elemento inspecionado, visto que o aumento da distância aumenta a atenuação atmosférica da radiação (SANTOS, 2012). A condição de superfície influencia diretamente a emissividade, onde medidas corretas de temperatura requerem ajuste correto da emissividade informada manualmente para a câmera.

Rocha e Póvoas (2017) e Garrido, Laguela e Arias (2018) fizeram uma revisão acerca das metodologias, vantagens e limitações do ensaio de termografia infravermelha para pontes de concreto armado. Como vantagens, apontam ser um método rápido, não destrutivo, que pode ser aplicado em grandes áreas sem necessidade de contato, aumentando a produtividade da inspeção e a segurança para os inspetores, visto que não é necessária uma grande proximidade da estrutura. Além disso, possui instrumentação simples, ao passo para a inspeção são necessários apenas a câmera térmica e uma saída de vídeo para análise e armazenamento dos termogramas. Levando em conta todos esses fatores, os custos de manutenção são reduzidos, uma vez que manifestações patológicas podem ser identificadas antes de possíveis falhas.

Para as limitações os autores da revisão destacam que o equipamento pode ser caro e exigir um investimento inicial alto. A técnica também não é capaz de identificar a profundidade dos danos e, como dito anteriormente, é sensível às condições ambientais e de levantamento. Além disso, as câmeras térmicas apresentam erros de 2% ou mais nas leituras, as imagens normalmente necessitam de tratamento quando em grandes áreas e a interpretação é majoritariamente humana, implicando em subjetividade de resultados.

2.4.3 Fatores potencialmente interferentes em um ensaio termográfico

Apesar de configurar um ensaio não destrutivo com premissas simples de execução, além das condições ambientais e horários de inspeção, alguns fatores podem levar a equívocos durante o levantamento ou a análise de dados. Aspectos como condições de superfície do objeto, presença de interferências externas (sombras, superfícies reflexivas) e configurações de levantamento (emissividade, temperatura refletida, umidade, temperatura ambiente, distância da câmera ao objeto inspecionado) podem exercer influência sobre as medições. Nessas condições, as limitações e características singulares presentes na análise termográfica devem

ser observadas de maneira consistente para que exerçam o mínimo de influência possível sobre a precisão dos resultados.

2.4.3.1 Operador do equipamento termográfico

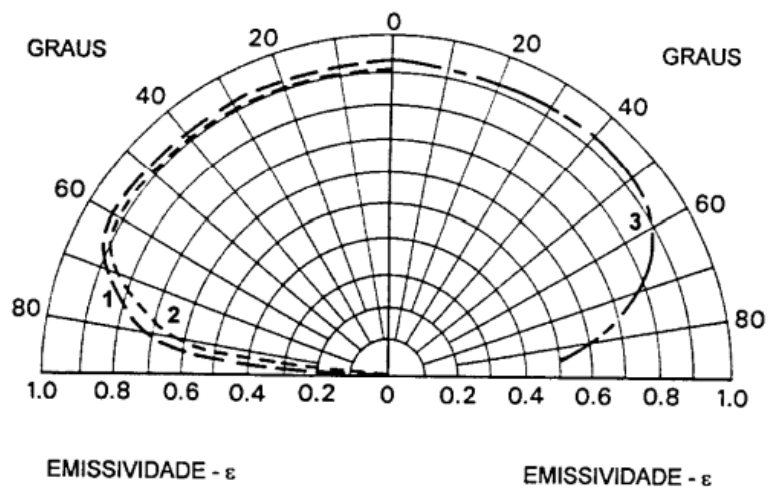
O operador da câmera termográfica deve ter conhecimento sobre radiação térmica, fatores ambientais e transferência de calor, além do entendimento dos equipamentos utilizados e dos termogramas resultantes da técnica. O inspetor deve estar motivado e qualificado para diferenciar uma falha existente de uma falsa anomalia (BRIQUE, 2016). Como orientação e treinamento, é indicado que se siga os procedimentos padronizados das normas pertinentes demonstradas anteriormente no Quadro 3.

2.4.3.2 Emissividade da superfície

Medidas corretas de temperatura exigem o conhecimento sobre o correto valor de emissividade da superfície analisada termograficamente. Esta pode ser determinada através do levantamento paralelo de temperatura da superfície de um material com emissividade conhecida. Com relação à dependência entre o valor de emissividade e a temperatura superficial, a maioria dos materiais construtivos possuem variação de temperatura relativamente baixa (sob aquecimento solar) e alta emissividade, tornando os valores de temperatura medidos por termovisores mais precisos. Exceção deve ser feita aos metais, pois seu valor de emissividade é baixo e cresce com o aumento da temperatura (SANTOS, 2012).

Em referência à variabilidade do valor da emissividade com o ângulo de inspeção, Barreira (2004) discorre que para materiais não metais a variação é praticamente nula com o emprego de ângulos entre 0° e 60° em relação à observação perpendicular do objeto inspecionado. Porém quando este ângulo ultrapassa os 70° a emissividade diminui sucessivamente até alcançar um valor nulo para ângulo de 90° (Figura 10), gerando diferença significativa entre valores reais e medidos.

Figura 10- Variação da emissividade de materiais segundo o ângulo de tomada das fotos em relação à observação perpendicular para: 1) madeira 2) papel 3) vidro



Fonte: Barreira (2004)

Ainda segundo Barreira (2004), para materiais de características metálicas a emissividade é baixa, sem variações notáveis para ângulos de inspeção entre 0° e 40° em relação à observação perpendicular do objeto inspecionado, aumentando para ângulos superiores. No que diz respeito a influência da geometria do objeto, superfícies côncavas tendem a aumentar o valor da emissividade e superfícies convexas a diminuir o valor da emissividade. Além disso, nos metais a presença de oxidação aumenta o poder emissivo da superfície (SANTOS, 2014).

2.4.3.3 Temperatura refletida

A existência de um entorno com a presença de corpos com temperaturas superiores à amostra inspecionada afeta a temperatura levantada pelos termovisores do objeto em estudo, visto que este tende a refletir a radiação emitida por estes corpos que o rodeiam (BRIQUE, 2016). Os metais de superfície polida são um exemplo de materiais altamente refletivos. Quando houver a existência de objetos no entorno do objeto ensaiado termograficamente é importante compensar a temperatura refletida no campo do termovisor. Em inspeções práticas, esta temperatura pode ser determinada com o uso de uma placa de metal polida ou uma folha de papel alumínio, posicionada entre o objeto inspecionado e o termovisor. Configura-se o valor de emissividade da câmera próximo ao valor unitário e aponta-se para a superfície de metal ou de alumínio que, por apresentar alta refletividade, mostrará o valor da temperatura aparente refletida que deverá ser compensada (TESTO, 2009).

O guia TESTO (2009) aponta que a emissividade tem relação importante com a temperatura refletida. Quanto menor é a emissividade do material, maior é sua porcentagem de radiação infravermelha refletida, apresentando maior dificuldade para medições termográficas e tornando mais importante a verificação prática da variável de temperatura refletida.

2.4.3.4 Atenuação atmosférica

Barreira (2004) salienta que medidas termográficas realizadas em distâncias acima de 10 metros devem ser corrigidas, devido ao fato de que a atenuação atmosférica pode afetar a precisão dos dados. A qualidade da imagem pode ser afetada devido aos gradientes térmicos e a turbulência, que modificam o índice de refração do ar.

2.4.3.5 Geometria solar

A transferência de calor por radiação depende da orientação entre a superfície receptora e a fonte de radiação (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Para aplicação da termografia passiva, principalmente em elementos verticais, a posição do objeto em relação à trajetória solar determina quantidades diferentes de radiação incidente sobre sua superfície em diferentes horários do dia e períodos do ano.

A posição do relativa do Sol quando analisada a partir de um ponto da Terra varia ao longo de do dia e também ao longo do ano. Devido à inclinação do eixo de rotação da Terra ($23^{\circ} 27'$) em relação à vertical do plano da elíptica, o movimento de translação ao redor do Sol origina durações diferentes de cada dia do ano para cada valor de latitude no planeta (CUNHA, 2005). As coordenadas da trajetória solar nos auxiliam neste procedimento e são definidas como (Figura 11):

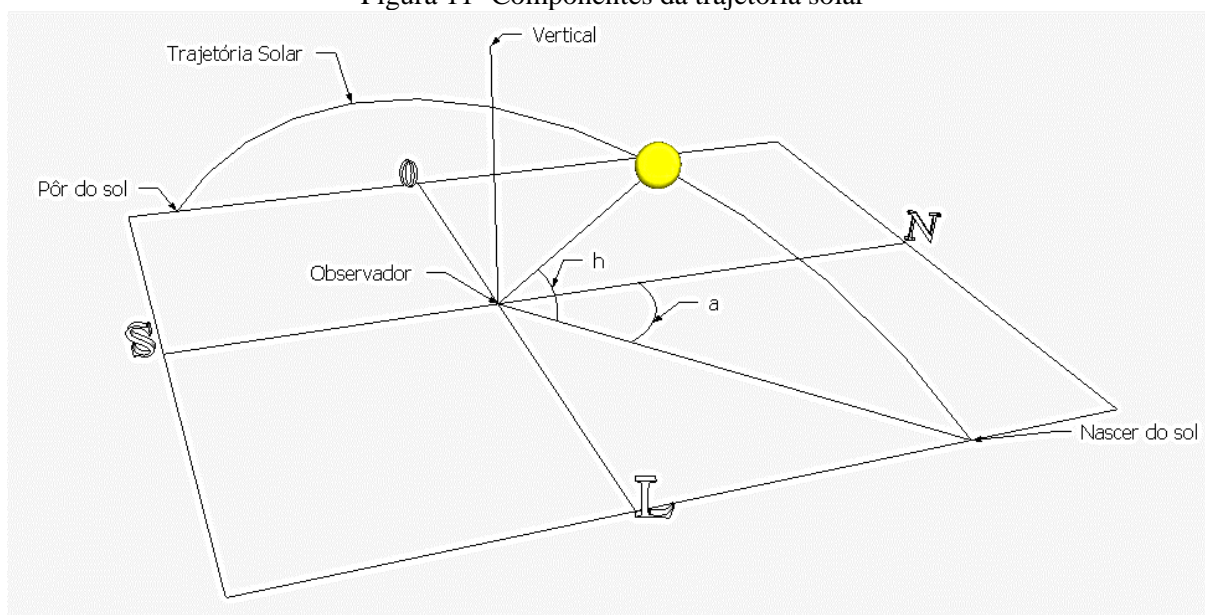
-Latitude: distância angular entre a linha do equador e a linha paralela que passa no ponto de interesse;

-Longitude: distância angular entre meridiano de Greenwich e o meridiano paralelo que passa no ponto de interesse;

-Azimute (a): distância angular entre a direção Norte das coordenadas geográficas do local e o plano vertical que passa pela posição solar, medido no sentido horário (do Norte em direção ao Leste);

-Altura Solar (h): distância angular formado pela posição do Sol e o plano horizontal do local considerado;

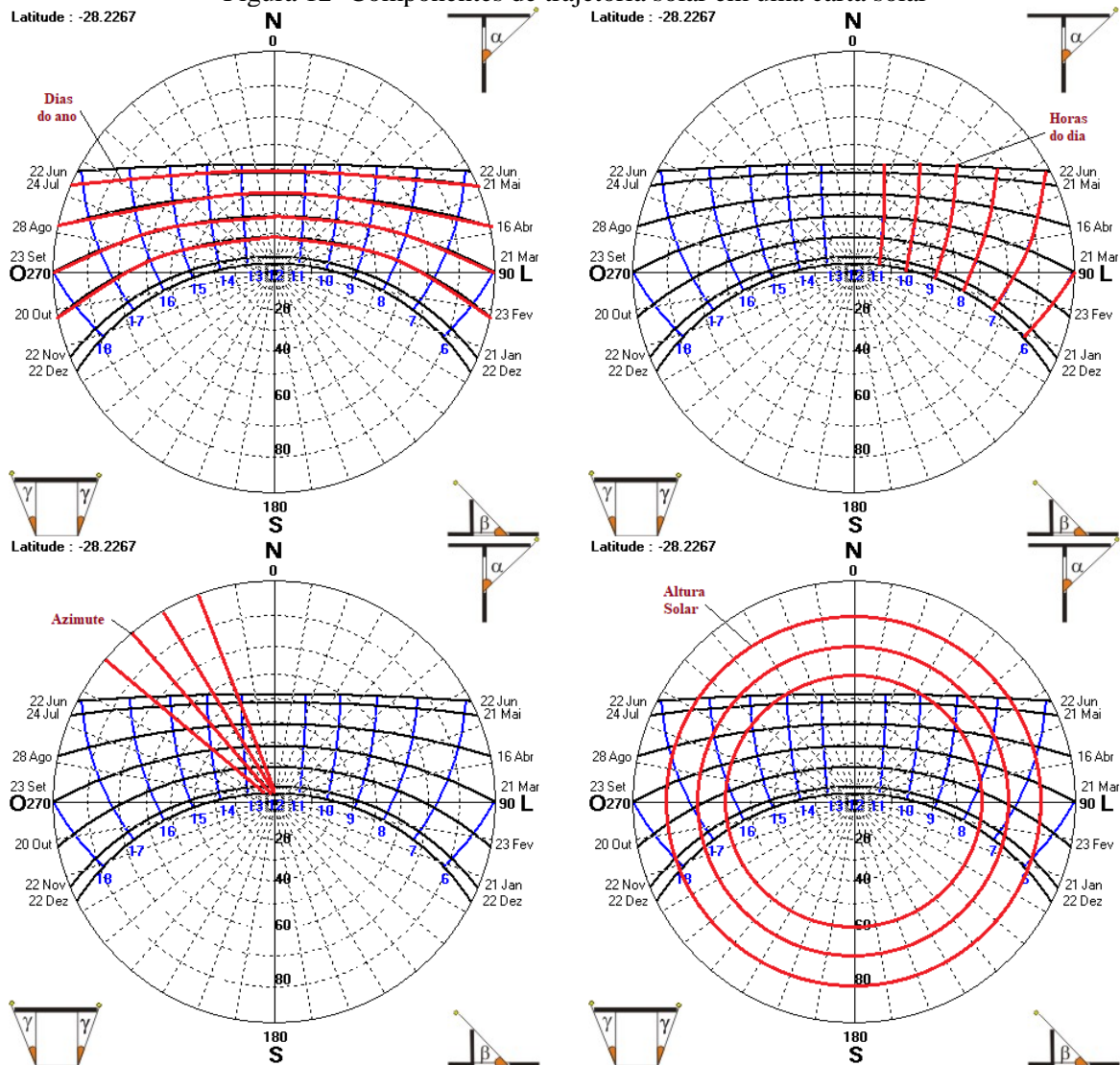
Figura 11- Componentes da trajetória solar



Uma projeção horizontal da trajetória solar para vários dias do ano em um ponto sobre a superfície terrestre em uma determinada latitude recebe o nome de carta solar. As cartas solares constituem uma ferramenta de auxílio na compreensão das posições solares ao longo dos dias do ano. São úteis ainda na resolução de problemas que envolvem radiação, fornecendo informações de insolação de maneira acessível e intuitiva, conforme a orientação solar analisada (LAMBERTS et al., 2014).

Nas cartas solares, as linhas aproximadamente horizontais representam os dias do ano. As duas linhas extremas representam os solstícios de inverno e verão, representando trajetórias solares que ocorrem somente uma vez ao ano. A linha central representa os equinócios de primavera e outono e junto com as demais linhas da carta solar representam trajetórias que ocorrem duas vezes durante um ano. As linhas aproximadamente verticais representam os horários do dia com incidência de radiação solar. Na carta ainda são representados os azimutes de 0° a 360° e as alturas solares de 0 a 90° (Figura 12).

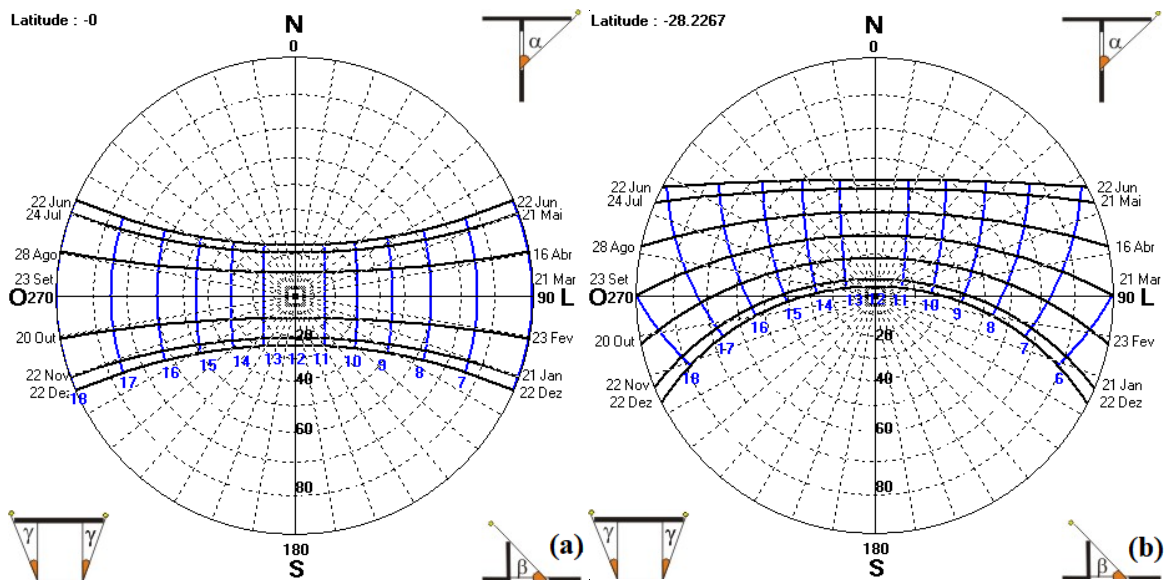
Figura 12- Componentes de trajetória solar em uma carta solar



Fonte: LABEE (2009)

A partir destes dados é possível determinar a posição solar em relação a um observador para qualquer dia do ano, em qualquer horário do dia para uma determinada latitude da qual a carta representa. A figura abaixo ilustra a carta solar para a latitude referente a Linha do Equador (0°) e para a cidade de Passo Fundo (-28.2267°), onde as amostras deste estudo foram construídas, a fim de ilustrar as diferentes trajetórias solares.

Figura 13- Cartas solares para diferentes latitudes: a) Linha do Equador b) Passo Fundo



Fonte: LABEE (2009)

Da comparação das duas cartas solares já se pode atestar as diferentes trajetórias solares para diferentes latitudes. A observação da carta solar de Passo Fundo permite observar que:

- Na orientação Norte, há uma maior incidência solar durante os períodos frios locais (metade do mês de março até final de setembro), durante praticamente todos os horários do dia;
- Na orientação Sul, há predominância de radiação solar nos períodos de verão local (início de outubro até metade de março), durante as primeiras horas da manhã e durante o final da tarde;
- Na orientação Leste, há incidência de radiação solar durante todo o período anual, porém somente durante a manhã;
- Na orientação Oeste, há incidência de radiação solar durante todo o período anual, somente durante o período da tarde.

2.5 Métodos numéricos

As propriedades variáveis, diferentes geometrias e condições de contorno complexas de materiais e processos muitas vezes dificultam a resolução de problemas de engenharia, tornando soluções analíticas difíceis, demoradas e até inviáveis. Nesses casos, existe a possibilidade de utilizar soluções detalhadas e aproximadas suficientemente precisas a partir de computadores, através de análises numéricas (VERAS, 2010).

Dentro da gama dos métodos numéricos, o Método dos Elementos Finitos (MEF), diz respeito à divisão do domínio de um problema complexo em sub-regiões de geometria simples. Os elementos são conectados entre si através de pontos ou nós. Ao conjunto de elementos e nós, denomina-se malha de elementos finitos.

Os métodos numéricos através da análise por elementos finitos podem ser usados para simulação estrutural estática, dinâmica, de transferências de calor, entre outros. É uma potencial ferramenta que permite prever, com precisão, como elementos simulados se comportam em situações reais. Apesar de configurar um método aproximado, já foi demonstrado que para uma malha consistente, com tamanho dos elementos finitos que tendem a zero e quantidade de nós tendendo a infinito, o resultado obtido converge para a solução exata do problema (SOUZA, 2003). Na engenharia, o MEF é utilizado frequentemente devido a sua flexibilidade e possibilidade de produzir resultados úteis. No entanto, é preciso compreender a natureza física do problema e como os cálculos são realizados, para poder interpretá-los e saber de suas limitações (THAJEEL, 2014).

2.5.1 Métodos numéricos aplicados à transferência de calor

A análise térmica tem como finalidade a determinação do domínio da temperatura em um determinado meio perante às variações na composição deste meio - que pode ser uma superfície, um sólido, um fluido - e às condições de contorno a ele impostas. Ou seja, conhecer como e em que quantidade o fluxo de calor varia conforme sua posição e os obstáculos que a ele são impostos (COELHO et al., 2014). Os métodos numéricos em problemas de transferência de calor consistem na substituição da equação diferencial governante do problema, junto com as condições de contorno, por n equações algébricas para temperaturas desconhecidas, nos n pontos selecionados no meio. A resolução concomitante de todas estas equações fornece o valor de temperatura nestes pontos, que podem ser tanto internos quanto de superfície (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Çengel e Ghajar (2012) ainda citam que, mesmo em geometrias simples, problemas de transferência de calor não poderão ser resolvidos analiticamente se as condições térmicas forem incomuns. Somente a consideração da radiação no processo de transferência de calor em superfícies já pode tornar impossível a resolução analítica. Ainda, a solução numérica possui flexibilidade, tornando-se ideal em processos iterativos que seriam extremamente demorados quando feitos manualmente. Com os computadores, modificações no programa ou nas variáveis

de entrada aliadas ao conhecimento do fenômeno físico permitem a resolução dos problemas de maneira rápida e eficiente.

Dentro da área de termografia infravermelha para inspeção, a modelagem numérica torna-se importante à medida que possa contribuir para a compreensão dos resultados do comportamento do fluxo de calor em um elemento a ser inspecionado. A técnica também oferece a possibilidade de diminuir o tempo e o custo utilizados na reprodução de corpos de prova que simulem o comportamento real do fluxo de calor em um estudo de diagnóstico de anomalias. Além disso, torna-se uma ferramenta útil para previsão de janelas de tempo favoráveis para inspeção de pontes (HIASA et al., 2017a).

2.5.2 Análises térmicas pelo MEF

O Método dos Elementos Finitos é comumente utilizado para aplicações estruturais como verificação de tensões, deslocamentos e deformações por análises estáticas e dinâmicas. No entanto, esta solução pode ser utilizada para outros fenômenos físicos, como é o caso da transferência de calor. Simulações térmicas em sistemas ou componentes fornecem resultados em termos de distribuição de temperatura, quantidade de calor ganhada ou perdida, gradientes térmicos e fluxo de calor. A transferência de calor em sistemas reais normalmente envolve os três modos primários de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Além disso, é tridimensional e depende do tempo e da temperatura do meio (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). As malhas de elementos finitos visam representar os meios reais sob ação de fluxos de calor.

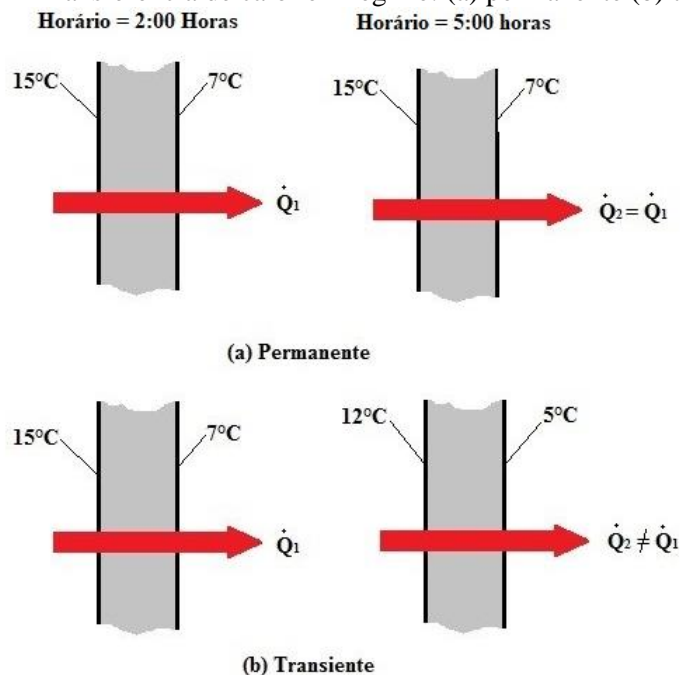
Sob esse ponto de vista, a análise térmica em MEF segue os mesmos princípios dos modelos estruturais, tais como o uso de funções ou gráficos de forma para representar matematicamente os elementos. O modelo é construído, as cargas nodais são aplicadas e os resultados são analisados. Como diferença podemos citar que em análises unicamente térmicas as malhas possuem apenas um grau de liberdade por nó, o de temperatura, enquanto análises estruturais os nós podem possuir até seis graus de liberdade (SILVA, 2017). Quanto ao tipo de análise, a presença da radiação implica, por si só, a necessidade de uma análise não linear.

As condições de contorno podem ser atribuídas através das propriedades térmicas dos materiais e das variáveis ambientais medidas no ensaio experimental. Os coeficientes térmicos de materiais e fluidos são avaliados experimentalmente e, se não estiverem disponíveis, são selecionados de estudos na literatura. Além disso, em casos de análise através de termografia passiva designa-se a fonte de aquecimento solar, variando seu posicionamento conforme a

localização terrestre do elemento, para que se analise a transferência de calor segundo a orientação solar em um determinado intervalo de tempo.

Além dessa abordagem, a análise térmica pode ser conduzida em dois regimes: permanente e transiente. Uma análise térmica em regime permanente considera as cargas de calor como sendo invariáveis com o tempo. Já a análise transiente determina a distribuição de temperatura e demais quantitativos de calor considerando a variação das condições ao longo do tempo (THAJEEL 2014), A Figura 14 esclarece melhor os dois tipos de regime.

Figura 14- Transferência de calor em regime: (a) permanente (b) transiente



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar (2012)

Çengel e Ghajar (2012) discorrem a respeito da discretização do modelo. Neste âmbito da modelagem, quanto menor for o tamanho de malha utilizado na análise, menor é o erro por discretização e maior é a precisão dos resultados alcançados. Dessa forma, é indicado que se inicie a análise com um tamanho de malha razoável, baseado na experiência. Em seguida, testam-se tamanhos de malha menores e fazem-se novas análises. Se os resultados obtidos após a redução não apresentarem diferenças consideráveis, aceitamos o erro de discretização. Se houver uma grande amplitude então repete-se a redução do tamanho da malha e analisa-se novamente, de forma contínua, até que a redução da malha não provoque variação significativa nos resultados da análise.

Existem vários fatores que podem promover algumas diferenças entre os resultados do experimento termográfico e os resultados da simulação obtidos pelo método numérico. Alguns

exemplos são: aquecimento não uniforme a campo devido às sombras circundantes interferentes, variações de emissividade, alternância da geometria da superfície, presença de nuvens e reflexões. Sendo assim, não existe uma exigência de que os resultados obtidos pelo método numérico sejam idênticos àqueles obtidos experimentalmente, apenas supõe-se que exista um comportamento convergente (THAJEEL 2014). É relevante considerar que os resultados obtidos por análise numérica podem possuir algumas imperfeições. Resultados aceitáveis em âmbito global podem apresentar erros significantes em um cenário local. Por isso recomenda-se sempre a repetição dos cálculos com pelo menos dois diferentes tamanhos de malha antes de aceitar seus resultados (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

2.6 Estudos estatísticos

Os métodos estatísticos em estudos de produtos, processos e fenômenos são ferramentas importantes para a produção do conhecimento e resolução de problemas, contribuindo energeticamente para tomada de decisão. Onde existe incerteza, esta técnica pode ser útil (IGNÁCIO, 2010). Definindo de maneira simples, a estatística trata-se da ciência dos dados, que engloba a coleta, apresentação, análise e uso de informações (MONTGOMERY; RUNGER, 2018).

2.6.1 Estatística descritiva

Dentro dos estudos estatísticos, a estatística descritiva configura as atividades e resultados que buscam organizar, resumir e apresentar um conjunto de dados de modo a facilitar sua interpretação e análise. Montgomery e Runger (2018) apontam que os métodos utilizados nesta fase devem realçar os pontos importantes do conjunto de dados de modo a auxiliar o analista no julgamento estatístico. Destaca-se a importância da visualização do comportamento dos dados através de plotagem gráficas.

2.6.2 Teste de hipóteses

É chamada hipótese estatística qualquer afirmação que se faça acerca da distribuição de probabilidade de um parâmetro desconhecido de uma população A partir disso, investigando parte desta população (amostra) cria-se uma regra de decisão, onde será provado se esta hipótese é coerente ou não. Este procedimento é chamado de teste de hipóteses e trata-se de um

método de inferência estatística usado para estimar o comportamento de uma determinada população de interesse, com erro medido e significância prática e estatística pré-determinada (EHLERS, 2003; BARBOSA 2014).

Os testes de hipótese possuem os seguintes componentes fundamentais (MONTGOMERY; RUNGER, 2018):

- H_0 = Hipótese nula, assumida como verdadeira, normalmente afirma que não existe relação entre os fenômenos medidos. É rejeitada, em favor da hipótese alternativa, somente se houver evidência de que a hipótese nula é falsa.
- H_1 = Hipótese alterativa, contraditória a H_0 . Assim sendo, os dois resultados possíveis para um teste de hipóteses é a aceitação ou não da hipótese nula.
- Erro do tipo I = ocorre quando a hipótese nula é rejeitada, mesmo sendo verdadeira;
- Erro do tipo II = ocorre quando a hipótese alternativa é rejeitada, quando ela é, na realidade, verdadeira.
- Valor p = representa a probabilidade de significância. Na resposta do teste de hipóteses, é comparado com o nível de significância do teste, ou seja, a probabilidade de que ocorra o erro do tipo I. Normalmente este valor está entre 0,01 e 0,05, ou seja, existe em cada 100 chances 1 ou 5 chances de a hipótese nula ser rejeitada, sendo na realidade verdadeira. Se na comparação após o teste, o nível p for menor que o nível de significância, H_0 é rejeitada.

Os testes de hipótese permitem avaliar a robustez de uma evidência amostral para inferências relativas a população, permitindo a compreensão de como extrapolar dados observados em um experimento amostral para à população da qual a amostra originou (BARBOSA, 2014). Isso é útil visto que muitos dos problemas, decisões e experimentos de engenharia podem ser esclarecidos a partir de testes de hipóteses (MONTGOMERY; RUNGER, 2018).

2.6.3 Modelos de regressão

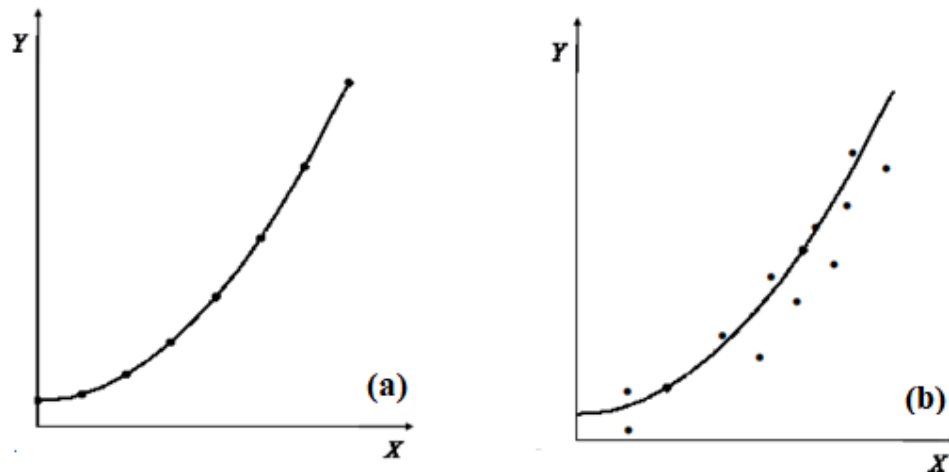
Os modelos de regressão são modelos estatísticos comumente utilizados para pesquisas das áreas clínicas, de informática, social, de biologia, engenharia e tantos outros. O intuito principal da técnica é obter uma equação que demonstre satisfatoriamente a relação entre uma variável de resposta e variáveis explicativas, podendo fazer previsões acerca da variável de interesse (GUIMARÃES, 2018). Tais relações podem normalmente ser representadas por:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad \text{Equação 6}$$

Onde Y é a variável de interesse, f representa uma função matemática e X_h ($h=1, 2, \dots, k$) são as variáveis explicativas.

Sendo conhecido um conjunto de valores X_h ($h = 1, 2, \dots, n$) e os correspondentes valores de $Y = f(X_h)$, se construirmos um gráfico, teremos um modelo matemático que relaciona as duas variáveis (Figura 15a). Porém, normalmente a variável independente é afetada pela interação entre os fatores existentes e por fatores que não são considerados na análise, por indisponibilidade de dados, dificuldade de mensuração, entre outros motivos, gerando a ocorrência de um resíduo, ou erro (ε). Admitido isso, faz-se necessário um modelo estatístico, que não faz a previsão exata de uma variável, mas sim de seu valor aproximado (Figura 15b).

Figura 15- Modelo de regressão a) matemático: $Y = f(X_h)$ b) estatístico: $Y = f(X_h) + \varepsilon$



Fonte: Adaptado de HOFFMAN (2016)

O modelo estatístico de regressão é classificado como modelo de regressão simples se envolve uma única variável dependente e como modelo de regressão múltipla se possui duas ou mais variáveis independentes. A inclusão do número de variáveis independentes melhora a capacidade de predição do modelo de regressão. Recomenda-se que, mesmo quando estamos interessados no efeito de apenas uma das variáveis, inclua-se as outras capazes de afetar o fator de interesse. Isso permite que os resíduos sejam reduzidos e a significância aumentada. A multiplicidade também elimina a tendenciosidade (GUIMARÃES, 2018). Montgomery e Runger (2018) salientam que os modelos de regressão devem atender as premissas de que os erros estejam normalmente distribuídos, independentes, com média zero e variância constante.

2.7 Estudos anteriores

O primeiro caso de inspeção termográfica em ponte de concreto é abordado por Weil e Haefner (1989), na ponte Martin Luther King Jr., em St. Louis, Missouri, Estados Unidos, em 1985. Neste local, as condições meteorológicas mudavam rapidamente, alternando entre condições de céu claro a neblina e chuva em questão de minutos. Portanto, era necessária uma inspeção de campo em um período de 8 horas ou menos. Assim, um equipamento de termografia infravermelha foi montado sobre um elevador móvel e inspecionou todas as pistas da ponte em uma noite durante o fim de semana, entre as 19:30 e 2:00 horas da manhã, para que não houvesse fechamento de pistas. Após a inspeção, uma técnica simples foi usada para confirmar os dados de infravermelhos: três áreas aleatórias foram escolhidas entre as delaminações detectadas e, nestes locais, um prego de 8 polegadas (200 mm) foi empurrado para dentro do pavimento, através de um golpe padrão feito pelo engenheiro supervisor. Os locais onde o instrumento penetrou profundamente correspondeu exatamente aos locais de anomalias encontradas pela câmera infravermelha. Os gestores da ponte estimaram que, pela redução do número de testes de pavimentação e pelo início imediato do programa de reabilitação de pontes, os ensaios termográficos permitiram uma economia estimada em 80.000,00 dólares.

Nos últimos anos o uso da termografia infravermelha como ensaio não destrutivo foi difundido e a técnica está sendo utilizada para inspeções em edifícios, componentes aeronáuticos, industriais, pavimentos, estruturas de aço, de concreto, compósitos, estruturas mistas e até para estudos de patrimônio, na investigação de bens enterrados, danificados ou parcialmente intactos (GARRIDO; LAGUELA; ARIAS, 2018). Na área de inspeção de pontes e viadutos, a academia mostra-se envolvida com o assunto, abordando o alcance do método na detecção de defeitos e condições ambientais ideais para uma aplicação bem sucedida destes equipamentos, conforme apresentado a seguir.

Washer et al. (2009, 2010a, 2010b, 2013) fizeram vários estudos para examinar as condições ambientais ideais para um ensaio termográfico efetivo em pontes de concreto. Um bloco de tamanho considerável foi construído, com 2,4 x 2,4 x 0,9 metros de largura, comprimento e altura, respectivamente, com armadura posicionada em todas as faces e cobertura de 5,1 centímetros. Os defeitos inseridos, a fim de simular delaminações, possuíam 30 x 30 x 1,3 centímetros de largura, comprimento e espessura, respectivamente, em profundidades de 1, 2, 3 e 5 polegadas nas faces norte e sul e 1 e 3 polegadas na face leste e oeste. Foi montada no local uma estação meteorológica para monitorar dados de temperatura

ambiente, carga solar e velocidade do vento. Paralelo a isso, uma câmera térmica fazia a tomada de fotos, a uma distância de 9 metros do bloco. Como conclusão, os autores observaram que a carga de energia solar direta e ininterrupta se correlaciona diretamente com o nível de contraste térmico observado. Em relação aos horários ideais, para defeitos mais profundos, os valores de contraste térmico mais robustos foram observados 9 horas depois do nascer do Sol. O intervalo de tempo varia em estreita correlação com a profundidade do dano a ser observado, ficando no intervalo entre 5 e 9 horas após o nascer do Sol, sendo menor para defeitos mais perto da superfície. Para a temperatura ambiente, os autores fizeram um estudo de campo em elementos de ponte não expostos à luz solar e concluíram que é necessária uma alteração da temperatura ambiente de, pelo menos 8,3 °C, negativos ou positivos, para uma avaliação efetiva de danos subsuperficiais a partir de termografia infravermelha passiva.

Khan e Bartoli (2015) compararam o resultado de dois ensaios não destrutivos: eco impacto e termografia infravermelha, na detecção de defeitos subsuperficiais a partir de uma pequena amostra de concreto com delaminações embutidas. A localização dos defeitos não foi revelada a quem fez a inspeção. Como resultado, as imagens termográficas forneceram alta resolução espacial e potencial para uma avaliação mais rápida, em comparação com o eco impacto. No entanto, a fusão com recursos extraídos do ensaio de eco impacto melhora a imagem final dos espécimes testados e fornece uma indicação clara da existência de delaminações. Portanto, segundo os autores, a fusão de dois métodos de ensaio não destrutivos seria o ideal para melhorar a confiabilidade a inspeção e avaliação de pontes de concreto.

Watase et al. (2015) investigaram janelas de oportunidade ideais para realização de inspeções termográficas, relacionando o efeito de fatores ambientais com a temperatura de superfície do concreto através de uma análise de regressão múltipla de primeira ordem, utilizando o MATLAB. Para tanto, placas esbeltas de concreto foram fabricadas, com delaminações simuladas com silicone em profundidades de 1, 2 e 3 centímetros. Em seguida, as placas foram fixadas em pontes reais e expostas a carga solar, com sensores de temperatura de superfície instalados na placa, na área de concreto saudável e sobre o concreto que continha defeito subsuperficial. Além disso, as condições meteorológicas foram monitoradas: temperatura, ponto de orvalho, umidade relativa, pressão e velocidade do vento. Estes dados foram levantados quatro vezes por dia: meia-noite, seis horas da manhã, meio-dia e dezoito horas. Como resultado, os fatores mais influentes no resultado foram a temperatura ambiente e a pressão atmosférica. O modelo de regressão gerado pelos autores obteve um bom resultado, conforme visto na Figura 16 e Figura 17, que compara as temperaturas superficial do concreto estimadas pelo modelo e medidas em campo.

inferior da laje, o horário ideal seria a meia-noite. A metodologia proposta pelos autores limita-se devido à incerteza da fixação das placas nas pontes, que pode dar margem à passagem de ar e mudança de aquecimento das placas e ao fato de não considerar a interação entre as variáveis ambientais na análise de regressão proposta.

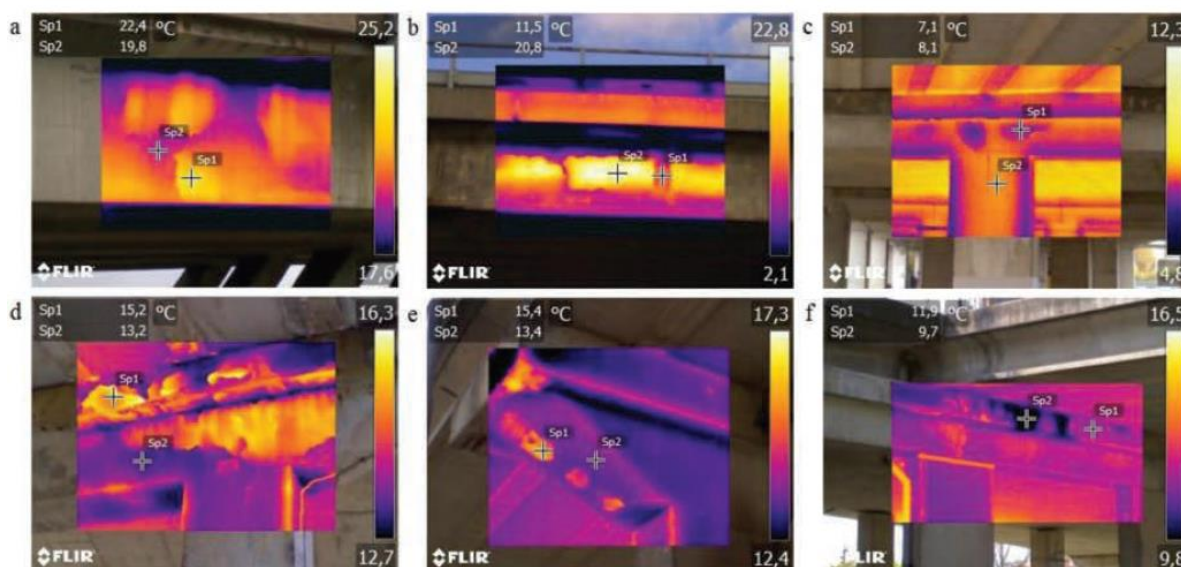
Farrag et al. (2016) investigaram o efeito da composição do concreto no resultado da análise termográfica de danos subsuperficiais. Foram testadas quatro misturas de concreto: convencional, de alta resistência, auto adensável e leve. Os defeitos foram simulados com isopor e, para detecção, foi considerada a exigência de um gradiente térmico de pelo menos 0,8 °C. Como resultado, o concreto de alta resistência possibilitou uma melhor detecção e foi observado que quanto maior a densidade e a condutibilidade térmica do concreto, melhor a detecção utilizando termografia infravermelha.

Omar, Nedhi e Zayed (2017) compararam os resultados de inspeções visual com inspeções utilizando termografia infravermelha e radar de penetração no solo, para avaliação de tabuleiros de pontes. Como resultado, a inspeção visual não classificou nenhum trecho da ponte como precária, e apenas 8,3% como extremamente precária. Em comparação, os ensaios de termografia e radar de penetração classificaram 23,3% do tabuleiro como precário e 31% como extremamente precário. Os autores ressaltam os benefícios da integração das tecnologias de inspeção, visto que o radar apresenta melhor desempenho para maiores profundidades de análise, enquanto a câmera térmica possui maior sensibilidade na detecção da delaminação sob a superfície.

Tran et al. (2017) abordaram o impacto dos fatores ambientais na análise termográfica. Elementos estruturais foram modelados em laboratório, com defeitos artificiais. Os autores usaram lâmpadas halógenas, em laboratório, a fim de simular lajes e vigas que não recebem luz solar e desconsiderar a influência do vento. Os resultados mostraram que o contraste térmico aumenta com a elevação da temperatura ambiente e cresce mais rápido com grandes delaminações superficiais do que com pequenas delaminações profundas. Também verificaram que altos teores de umidade aumentam o contraste para detecção de delaminações próximas à superfície.

Jankö, Březina e Grošek (2017) estudaram o alcance da termografia infravermelha na detecção de defeitos em pontes de concreto e a influência das condições climáticas nos resultados.

Figura 18- Imagens termográficas em ponte



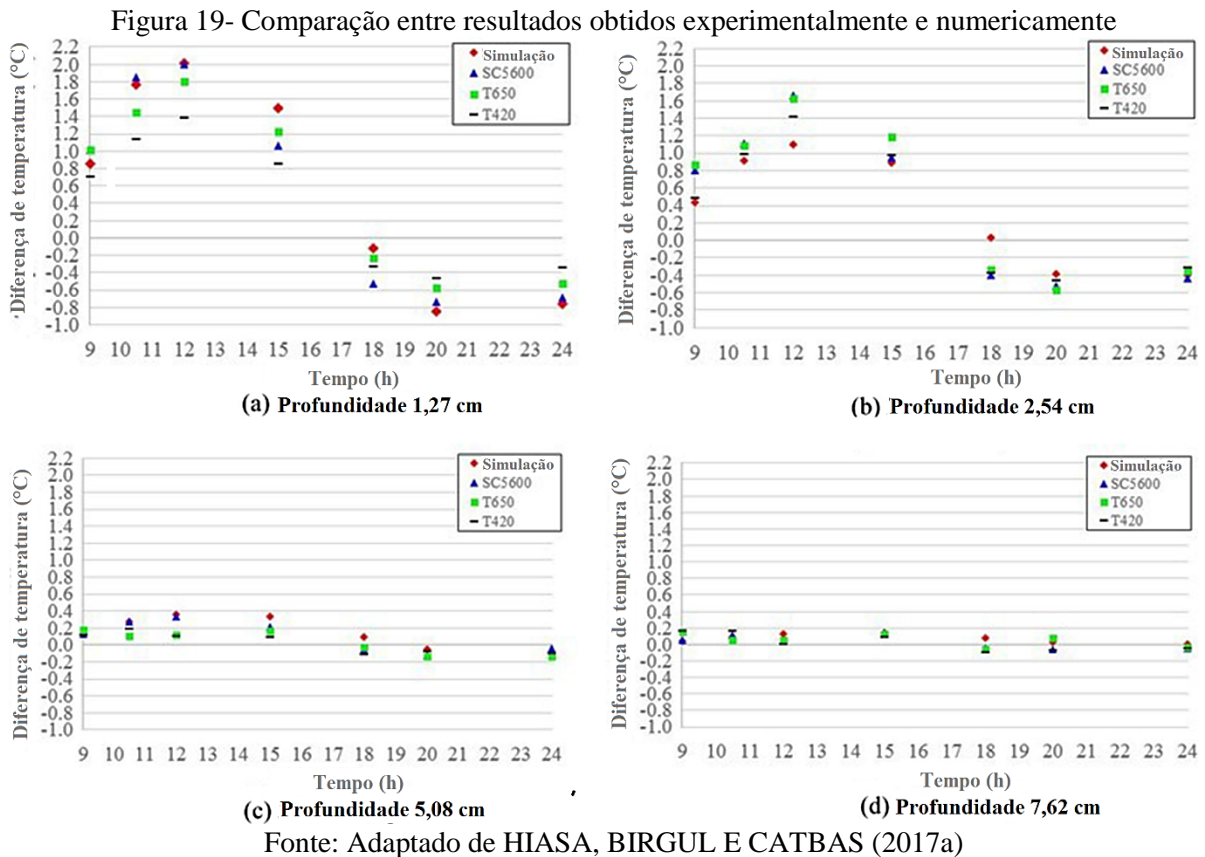
Fonte: Jankö, Březina e Grošek (2017)

Sua investigação prática mostrou que as inspeções com câmera térmica são otimizadas em dias com grande amplitude de temperatura entre o dia e a noite e que o máximo contraste térmico - ponto ótimo para medição - ocorre perto ao meio dia. Quanto à profundidade do dano, os defeitos mais profundos são detectados após um período de aquecimento maior, quando comparado aos defeitos superficiais. Para inspeções em campo, os autores recomendam os meses de verão, que oferecem dias com vasta amplitude térmica. Em áreas sombreadas, o contraste térmico é menor e exige uma boa sensibilidade da câmera. Sendo assim, os autores concluem que uma inspeção termográfica efetiva requer configuração precisa das funcionalidades da câmera aliada às condições climáticas favoráveis e horário ideal para tomada das imagens.

Hiasa, Birgul e Catbas (2016) testaram três câmeras termográficas para inspeção de estruturas de concreto, a fim de investigar o efeito do ângulo de fotografia e das especificações da câmera nos resultados de inspeção. Foram modeladas placas de concreto de pequenas espessuras, com vazios propositais em diferentes profundidades, para simular delaminações. Essas placas foram fixadas em uma placa de madeira, em laboratório, a qual era aquecida por uma manta térmica. As imagens foram tomadas a uma distância de 5 metros, em ângulos de 0°, 30° e 45°. Além disso, os autores exploram um método de processamento de dados para as imagens da câmera térmica, a fim de reduzir a subjetividade de interpretação dos resultados. A metodologia também foi aplicada a uma estrutura real, onde outro autor já tinha localizado uma delaminação por meio de termografia. Como resultado, concluíram que quando as imagens são tomadas perpendicularmente ao objeto, os termogramas são menos sensíveis. Com relação as

câmeras, todas detectaram os danos, no entanto a câmera com maior sensibilidade e resolução registrou contrastes entre áreas de concreto regular e área com delaminações em menor tempo de aquecimento. Quanto ao processamento de dados, a técnica facilitou a interpretação dos resultados e mostrou potencial para melhorar a automatização da detecção de danos em inspeções termográficas de estruturas de concreto armado.

Os mesmos autores, (HIASA et al., 2017a) abordaram de maneira mais objetiva do tema, adicionando elementos finitos a análise termográfica. Blocos de concreto construídos experimentalmente, com defeitos subsuperficiais simulados em profundidades de 1,27, 2,54, 5,08 e 7,62 centímetros, foram simulados no software COMSOL, bem como suas condições de contorno para materiais e ambiente. Comparou-se o resultado da modelagem com os termogramas obtidos por três câmeras termográficas diferentes (Figura 19).



Para o cálculo do contraste térmico mostrado nesta comparação, a parte central da delaminação foi utilizada para determinar a temperatura da parte delaminada e um ponto a 5 centímetros de distância a partir do bordo da delaminação foi utilizado para determinar a temperatura do concreto sem defeitos. Levantando outros pontos, os autores concluíram que o efeito de borda, ou seja, aumento de contraste térmico devido à proximidade dos limites do

elemento analisado, afeta cerca de 15 centímetros de concreto próximo à borda. Como no estudo anterior, um método de processamento de dados foi utilizado, através do software MATLAB, para transformar os termogramas coloridos em imagens binárias, ou seja, apenas preto e branco, permitindo uma avaliação mais objetiva dos danos. O procedimento de simulação por elementos finitos mostrou-se efetivo, e se aplicado na prática poderia permitir ao inspetor estabelecer um programa de inspeção muito mais produtivo. Seguindo os processos do estudo, o inspetor pode obter a longitude, a latitude, e a informação de fuso horário para a ponte a ser inspecionada, permitindo que o software calcule a radiação solar que irradia para o tabuleiro da ponte. Em seguida, predeterminaria os defeitos alvo a serem detectados no interior da plataforma, em termos do tamanho e da profundidade a partir da superfície. Com isso, avaliando os resultados da simulação por elementos finitos, o inspetor seria capaz de decidir a janela de tempo mais favorável para conduzir a inspeção para esta ponte específica e para os tipos predeterminados de defeitos.

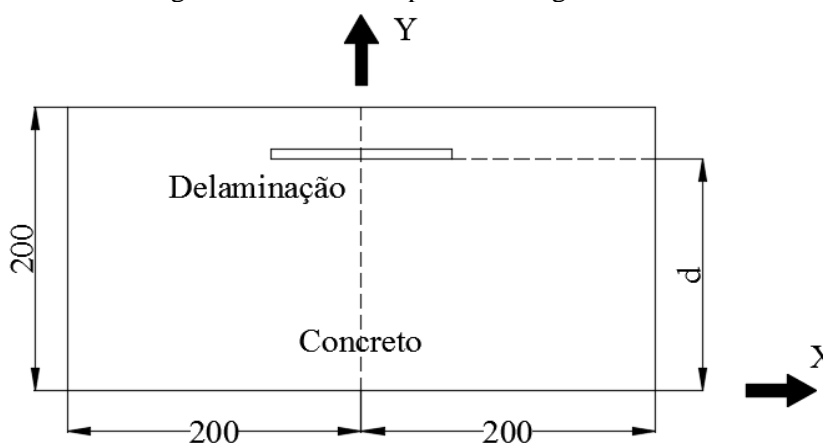
Seguindo os estudos, Hiasa et al. (2017b e 2017c), investigaram, através de modelos numéricos e experimentais, o efeito da profundidade, da forma e da espessura de delaminações em tabuleiros de pontes, bem como temperatura ambiente e as condições de radiação solar (diferentes estações do ano), para sua detecção em inspeções com câmeras termográficas. Em relação ao efeito do tamanho e da espessura do dano, observaram que a diferença de temperatura entre o concreto sem danos e área delaminada aumenta à medida que o tamanho de delaminação aumenta, convergindo para um determinado valor quando a área é igual ou maior do que 40×40 centímetros e a espessura é igual ou maior do que 1 centímetro, sendo que a área do dano influencia mais do que sua espessura. Para a forma de delaminação, presumiram o contraste de qualquer delaminação converge proporcionalmente para o mesmo contraste de uma delaminação circular ou quadrada de mesma área. Diferentes estações do ano não apresentaram mudanças para o levantamento. Com base na correlação entre o tamanho da delaminação e a profundidade, os autores assumiram que é possível estimar a profundidade de delaminação comparando o contraste obtidos em termogramas com os dados das simulações do modelo por elementos finitos. A estimativa foi comprovada através de levantamento termográfico, com retirada de amostra, por ensaio destrutivo em ponte.

Ainda Hiasa et al. (2018), investigaram experimentalmente e numericamente as condições preferíveis para análise termográfica em pontes de concreto e obtiveram bons resultados durante o dia e à noite. No entanto, o intervalo de tempo para captura de informações durante o dia é menor, visto que existem os períodos de intercâmbio entre os ciclos de resfriamento e aquecimento de manhã e ao entardecer, onde a temperatura se equilibra e os

danos não se encontram aparentes. Além disso, efeito da luz solar em obstáculos e nuvens podem levar à falsa detecção. Dessa forma, concluíram que a condição ideal para análise termográfica em tabuleiros de pontes de concreto é durante a noite, com céu claro.

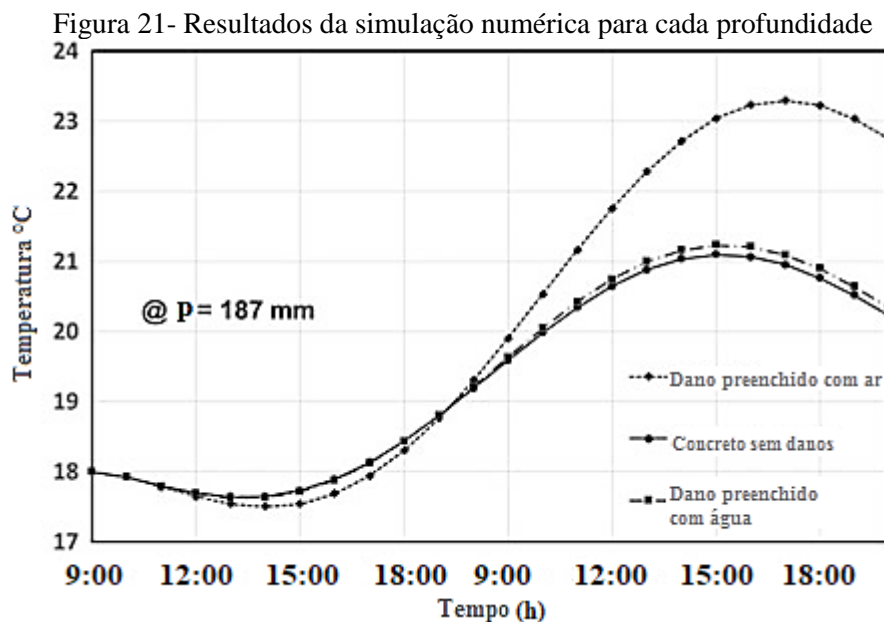
Güray e Birgül (2018) investigaram a janela de tempo favorável para inspeções de pontes de concreto armado através de termografia infravermelha apenas através de modelagem numérica. Para isso, um segmento de laje de tabuleiro de ponte de 20 centímetros de espessura e 40 centímetros de largura foi construído, com simulações de delaminações de 2 mm de espessura e 10 centímetros de largura (Figura 20), variando seu preenchimento, com ar e com água e sua profundidade.

Figura 20- Geometria para modelagem numérica



Fonte: Adaptado de Güray e Birgül (2018)

Através da utilização do software ANSYS, foram configurados parâmetros de temperatura ambiente e coeficientes de transferência de calor. A análise foi feita para um período de 24 horas. Após a análise, obteve-se o mapa de temperaturas superficiais, em cada hora do dia. Os autores observaram que o melhor intervalo de tempo para uso de termografia infravermelha para inspeções de pontes de concreto é entre as 15:00 e 19:00 horas, conforme visto na Figura 21. Além disso, os autores observaram que o contraste térmico é tanto maior quanto mais superficial o dano, sendo que danos localizados em profundidades maiores do que 3 centímetros são de difícil detecção. Além disso, delaminações preenchidas com água induziram um contraste térmico menor do que aquelas preenchidas com ar, devido a condutividade térmica da água ser mais elevada que a do ar.



Fonte: Adaptado de Güray e Birgül (2018)

Róžański e Ziopaja (2018) analisaram se a termografia infravermelha poderia efetivamente melhorar a detecção de defeitos em pontes de concreto, com a finalidade de ser usada para diagnosticar a condição técnica e complementar as inspeções clássicas de ponte. Como resultado, classificaram seu uso como razoável, visto que há um número considerável de limitações. As desvantagens incluem condições climáticas desfavoráveis, longas distâncias entre o ponto de observação e a estrutura e grandes elementos da ponte, além de ser difícil alcançar o aquecimento uniforme da superfície ensaiada.

Rathod e Gupta (2019) usaram cinco ENDs e sua combinação para detectar defeitos subsuperficiais em concreto armado: radar de penetração no solo, termografia infravermelha, resistividade elétrica, ultrassom e potencial elétrico de corrosão. Usando mais de 300 pontos de dados para determinar o desempenho de cada técnica, os autores concluíram que nenhum destes ensaios particulares é completo na detecção e todos os danos e cada uma tem suas próprias vantagens e limitações. A pesquisa experimental ainda mostrou que combinar múltiplos ensaios resulta em um erro de levantamento de defeitos significativamente menor em relação ao uso de um teste autônomo. Quanto à termografia infravermelha passiva, os recursos na detecção de defeitos no concreto são altamente dependentes das condições ambientais, sendo que estas variam dependendo da localização geográfica.

Rocha, Póvoas e Santos (2018) testaram a termografia infravermelha para a detecção de delaminações em diferentes tipos de concreto não expostos diretamente à luz do Sol, onde a transferência de calor ocorre principalmente por convecção. A metodologia experimental

utilizou dois corpos de prova de concreto com diferentes relações água/cimento (a/c) e inserção de placas de poliestireno de diferentes espessuras e profundidades, a fim de simular defeitos dentro do concreto e avaliar a capacidade da termografia infravermelha para detectá-los. Os resultados mostram que a detecção é possível, mas limitada a curtos períodos de tempo. Em relação à qualidade do concreto, os defeitos foram mais facilmente detectados no corpo de prova com menor relação a/c, visto que esta relação apresenta menor porosidade, que aumenta a densidade, que conseqüentemente afeta a difusividade, elevando os gradientes visíveis observados com a câmera termográfica. Quanto ao posicionamento dos danos, quanto mais próximo da superfície e quanto maior o tamanho da delaminação, mais fácil é a detecção. Para ambos os espécimes, os valores mais altos para temperaturas do concreto e das delaminações foram registrados quando a temperatura ambiente e umidade relativa estavam máximo e mínimo, respectivamente, aproximadamente entre as 13:00 e as 14:00 horas. Dessa forma, os autores concluíram que a temperatura ambiente era a maior responsável para os contrastes térmicos da manhã e parte da tarde, enquanto a umidade relativa do ar contribuiu principalmente para o processo durante a noite, aumentando o teor de umidade do concreto e, portanto, a taxa de transferência de calor. Os autores ressaltam que os resultados experimentais podem ser muito diferentes de resultados obtidos a partir da inspeção de estruturas reais, considerando as diferentes condições e características ambientais que o concreto da estrutura inspecionada é sujeito.

Karunaratne et al. (2010) estudaram a variação de temperatura e a deformação de uma laje de concreto sob radiação solar usando elementos finitos e análise experimental. A variação diária de temperatura ao longo da laje e o fluxo de calor solar na placa foram monitorados usando termopares, medidor solar e filtro infravermelho. Os resultados mostraram que a variação diária de temperatura dentro de uma laje de concreto está relacionada com a variação da temperatura ambiente. Porém, a temperatura no interior da laje mantém-se constantemente acima da temperatura ambiente. Durante o dia, a superfície superior da laje de concreto absorve o fluxo de calor solar e tende a acumular energia térmica dentro do elemento, de acordo com suas propriedades térmicas. No período noturno, a laje de concreto começa a dissipar energia, de acordo com seus parâmetros de convecção. Os autores também observaram que a diferença constante de temperatura entre as diferentes faces da laje pode ocasionar empenamento, devido à não uniformidade na dilatação térmica. A análise por elementos finitos verificada obteve sucesso na previsão das tensões induzidas pela temperatura em pavimentos.

Khodayar, Sojasi e Maldague (2015) realizaram uma perspectiva até 2050 sobre o uso de termografia infravermelha como ensaio não destrutivo. Em relação aos equipamentos, a

técnica continuará a desenvolver detectores com maior resolução (densidade de pixels) e menor custo, devido ao contínuo desenvolvimento da tecnologia. No que diz respeito ao processamento de imagens, a termografia evolui da imagem funcional digital para a análise de padrões, detecção e análise quantitativa. Outros desenvolvimentos são esperados, especialmente porque novos processadores serão capazes de lidar com algoritmos mais complexos. A internet das coisas (*Internet of Things-IoT*) também irá revolucionar a termografia infravermelha com uso generalizado de conexão contínua inteligente de baixo custo e nano sensores. Essas melhorias levarão a uma maior aceitação pela indústria e pelo público em geral. Com a queda do preço de câmeras infravermelhas, ainda mais aplicações termográficas surgirão, em qualquer campo onde uma mudança de temperatura sem contato testemunhe um fenômeno de interesse. Há ambições futuras de, por exemplo, veículos e embarcações com equipamentos de visão infravermelha que auxiliem na segurança e visão noturna e robôs humanoides equipados com detectores infravermelhos para realização de inspeção.

Nessa perspectiva, dentro do que foi apresentado, este trabalho propôs o estudo experimental, numérico e estatístico do alcance da termografia infravermelha em inspeções em estruturas de concreto armado, sobretudo em pontes, bem como o levantamento das melhores condições para sua aplicação, estudando as numerosas condições de contorno inerentes aos processos de transferência de calor relacionados a estas estruturas e sua influência no levantamento de dados através de análise termográfica.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este item tem como finalidade apresentar os diferentes equipamentos, materiais e procedimentos empregados a fim de alcançar os objetivos da pesquisa.

3.1 Configuração experimental

A fim de reproduzir precisamente a configuração dos elementos estruturais de uma obra de arte de concreto armado foram confeccionadas, em menor escala, amostras de lajes e pilar de pontes. Nestas amostras foram gerados, propositalmente, defeitos subsuperficiais para testar alcance da termografia infravermelha em detectá-los através de inspeção. A configuração dos danos e a escolha dos materiais utilizados teve como base o conhecimento teórico da termografia infravermelha e das estruturas de pontes, bem os estudos anteriores na área.

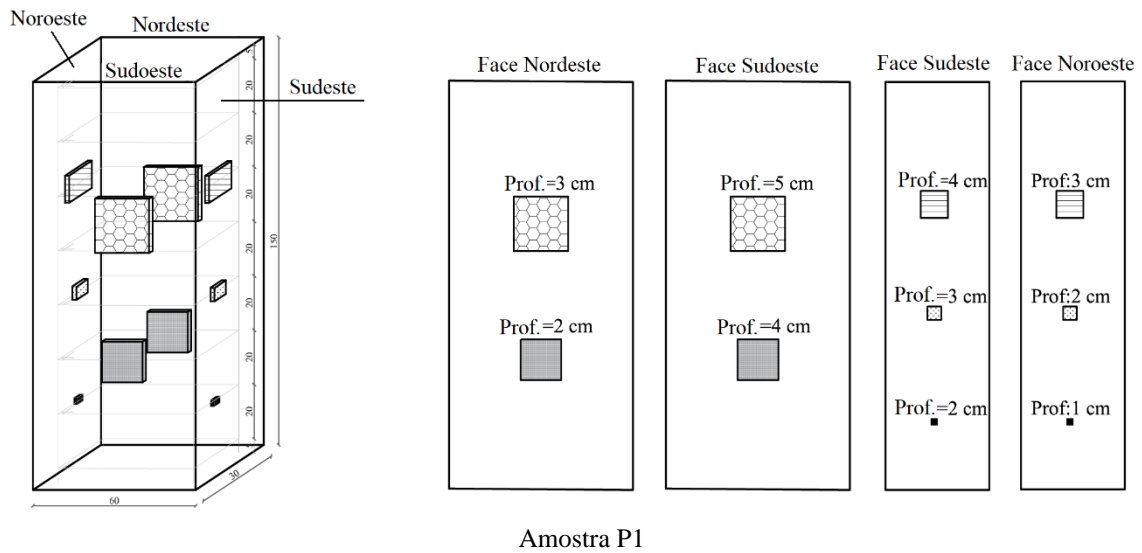
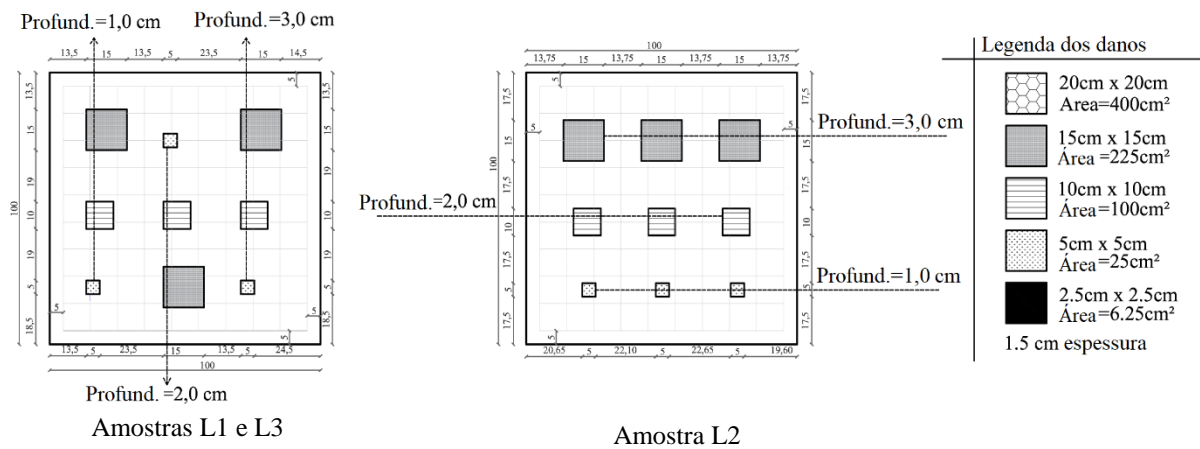
3.1.1 Construção das amostras

Foram construídas três amostras de lajes e uma amostra de pilar, com uso de armadura mínima para a área de concreto de acordo com as especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014). O traço em massa do concreto utilizado foi 1;3,10;3,10;0,65 (cimento CP IIE, areia média, brita nº1 e água), com adição de 1,5 % de aditivo plastificante. Corpos de prova foram moldados nos dias de produção das amostras e em ensaio feito aos 28 dias, a resistência média alcançada foi de 25 MPa. As lajes foram construídas com 100 x 100 x 20 centímetros de comprimento, largura e espessura, respectivamente e foram executadas em formas de madeira, apoiadas em pequenas vigas de concreto pré-moldadas sobre o solo. O pilar foi construído com dimensões de 30 x 60 x 150 centímetros de comprimento, largura e altura, respectivamente, executado sobre lastro de brita de 5 centímetros sobre o solo. O cobrimento adotado para as armaduras das amostras foi de 5 centímetros, para classe de agressividade ambiental extrema, simulando uma ponte em ambiente agressivo.

O planejamento das amostras é visto na Figura 22. Foram simulados defeitos subsuperficiais, planejados para estarem em posições entre 1 e 3 centímetros de profundidade nas lajes e entre 1 e 5 centímetros de profundidade nas faces dos pilares, para testar o alcance da termografia infravermelha em detectá-los através de inspeção. Os maiores defeitos simulados possuíam 20 x 20 cm de área, os intermediários possuíam 15 x 15 cm, 10 x 10 cm e 5 x 5 cm, todos com 1,5 cm de espessura. O material escolhido para simulação de defeitos

subsuperficiais foi o isopor, por apresentar condutividade térmica de $0.027\text{W/m}^\circ\text{C}$, semelhante ao ar, $0.024\text{W/m}^\circ\text{C}$ (HIASA et al., 2017) e por já ter sido utilizado em outros trabalhos.

Figura 22- Planejamento das amostras de lajes e pilares



A fase de execução é ilustrada na Figura 23. A Figura 24 ilustra os elementos já curados.

Figura 23- Construção de amostras de lajes e pilar de ponte -Posicionamento dos defeitos



Figura 24- Amostras de elementos após a cura



Destaca-se que o processo experimental buscou sempre utilizar materiais e equipamentos de baixo custo. Dessa forma, para posicionar os isopores em suas respectivas profundidades e garantir seus cobrimentos foram utilizados fios de arame presos ora nas armaduras, ora nas formas. Para garantir o espaçamento das armaduras nas lajes foram utilizados ganchos na lateral da forma e, nos pilares, tubos PVC com 5 centímetros de comprimento em forma de espaçadores.

Durante a execução das amostras os danos subsuperficiais simulados movimentaram-se devido à densidade e ao processo de lançamento do concreto, modificando suas profundidades planejadas. Com isso, após ao término do horizonte de medições termográficas, foram realizados ensaios destrutivos complementares para verificar a exata localização dos danos simulados, conforme descrito no item 4.1.

3.1.2 Instrumentação da pesquisa

3.1.2.1 Câmera térmica

O equipamento utilizado para a inspeção de anomalias foi um scanner de alta resolução ou câmera térmica, que determina a distribuição das temperaturas da superfície, registrada por

um sensor que reconhece a radiação infravermelha emitida pela superfície dos objetos, fornecendo mapas de temperatura, chamados termogramas (DABOUS et al., 2017). Embora a termografia infravermelha configure um teste não destrutivo com suposições simples de execução, o uso de câmeras com alta precisão e sensibilidade, combinadas com calibração precisa, reduz a possibilidade de erros de medição. Um equipamento de termografia infravermelha de última geração foi aplicado neste estudo para coleta do conjunto de dados. A câmera térmica TESTO 881-1 possui detector FPA de 160 x 120 pixels, sensibilidade térmica de 50 mK (0,05 °C) a 30 °C, foco manual, faixa espectral de 8 a 14 µm e uma taxa de atualização de 8 a 15 Hz, com detector infravermelho térmico de tipo bolômetro. A câmera fornece duas imagens a cada tomada de foto: uma normal e outra termográfica e também pode ter dois pontos de medida de temperatura por foto: o mais quente e o mais frio, dentro da área abordada pelo termovisor. A emissividade, a temperatura refletida e a temperatura ambiente devem ser configuradas manualmente.

Figura 25- Câmera termográfica TESTO 881-1



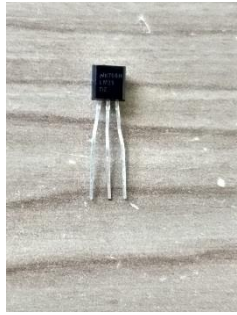


Fonte: Testo (2018)

As demais características da câmera estão disponíveis no Apêndice 1 e também no site da marca (TESTO, 2018). A câmera possui recursos que a configuram como uma boa ferramenta para o propósito desta pesquisa.

3.1.2.2 Equipamentos de controle das variáveis ambientais



Para estudar a influência dos fatores ambientais sobre o levantamento termográfico foram monitoradas as variáveis de temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar durante os períodos de ensaio. Além disso, a temperatura superficial das amostras de concreto foi medida a cada levantamento com um termômetro de superfície. O Quadro a seguir mostra os equipamentos de medição e de controle utilizados para investigar as configurações ambientais dos dias dos levantamentos feitos com a câmera térmica.

Quadro 4- Instrumentação de apoio às medições de variáveis ambientais

Equipamento	Características	Visualização
Sensor LM 35	Sensor de contato que apresenta uma saída de tensão linear proporcional à temperatura em que se encontra. Faz leituras de temperaturas dentro da faixa: -55 a +150° C, com variações de 0,25°C a 0,75°C.	
Termômetro Scan Temp ST-600	Termômetro digital, com mira laser e visor LCD, faixa de medição: -60°C a 500°C, resolução de 0,1°C e precisão de ±2°C, utilizado para medir a temperatura superficial dos materiais.	
Termo Higrômetro J Prolab	Termo Higrômetro digital, realiza medidas de temperatura ambiente umidade relativa de 20 a 90%, em temperatura interna de -50 a +70°C e temperatura externa de -10 a 70°C.	

Quadro 4- Instrumentação de apoio às medições de variáveis ambientais

(cont.)

Anemômetro DAVIS Turbo Meter	Anemômetro portátil que mede a velocidade do vento de 0 a 44,65 metros por segundo (m/s), com faixa de precisão de 3% na leitura. Utilizado para medir a velocidade do vento atuante sobre os elementos durante o ensaio termográfico.	
Arduíno UNO	Placa de prototipagem, Arduíno UNO, versão 1.0 do Arduino Software (IDE). O código-fonte para o IDE é liberado sob a Licença Pública Geral (GNU/LPG). Se trata de uma placa com prototipagem eletrônica, com suporte de entrada e saída e linguagem de programação padrão, servindo à pesquisa para transferir os dados de temperatura medidos pelos sensores para o computador.	

Os equipamentos acima citados, bem como a câmera térmica, são de propriedade da Universidade de Passo Fundo. Os dados de pressão atmosférica e radiação solar foram obtidos através dos dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019), para a estação meteorológica instalada na cidade de Passo Fundo, próxima ao local de estudo.

O sensor de contato LM35 foi introduzido em umas das amostras das lajes de concreto de maneira a permitir que fosse feita a leitura da temperatura no interior do concreto paralela a cada medição com a câmera termográfica (Figura 26). Para realizar esta medida, utilizou-se a placa de prototipagem Arduino, que ligado ao sensor e à uma fonte de energia, permitiu que fossem feitas as leituras a cada tomada de foto da câmera térmica. Este processo auxilia o entendimento do processo de transferência de calor no interior do concreto. A placa de prototipagem Arduino possui 14 pinos de entrada/saída digital, 6 entradas analógicas, podendo ser alimentada por uma conexão USB ou uma fonte de energia externa. Tem capacidade de, através de um código programado, mapear tensões entre 0 e 5 volts (V) para valores inteiros entre 0 e 1023. Isso permite uma resolução entre leituras de: 5 volts/ 1024 unidades, ou 0.0049 volts por unidade, sendo que, para temperatura levantada pelo sensor (a), cada 10 milivolts (mV) correspondem à 1 °C. É programada através da comunicação serial, fornecendo dados de saída que podem ser lidos em vários formatos, dentre eles arquivos de texto ou de Excel e gravados em cartões micro SD em tempo real. O sistema em funcionamento pode ser visto na Figura 27.

Figura 26- Local de posicionamento do sensor térmico de contato

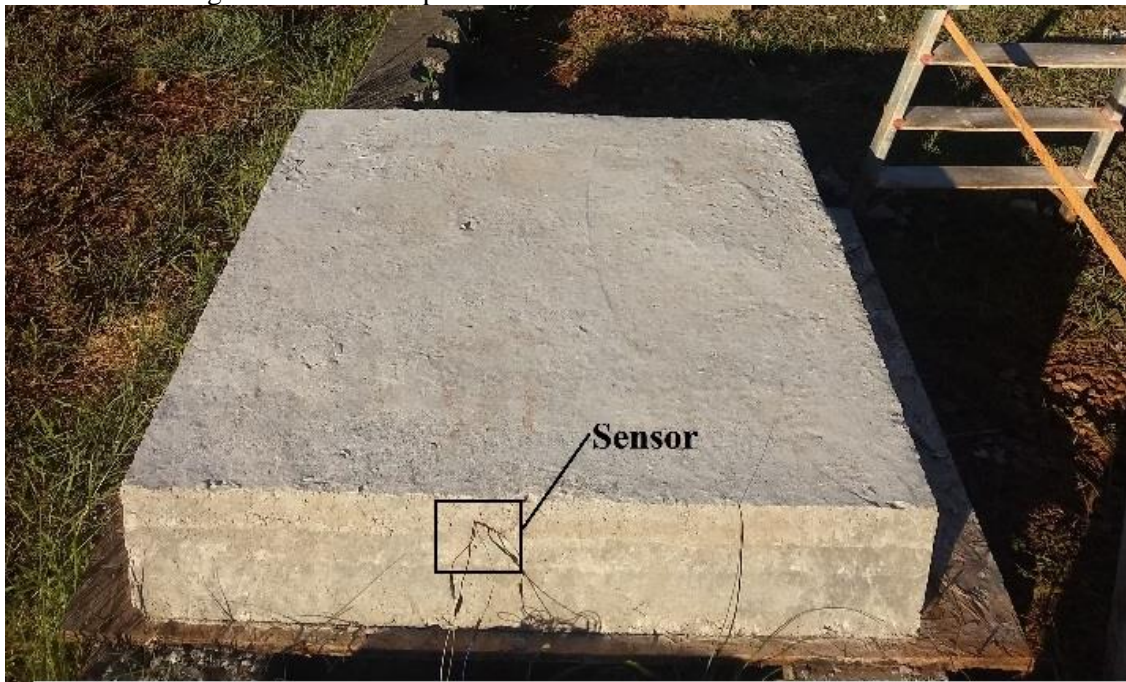
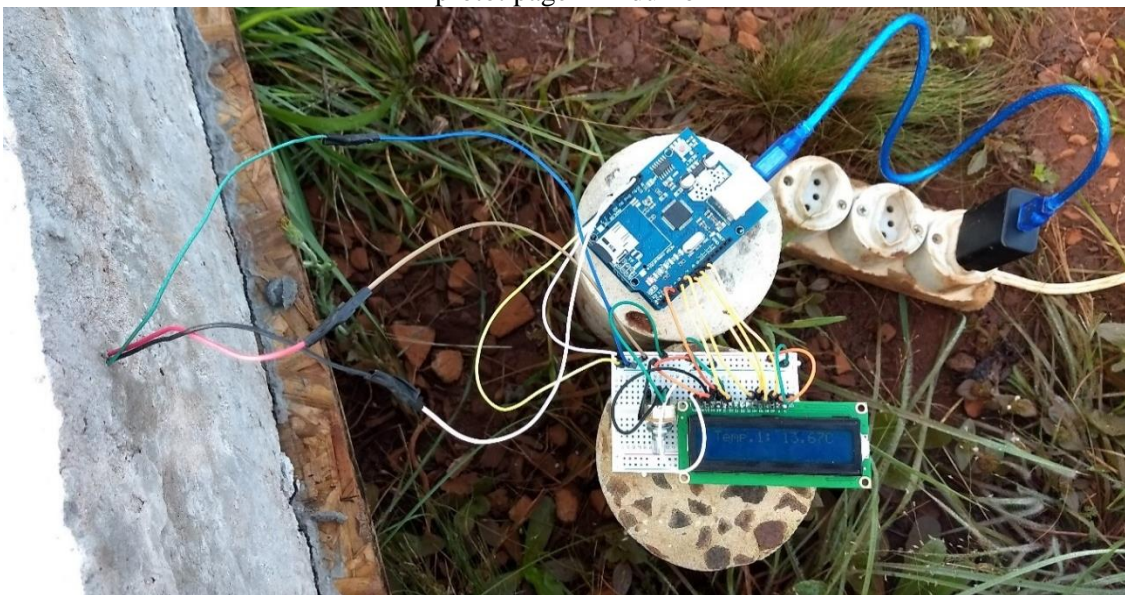


Figura 27- Esquema de medida de temperatura no interior do concreto usando sensor LM35 e placa de prototipagem Arduino



3.1.3 Disposição das amostras

As amostras foram construídas no Laboratório de Materiais de Construção do Centro Tecnológico de Engenharia Civil da Universidade de Passo Fundo (CETEC-UPF). A Figura 28 mostra o local de construção das amostras e a Figura 29 mostra a trajetória solar no local em fevereiro, um dos meses analisados no estudo.

Figura 28- Disposição das amostras



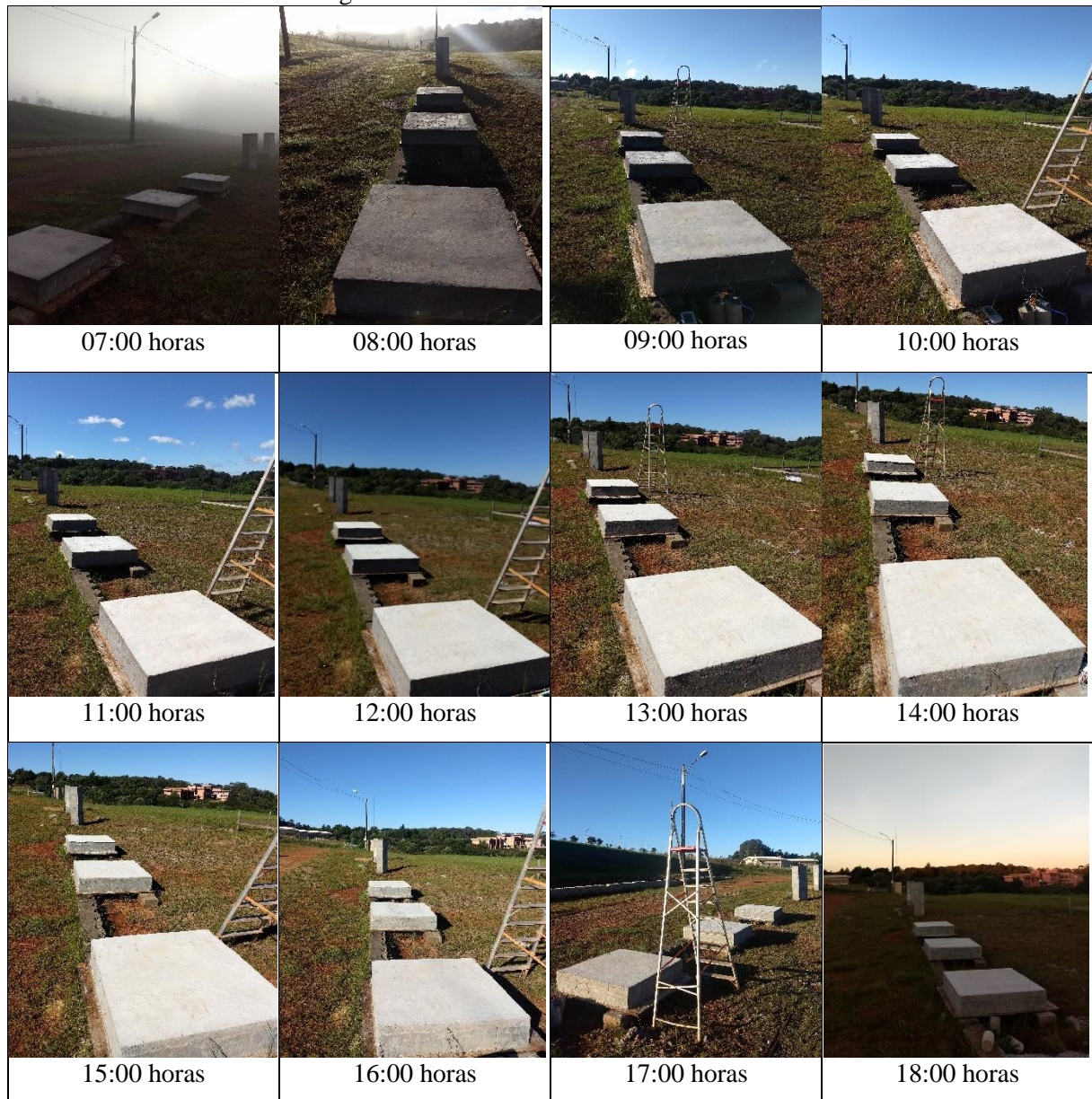
Fonte: Imagem aérea (08/11/2018)

Figura 29- Trajetória solar no local de ensaio das amostras - 23 de Fevereiro de 2019, imagem obtida via <http://www.sunearthtools.com>



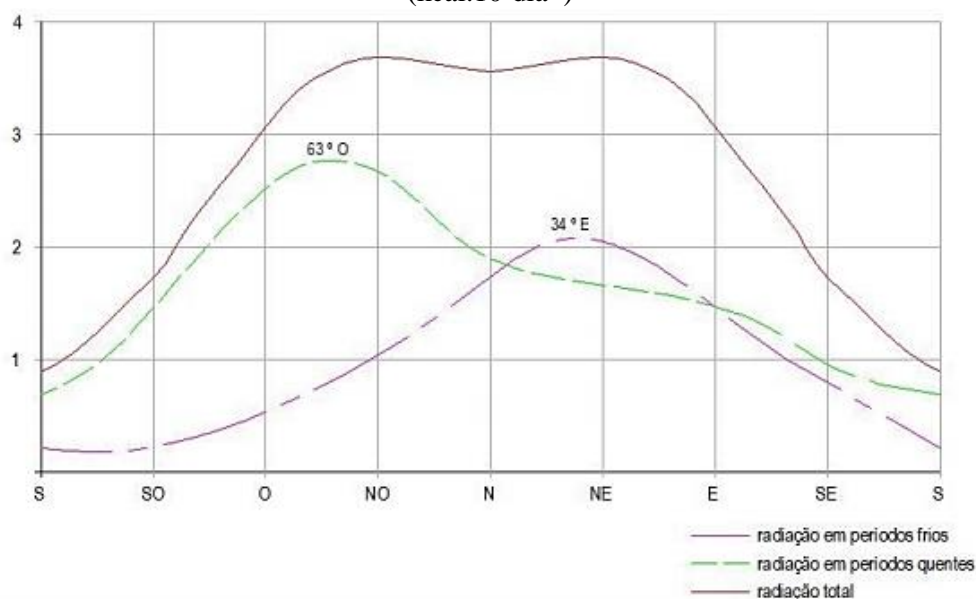
Para realização da pesquisa, o levantamento de dados principais foi feito com o uso de termografia passiva, onde a única fonte de aquecimento é a energia solar. Com isso, a execução das amostras foi feita em local do Campus da UPF onde há radiação solar direta durante todos os horários do dia e os meses analisados, garantindo que as amostras possam representar o aquecimento solar natural a que o elemento é submetido. A sequência de figuras vista no Quadro 5 mostra o atendimento desta premissa.

Quadro 5- Incidência de radiação solar nas amostras ao longo do dia durante o levantamento termográfico realizado no mês de fevereiro de 2019



A orientação solar é relevante principalmente na amostra de pilar. De acordo com o posicionamento, determinadas faces recebem maior ou menor irradiação solar em períodos distintos do dia, conforme visto no item “Geometria solar”. Para o presente trabalho, os pilares foram construídos com orientação especial, sendo que os defeitos mais profundos das amostras foram posicionados nas faces localizadas nas direções Sudoeste e Sudeste (Figura 22), orientações onde ocorre a menor incidência de radiação solar em nossa região, para períodos quentes e frios, conforme atestado pela Figura 30, oriunda do trabalho de Frandaloso (2017).

Figura 30- Radiação solar em superfícies verticais em períodos frios e quentes para latitude 30° (kcal.10⁶dia⁻¹)



Fonte: Aroztegui (1979) *apud* Frandaloso (2017)

Dessa forma investigou-se o alcance da termografia infravermelha em identificá-los mesmo nas condições mais desfavoráveis.

3.2 Metodologia de análise

3.2.1 Levantamento termográfico

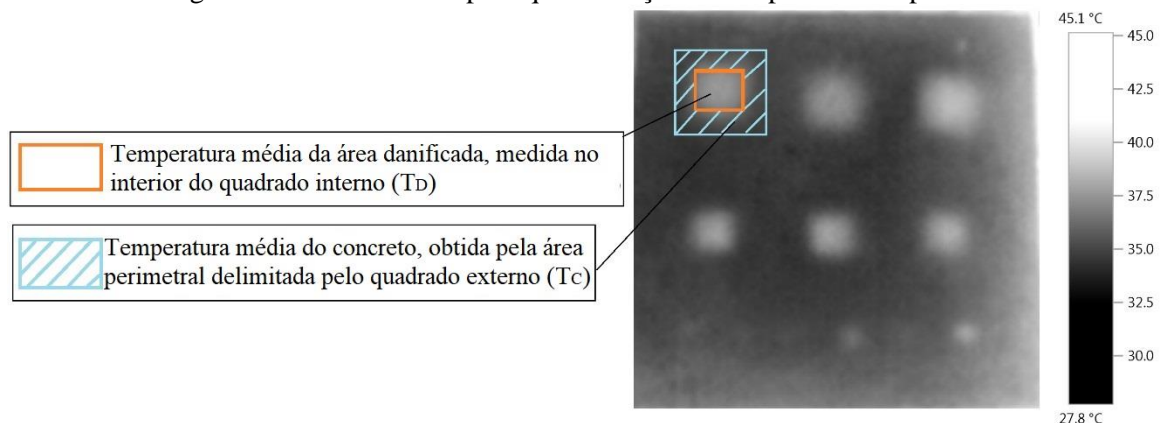
Depois de fabricadas e curadas por 28 dias, foi feita a análise termográfica das amostras, das 07:00 às 21:00 horas nos meses de novembro, fevereiro, março, abril, junho e julho. Antecipa-se que o número de observações das amostras de lajes é maior porque estas foram construídas em outubro de 2018 e ensaiadas de modo piloto em novembro de 2018, sendo estes dados incluídos na presente análise. O levantamento do mês de março foi planejado para a sua última semana, mas por problemas meteorológicos que impossibilitaram a análise, realizou-se a inspeção nos primeiros dias de abril. As lajes possuem 3 amostras, denominadas L1, L2 e L3 (Figura 22). A L1 e a L3 possuem o mesmo planejamento de posição dos danos simulados, e a L2 possui disposição diferente de danos. A amostra de pilar foi construída em janeiro, denominada como P1. Como a tomada de fotos foi feita de hora em hora, cada dia de experimento forneceu 15 observações para cada dano, salvo alguns imprevistos na execução que tornaram o número de observações menores, como a perda de dados em função do mau funcionamento do cartão de memória da câmera termográfica.

Dessa forma tem-se 88 observações para cada defeito das amostras de lajes. Como existem 9 configurações de defeitos em cada amostra de laje e foram construídas 3 amostras, tem-se 2376 observações termográficas. Para o pilar, foram feitas 73 observações para cada defeito do pilar P1. Como existem 10 configurações de defeito no pilar, tem-se, até o momento, 730 dados. Com isso, a totalidade de informações termográficas nas amostras de lajes e pilares é de 3106 observações.

3.2.1.1 Determinação das temperaturas superficiais

Em cada observação feita foram tomadas fotos de todas as superfícies das amostras de lajes e do pilar. Nestas, para cada defeito subsuperficial foram levantadas a temperatura superficial média do concreto (T_C) e a temperatura superficial média do concreto danificado (T_D), conforme visto na Figura 31. A partir destes dois valores foi possível calcular o contraste presente nas áreas de concreto investigadas, parâmetro termográfico que aponta a presença de dano subsuperficial. A obtenção destes valores de temperaturas superficiais, em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), foi feita por meio da análise dos termogramas, utilizando o software da própria câmera TESTO 881-1.

Figura 31- Procedimento para quantificação de temperaturas superficiais



Fonte: Adaptado de Ahlborn e Brooks (2015)

As áreas danificadas são de fácil identificação nos termogramas, devido à diferença de temperatura ser destacada por meio de diferentes cores, sendo cada vez mais nítida à medida que o contraste térmico aumenta. O gradiente térmico é calculado por (AHLBORN; BROOKS,2015):

$$\Delta T = T_D - T_C$$

Equação 7

Onde ΔT representa o contraste obtido pela diferença entre a temperatura média da área de concreto com dano (T_D) e a temperatura média da área de concreto (T_C), ambas representadas em $^{\circ}C$. A temperatura média para concreto danificado é calculada sobre a área que apresenta coloração diferente, com suspeita de delaminação e a temperatura do concreto é tomada como a temperatura média no entorno da área danificada. Dependendo do horário de levantamento, alguns defeitos não foram notados, sendo para estes adotado $T_C=T_D$, resultando, por consequência, em contraste nulo. O tamanho da área para cálculo das temperaturas médias muda conforme o tamanho do defeito analisado. Conforme Tran et al. (2017) esse método tem se mostrado efetivo por diminuir a variabilidade existente em assumir algum ponto isolado como sendo danificado ou não e se assemelha mais com as inspeções práticas onde não se tem certeza sob a existência e a posição e forma exata dos danos.

3.2.2 Análise estatística

Conforme visto no item 2.6, os estudos estatísticos constituem-se de ferramentas de análise de dados que permitem tomar decisões com mais propriedade e segurança. Na presente pesquisa a investigação dos dados é feita através análise qualitativa e quantitativa de todo o levantamento termográfico e de uma análise de regressão linear multivariada para as amostras de lajes. A relação entre as variáveis preditoras e as temperaturas superficiais foi considerada estatística porque envolve percepções instáveis e que podem ter níveis de erros de medida.

Em relação ao problema de pesquisa deste trabalho, a proposta de uma análise de regressão atende ao objetivo de explicar a influência das variáveis preditoras ambientais, de inspeção e de configuração dos danos nas respostas de temperatura superficial do concreto e prever cenários favoráveis para a inspeção. Watase et al. (2015) calcularam os gradientes previstos em seu estudo através da estimativa de dois modelos de regressão múltipla: um para a temperatura superficial do concreto sem danos e um para a temperatura superficial do concreto sob a área danificada. A subtração do valor previsto por essas duas equações forneceu o valor do contraste, parâmetro que determina o grau de detecção de danos em análises termográficas. Para criar e validar o modelo, eles utilizaram leituras de temperatura de sensores instalados em placas de teste de concreto reutilizáveis, com simulação de danos internos, anexadas a pontes reais. Uma abordagem semelhante foi seguida na presente pesquisa. No entanto, o conjunto de dados foi criado usando amostras de pontes de concreto com danos simulados e uma câmera térmica foi usada para as leituras de temperatura. Além disso, além de prever janelas de tempo

favoráveis, esta pesquisa abordou a relação causa-efeito entre as variáveis ambientais e de inspeção com a temperatura da superfície do concreto necessária na inspeção termográfica.

Para análise estatística optou-se por utilizar somente os dados das amostras de lajes. Esta escolha justifica-se pelo fato de que as amostras de pilares possuem variabilidade muito grande em função da orientação solar e do mês do levantamento, decentralizando a relação entre o contraste e as variáveis ambientais na análise. Para o treinamento do modelo estatístico, foram utilizados os dados de temperatura de duas amostras de laje (L1 e L2), enquanto os dados da terceira amostra de laje (L3) foram empregados para validação. Dessa forma, conforme as medições experimentais feitas (item 3.2.1), o tamanho da amostra de treino constitui-se de 1584 observações, distribuídas em 18 configurações de danos e a amostra de validação possui 792 dados, levantados a partir de 9 configurações de danos. Conforme dito em 3.2.1, o levantamento de ambos os conjuntos foi realizado no período das 7:00 às 21:00 horas durante os meses de novembro, fevereiro, março, abril, junho e julho. Esse horizonte de levantamento permitiu que as inspeções experimentassem condições de contorno referentes a dias quentes de verão e frios de inverno.

Para os estudos estatísticos foi utilizado o software RStudio (RSTUDIO TEAM, 2019) que se trata de um software livre da Plataforma R (R CORE TEAM, 2018), com linguagem de programação para procedimentos gráficos e cálculos estatísticos.

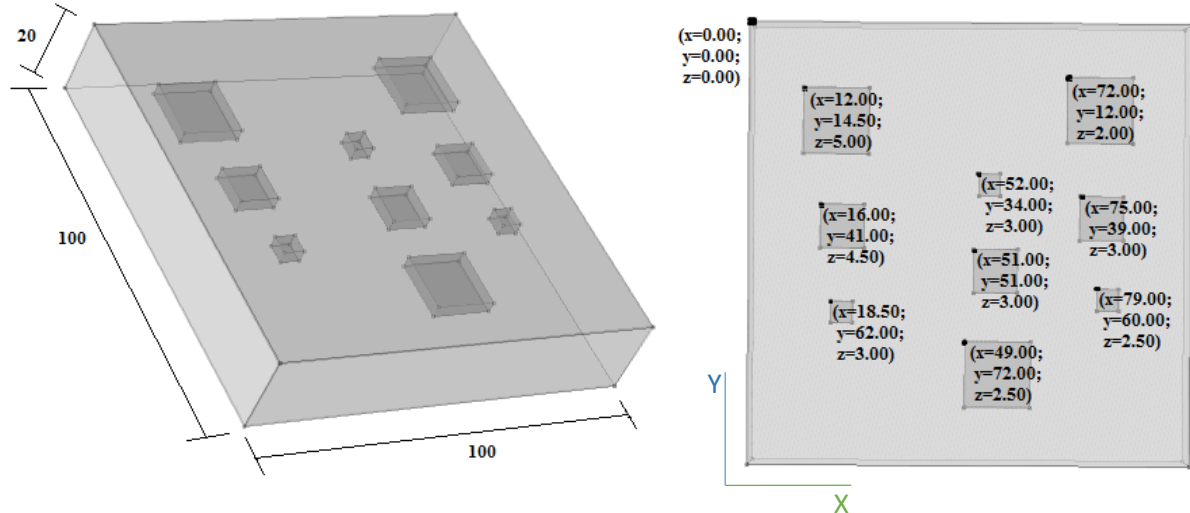
3.2.3 Modelagem numérica

Para a simulação numérica foi utilizado o software COMSOL Multiphysics, Versão 5.2. Foi utilizado especificamente o módulo de transferência de calor por radiação (*Heat Transfer with Surface-to-Surface Radiation*), devido a sua capacidade de modelar carga de radiação térmica solar, variável com o tempo, localização e orientação das amostras. Com essa ferramenta foi possível simular os efeitos da radiação proveniente dos raios do Sol em um domínio computacional, obtendo dados de direção e intensidade de radiação em um determinado local geográfico, para diferentes horários do dia e intervalos de tempo. Este recurso é deveras importante para a análise numérica em âmbito de termografia passiva. Em relação a análise térmica, trata-se de uma análise tridimensional, não linear e transiente.

3.2.3.1 Geometria do modelo

A modelagem foi feita de maneira gráfica, por meio de sólidos, que representam as amostras reais de concreto e de danos nas mesmas dimensões da análise experimental, ou seja, uma amostra de laje de 100x100x20 centímetros de comprimento, largura e altura, respectivamente, com danos de diferentes tamanhos sob sua superfície. A Figura 32 mostra a amostra de laje simulada, juntamente com as coordenadas dos danos, conforme investigação *in loco*, descrita no item 4.1, onde x representa a coordenada horizontal, y representa a coordenada no sentido vertical e z representa a profundidade do dano. A orientação solar também foi configurada conforme o experimento, onde o eixo x representa a direção Leste/Oeste e o eixo y representa a direção Norte/Sul.

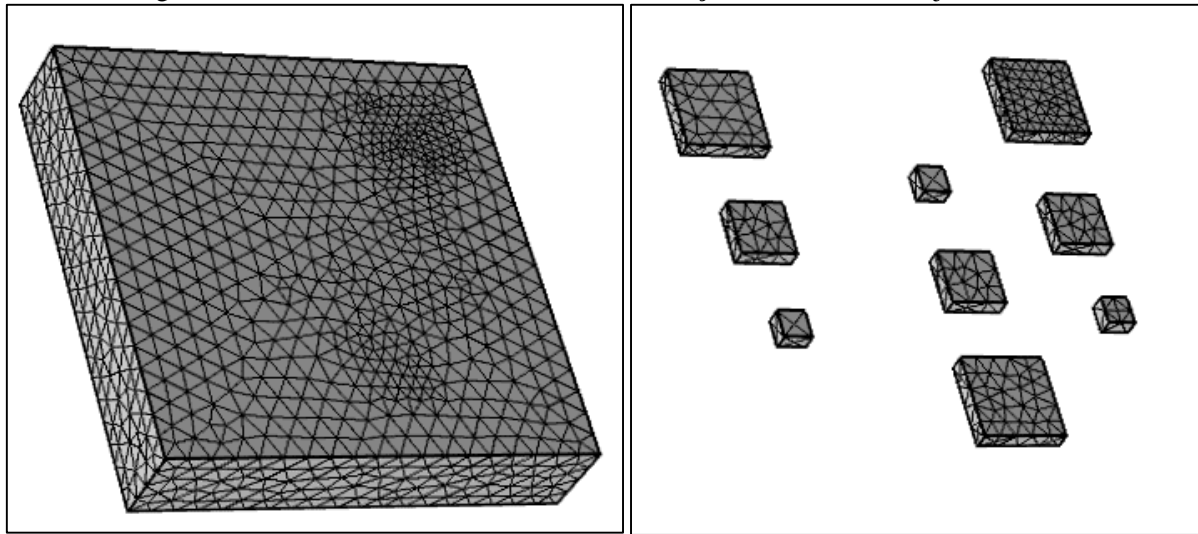
Figura 32- Características geométricas da amostra de laje simulada



3.2.3.2 Malha aplicada

O modelo numérico da amostra de laje de ponte L1 foi dividido em uma malha de 22411 elementos tetraédricos, de forma adaptativa, isto é, de acordo com o tamanho e o posicionamento de cada sólido. O tamanho de elemento denominado “*Finer*” foi utilizado, isto é, o terceiro mais fino dentro de 9 níveis disponibilizados pelo software. Nesta divisão, as dimensões dos elementos da malha variaram entre 4,0 milímetros e 5,5 centímetros.

Figura 33- Malha “Finer” utilizada na discretização da amostra de laje simulada



Para analisar a adequação da malha utilizada fez-se um teste de discretização, utilizando os modelos de malha pré-definidas do software COMSOL Multiphysics. O computador utilizado para análise foi um Notebook Dell Inspiron 14, com processador Intel® Core™ i5-4210U, com memória RAM de 4.00 Gigabytes. Foi levado em consideração o tamanho e o n° de elementos atribuídos a cada categoria de malha, bem como a mínima qualidade dentre os seus elementos, o tempo de análise computacional para o estudo numérico e a temperatura em um ponto padronizado, sob o concreto com presença de delaminação e sobre o concreto sem danos. A Tabela 1 mostra os resultados da análise.

Tabela 1- Teste de convergência de malha

Nome da malha	Intervalo de tamanho da malha	Número de elementos	Qualidade mínima dos elementos	Temperatura (°C)	Tempo de processamento
<i>Extremely Coarse</i>	7cm-50cm	613	0,0006	44,54	27s
<i>Extra Coarse</i>	5,4cm-30cm	924	0,0004	45,62	33s
<i>Coarser</i>	4cm-19cm	1833	0,0107	45,64	37s
<i>Coarse</i>	2,8cm-15cm	3863	0,0048	45,69	54s
<i>Normal</i>	1,8cm-10cm	6194	0,0253	45,71	1min. 37s
<i>Fine</i>	1cm-8cm	10138	0,0241	45,72	2min. 16
<i>Finer</i>	4mm-5,5cm	22411	0,1645	45,73	5min. 16s
<i>Extra Fine</i>	1,5mm-3,5mm	79741	0,0827	45,74	19min. 22s
<i>Extremely Fine</i>	0,2mm-2cm	418742	0,1781	NA*	NA*

*Não foi possível executar a análise neste tipo de computador, devido às limitações de memória

Não existe um valor pré-determinado que defina a qualidade que a malha deva possuir, pois a avaliação de qualidade depende do analista e também dos requerimentos de precisão da análise. Porém, para a maioria das aplicações, elementos com qualidade abaixo de 0,1 são considerados limitados (GOTHÄLL, 2017). Em adição, quanto menor for o tamanho de malha utilizado na análise e mais densa for sua discretização (maior n° de elementos), maior é a precisão dos resultados alcançados (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Levando em conta estas observações e o custo computacional para cada tamanho de malha, conclui-se que a escolha pela malha adaptativa “*Finer*” foi coerente para a presente pesquisa.

3.2.3.3 Propriedade dos materiais

As propriedades dos materiais foram atribuídas aos elementos referentes ao concreto moldado em loco e aos defeitos simulados com isopor, complementadas, quando necessário, por referências técnicas na área de estudo e trabalhos similares anteriores (CASTANEDO et al., 2017; HIASA et al, 2018; CENGEL; GHAJAR, 2012). Os valores para tais propriedades são vistos na Tabela 2.

Tabela 2- Propriedades dos materiais utilizados na simulação

Propriedade do material	Unidade	Concreto	Isopor
Densidade	Kg/m ³	2400	25
Calor Específico	J/(Kg.K)	1008	1130
Condutividade térmica	W(m.K)	Dependente da temperatura	0.027
Absortividade	-	0.6	-
Emissividade	-	0.9	-

3.2.3.4 Condições de contorno

Temperatura ambiente, radiação solar e convecção foram consideradas como condições de contorno para simulação de transferência de calor no modelo elementos finitos. A principal fonte de calor foi a radiação solar, que varia de acordo com a orientação do Sol (ângulo zenital e elevação solar) sobre a simulação. Este parâmetro foi calculado automaticamente por uma ferramenta própria do software a partir da longitude, latitude, fuso horário, data e hora do levantamento. Para a presente simulação, estas informações foram configuradas como: longitude de -52.386283, latitude de -28.226750, fuso horário (GMT (*Greenwich Mean Time*));

-3 horas. A localização diz respeito ao local das amostras, sendo que as informações de coordenadas foram obtidas através do software Google Earth Pro.

A segunda condição de contorno diz respeito à transferência de calor por convecção. Kumar and Mullick (2010) sumarizaram em seu trabalho estudos anteriores que estimaram através de resultados experimentais equações para obtenção do coeficiente de transferência de calor por convecção em função da velocidade do vento e compararam com seu próprio estudo. Seus resultados (Equação 9) são próximos aos resultados obtidos por Sharples e Charlesworth (1998), vista na Equação 8:

$$h_w = 6,5 + 3,3V_w; (W/m^2.K) < 6 \text{ m/s} \quad \text{Equação 8}$$

$$h_w = 10,03 + 4,687V_w; (W/m^2.K) < 5 \text{ m/s} \quad \text{Equação 9}$$

Onde h_w representa o coeficiente de transferência de calor por convecção e V_w representa a velocidade do vento. Na presente pesquisa, a velocidade máxima do vento durante os dias de levantamento termográfico foi próxima a 6 m/s. Baseado nas equações acima e na máxima velocidade do vento registrada, adotou-se para todas as áreas expostas um coeficiente de transferência de calor por convecção constante de 35 W/m².K. Hiasa et al. (2017b e 2018) utilizaram abordagem similar para cálculo do coeficiente de convecção para simulação numérica termográfica.

A terceira condição de contorno diz respeito à temperatura ambiente. Em termos de clima, a variação diurna da temperatura ambiente é calculada por sua média ao longo de muitos anos e mudanças não periódicas de temperatura se compensam (ESMAN ET AL, 2018), sendo assumido que a variação diurna da temperatura ambiente (T_{amb}) segue uma distribuição periódica sinusoidal simples, de 24 horas, em função da temperatura média diária (COMSOL, 2019):

$$T_{amb}(t) = T_{avg} + \Delta T \cos\left(2\pi \frac{t-14}{24}\right) \quad \text{Equação 10}$$

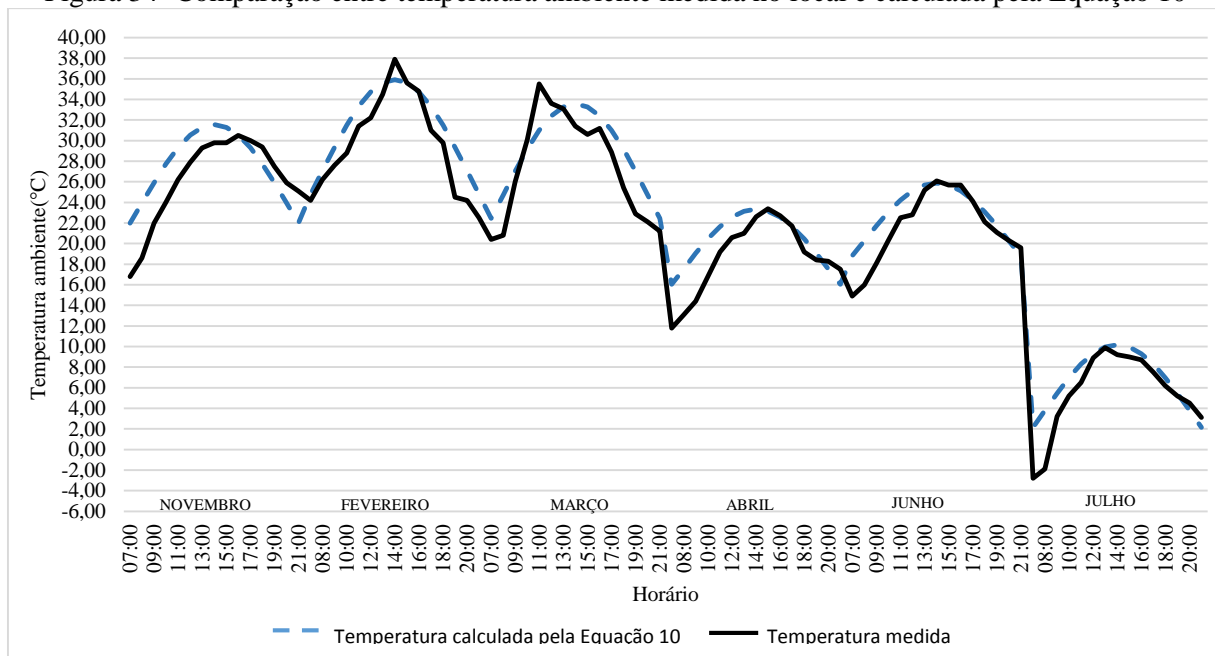
Onde T_{avg} e ΔT são parâmetros correspondentes, respectivamente, a temperatura média diária e metade da variação de temperatura diurna. A variável t representa o tempo e é expresso em horas. Esses dados foram configurados conforme registro feito no local durante o levantamento (Tabela 3 e Apêndice 2), e completados pelos dados da estação meteorológica mais próxima (INMET, 2019). O parâmetro referente à radiação solar foi configurado de acordo com os valores máximos registrados em cada dia de levantamento.

Tabela 3- Dados meteorológicos utilizados na simulação

Mês	Data	Radiação Solar (W/m ²)	Temperatura Média (°C)	Metade da variação diária da temperatura(°C)
Novembro	22/11/2018	1085,55	23.95	7.6
Fevereiro	23/02/2019	876,94	27.08	8.85
Março	03/04/2019	751,11	24.73	8.85
Abril	18/04/2019	797,50	17.55	5.8
Junho	14/06/2019	521,11	20.28	5.6
Julho	06/07/2019	675,28	3.81	6.35

A Figura 34 mostra a comparação entre as temperaturas levantadas em cada horário durante as inspeções com as temperaturas calculadas pela Equação 10, utilizada no software.

Figura 34- Comparação entre temperatura ambiente medida no local e calculada pela Equação 10



Apesar de algumas diferenças, a equação ajustou-se de maneira adequada à oscilação de temperaturas diárias, representando corretamente a variação ao longo dos dias e meses. Ressalta-se que foi escolhido este modelo de oscilação diária de temperatura ambiente ao invés da entrada pontual do valor de temperatura ambiente medido cada horário tendo em vista a aplicabilidade prática do método. O profissional pode, através da previsão meteorológica, obter rapidamente os dados de T_{avg} e ΔT e, inserindo na Equação 10 no software, realizar apenas uma sequência de cálculos para todo o dia analisado, tornando a simulação e a análise dos resultados mais rápida e prática. Esta equação foi utilizada também no trabalho de Esman et al. (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Verificação das profundidades dos danos simulados

Conforme abordado no item 3.1.1, durante a execução das amostras os danos subsuperficiais simulados movimentaram-se, modificando suas profundidades planejadas. Com isso, após ao término do horizonte de medições termográficas, foram realizados ensaios destrutivos para verificar a profundidade real dos danos investigados. Para a amostra de laje L1 foi utilizada uma serra manual para retirar o concreto sob os defeitos, pois além da profundidade, pretendeu-se levantar as coordenadas de cada dano, visto que essa amostra seria simulada por meio de elementos finitos. O processo de investigação e de obtenção dos resultados para a amostra de laje L1 pode ser visto na Figura 35. As coordenadas da amostra L1 foram detalhadas no item 3.2.3.1, referente à geometria utilizada na análise numérica da inspeção termográfica desta amostra.

Figura 35- Ensaio de verificação de profundidade dos danos usando serra manual com disco de concreto

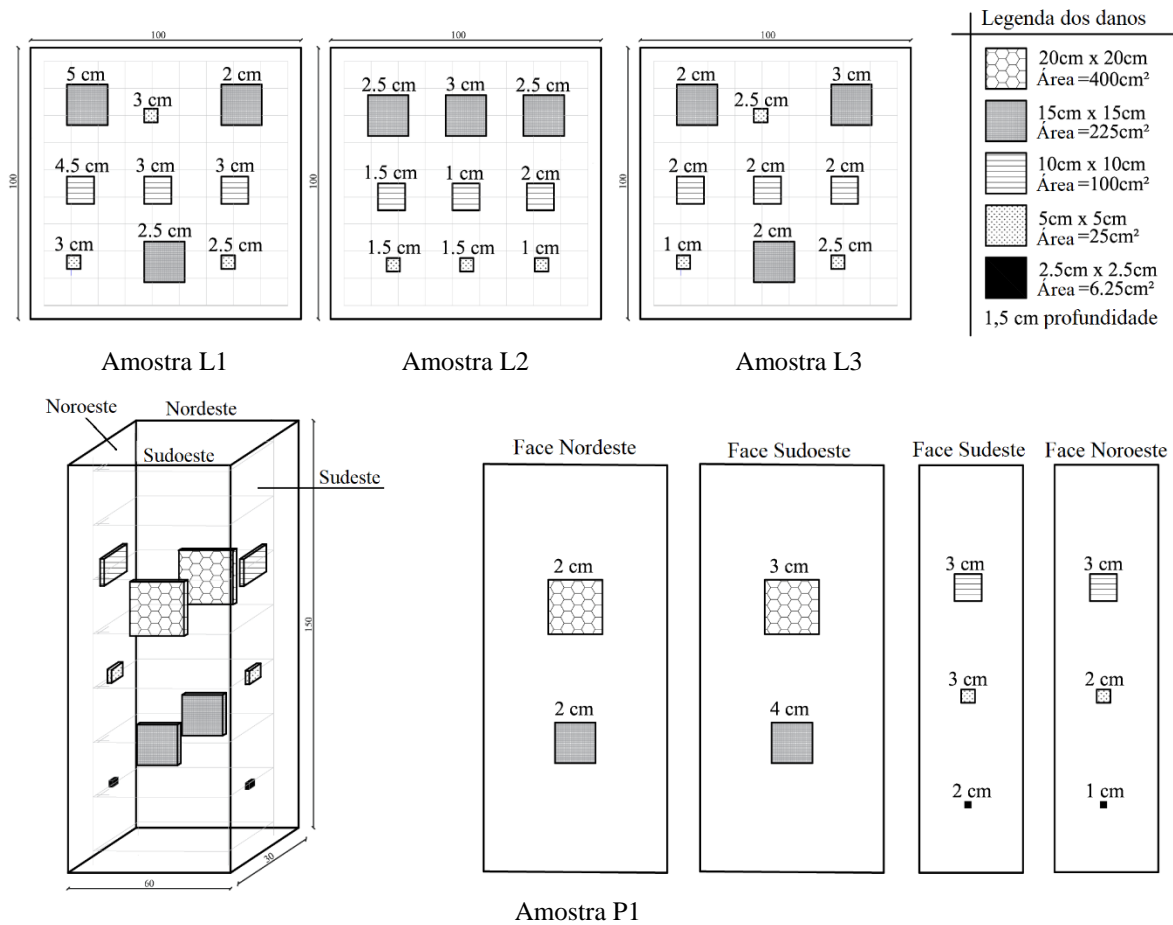


Nas demais amostras de lajes e pilares utilizou-se uma serra copo para investigar a profundidade exata de cada dano, de modo a obter dados para realizar a análise estatística com precisão. A Figura 36 mostra o processo de extração utilizando a serra copo e a Figura 37 mostra as profundidades levantadas (para cada dano).

Figura 36- Ensaio de verificação de profundidade dos danos com serra copo



Figura 37- Profundidade exata dos danos simulados



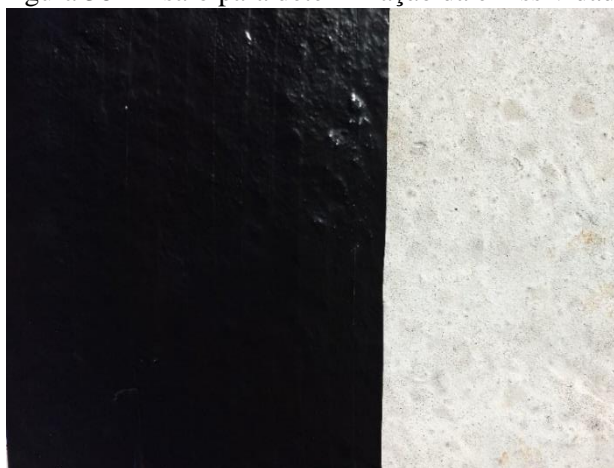
Os ensaios destrutivos para verificação do posicionamento dos danos após a análise termográfica foram importantes para a interpretação dos resultados pois, em sua grande maioria,

as profundidades diferem daquelas planejadas inicialmente (Figura 22). Com o levantamento das profundidades exatas conseguiu-se realizar um estudo mais confiável e preciso.

4.2 Definição da emissividade das amostras

A emissividade foi determinada conforme as recomendações da NBR 16485 (ABNT, 2016). Uma fita isolante, com emissividade conhecida ($\epsilon=0,97$) foi colada sobre uma porção de concreto de uma das amostras (Figura 38), por onde permaneceu por aproximadamente uma hora, para que entrasse em equilíbrio térmico com o concreto.

Figura 38- Ensaio para determinação da emissividade



Após este intervalo de tempo, ajustou-se a emissividade do termovisor para o valor de emissividade conhecido da fita isolante, fazendo a medição de temperatura de um ponto sobre a mesma. Depois de registrada esta temperatura, moveu-se o termovisor para a superfície de concreto da amostra e ajustou-se gradualmente o valor de emissividade até alcançar o mesmo valor de temperatura medido na fita isolante.

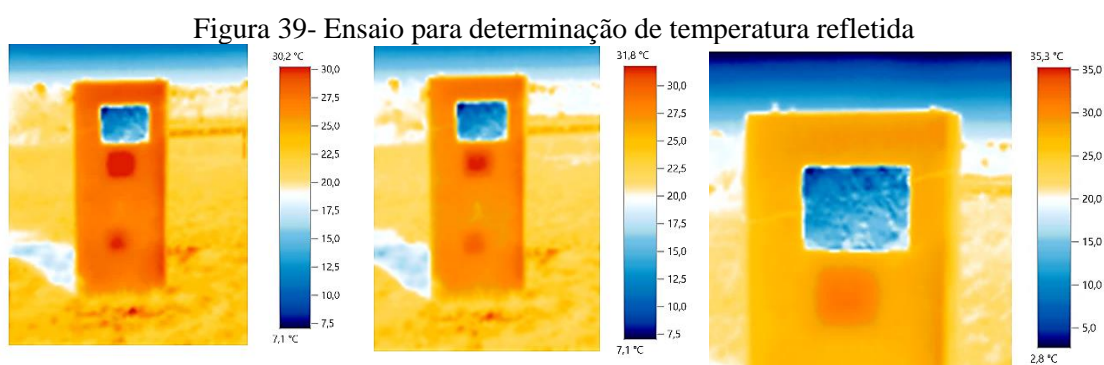
O procedimento foi repetido três vezes, resultando em um valor de emissividade de $\epsilon_{\lambda}=0,90$, adotado como emissividade constante para as amostras de concreto.

4.3 Temperatura refletida

Conforme descrito no item 2.4.3.3, se existirem objetos com alta temperatura ao entorno da amostra inspecionada, as radiações emitidas por estes podem interferir no levantamento termográfico do objeto alvo da inspeção. O presente estudo buscou posicionar as amostras em

local livre da presença de objetos externos potencialmente interferentes, porém, por questão de prevenção, optou-se por realizar a medição de temperatura aparente refletida.

O procedimento seguiu as orientações da NBR 16292 (ABNT, 2014), utilizando o método do refletor, que consiste basicamente na medida da temperatura sobre um objeto de alta refletância e baixa emissividade. Sendo assim, a temperatura observada neste objeto será igual a temperatura refletida pelo entorno do ensaio. Um pedaço de papelão coberto com papel alumínio amassado e depois alisado, com a parte brilhante direcionada ao ambiente foi utilizado para a medida da temperatura refletida. Esse procedimento garante a reflexão difusa. Este dispositivo foi posicionado próximo à uma das amostras analisadas, tomando o cuidado para que estivesse protegido de raios solares diretos. Em seguida ajustou-se a emissividade da câmera para o valor de 0,98 e a temperatura refletida para o valor de 0. Posicionou-se a câmera na mesma direção que são feitos os levantamentos termográficos, realizando 3 medições, a fim de calcular a temperatura refletida pela média das mesmas.



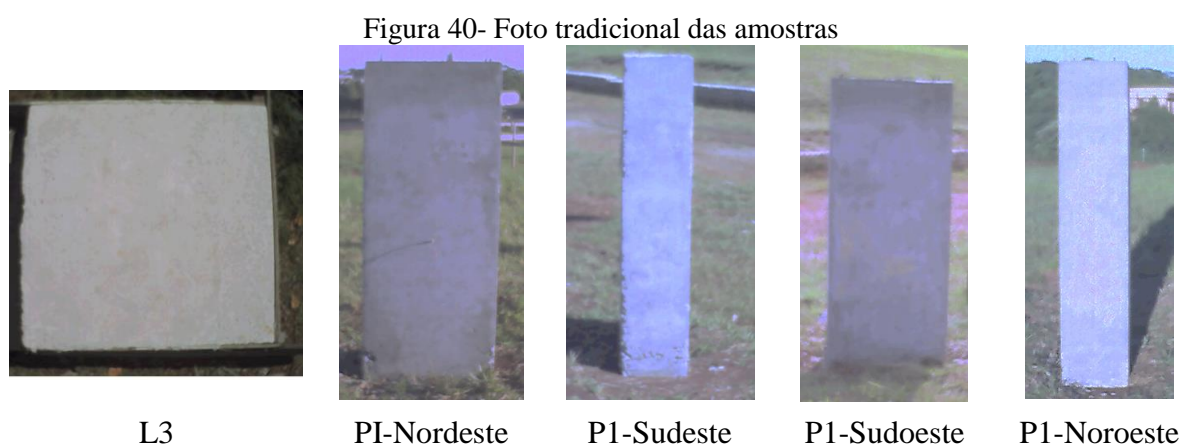
Conforme esperado, não foram detectadas temperaturas anormais, visto que o entorno não possui objetos que poderiam causar uma temperatura refletida discrepante. A temperatura ambiente no horário da tomada de fotos era de 16,5°C, muito parecida com aquela detectada no refletor. Dessa forma, com base nos resultados do ensaio e a fim de facilitar a execução do levantamento, optou-se por adotar em todos os registros termográficos o valor da temperatura refletida igual ao valor da temperatura ambiente.

Outros autores (SILVA, 2017; BRIQUE, 2016; MARINETTI; CESARATTO, 2016; USAMENTIAGA et al., 2013;) também estudaram e analisaram este parâmetro em amostras sujeitas ao aquecimento solar (termografia passiva), adotando o valor da temperatura aparente refletida equivalente à temperatura ambiente do momento. Esta adoção justifica-se pelo motivo de que que materiais com alta emissividade ($\epsilon \geq 0,8$) tem baixa refletividade, sendo que uma

pequena variação no parâmetro de temperatura refletida não traz grande prejuízo aos resultados quando não existem no entorno objetos potencialmente interferentes.

4.4 Análise qualitativa dos ensaios termográficos

A observação direta dos termogramas permitiu uma análise rápida e prática dos elementos sob inspeção. A câmera termográfica registrou duas imagens a cada tomada de foto: uma imagem visual tradicional e uma imagem termográfica, com os valores de temperatura. Para fins de comparação, a Figura 40 mostra as amostras vistas pela foto tradicional de inspeção, onde não é possível apontar qualquer defeito subsuperficial.

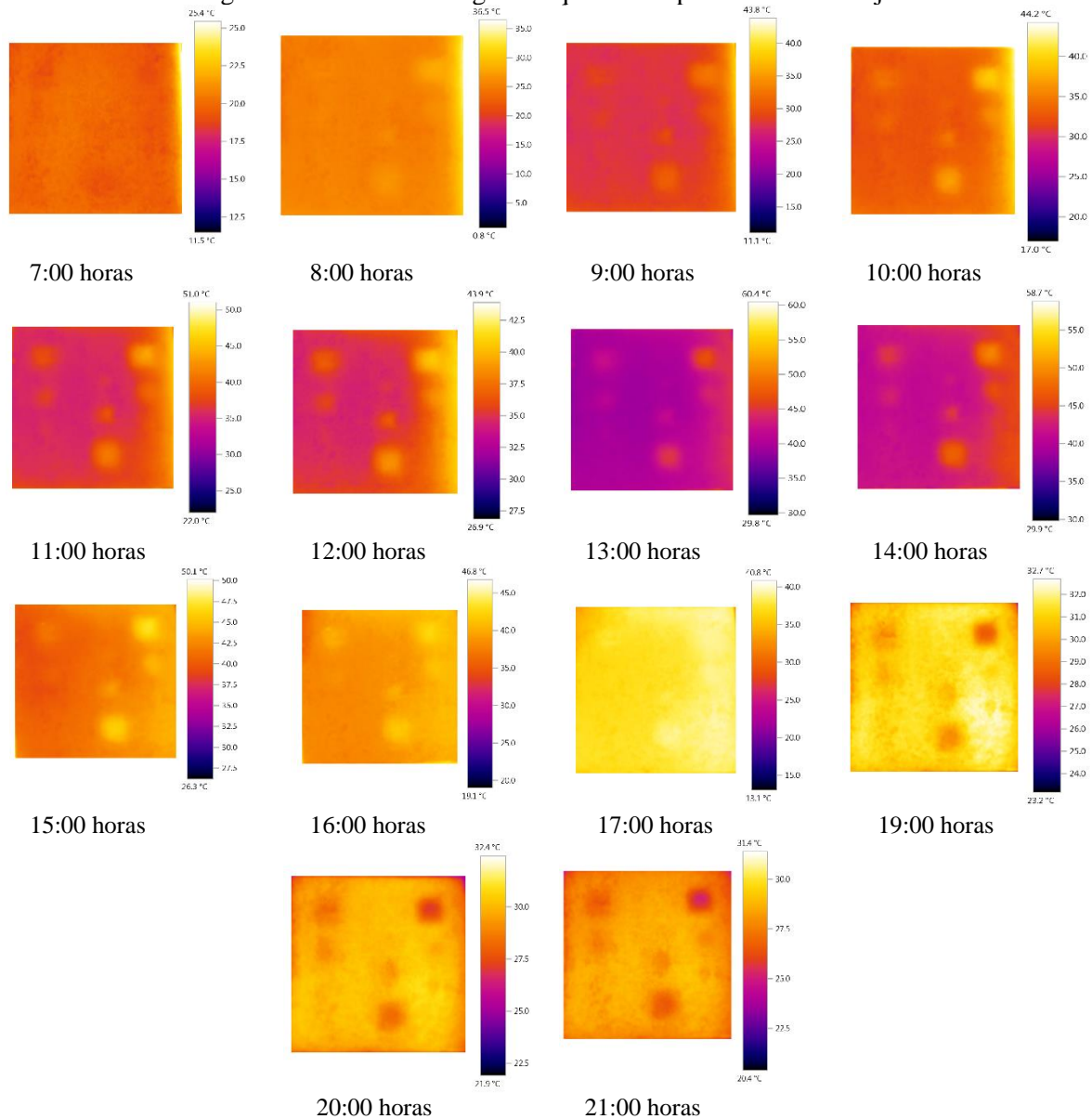


Em seguida são mostrados os termogramas resultantes das inspeções feitas durante o mês de fevereiro, das 7:00 às 21:00 horas. Por ser um dos meses mais quentes do verão, os níveis de radiação emitido possibilitaram um entendimento satisfatório dos princípios da inspeção com termografia. Procurou-se uniformizar a paleta de cores para melhor visualização dos danos a cada horário.

4.4.1 Amostras de lajes

A Figura 41 exibe os termogramas obtidos ao longo do levantamento feito durante o intervalo das 7:00 às 21:00 horas na laje L1, com defeitos posicionados entre 1 e 5 centímetros de profundidade (item 4.1). Observa-se que existem horários em que é possível identificar todos os defeitos simulados.

Figura 41- Análise termográfica qualitativa para amostra de laje



Durante o dia, o contraste é maior nos períodos entre 10:00 e 16:00 horas, horários em que há maior incidência solar em períodos de verão. Os danos são vistos nos termogramas com temperatura maior do que o concreto ao seu entorno. Isso ocorre porque a condutividade térmica do ar, simulado na pesquisa com isopor, é menor que a do concreto, fazendo com que energia fique retida devido à interrupção de transferência de calor onde o ar está presente, resultando em temperaturas maiores na superfície do concreto. Os resultados são convergentes aos de Washer et al. (2009, 2010a, 2010b, 2013) e Jankö, Březina e Grošek (2017), visto que o período em que se pode identificar danos com maior facilidade encontra-se entre 5 e 9 horas após o nascer do Sol, com contraste térmico elevado próximo ao período do meio-dia. Também pode-

se notar que defeitos de menor área e maior profundidade demoram mais a aquecer-se, sendo vistos apenas nos termogramas após ao meio dia.

No período da noite, os contrastes também são notórios. Ocorre o fenômeno inverso, devido as mesmas propriedades térmicas dos materiais, onde o fluxo de calor é inverso e as áreas com presença de danos entram em equilíbrio térmico com o ambiente mais rápido e trocam calor como ambiente em menor intensidade do que a superfície de concreto normal, apresentando-se no termograma com valores de temperatura superficial menores do que suas superfícies envolventes. Estes resultados são convergentes com o experimento de Rocha, Póvoas e Santos (2018).

Outro aspecto relevante a ser observado é a existência de períodos de intercâmbio entre os ciclos de aquecimento e resfriamento onde ocorre um equilíbrio de temperaturas em todo o corpo de prova e os danos não são notados. Esta situação pode ser vista nos horários das 07:00 e 17:00 horas da Figura 41. Em inspeções práticas utilizando o método da termografia infravermelha passiva é ideal que esses horários sejam evitados, pois apesar da presença de danos, não é possível detectá-los com clareza. Logo em seguida os ciclos de aquecimento (durante o dia) e arrefecimento (durante a noite) se iniciam e os contrastes são notados novamente. Hiasa et al. (2018) também apontaram em seu estudo a dificuldade de identificação de danos em períodos de equilíbrio térmico.

As demais amostras de laje com danos (L2 e L3) apresentaram comportamento similar. Os resultados destas, juntamente com o levantamento feitos nos meses de novembro, março, abril, junho e julho serão apresentados graficamente no item referente a análise quantitativa.

4.4.1.1 Perfis de temperatura

Os perfis vistos na Figura 42, traçados diretamente sobre os termogramas registrados às 12:00 e às 21:00 horas, permitem visualizar de maneira mais nítida o contraste entre as áreas com e sem danos. Na Figura 42a e Figura 43a identifica-se o contraste que ocorre durante o dia, onde as áreas danificadas apresentam temperatura superior a área de concreto ao seu entorno. No período da noite, em virtude da ausência de luz solar, a transferência de calor parte do corpo aquecido em direção ao ambiente. Dessa forma, a emissão de radiação é mais intensa por parte do concreto sem danos, que possui espessura e condutividade térmica maior, resultando em um perfil onde os danos são identificados pelas temperaturas mais baixas que seu entorno (Figura 42b e Figura 43b).

Figura 42– Danos observados na análise termográfica de L3: a) Durante o dia b) Durante a noite

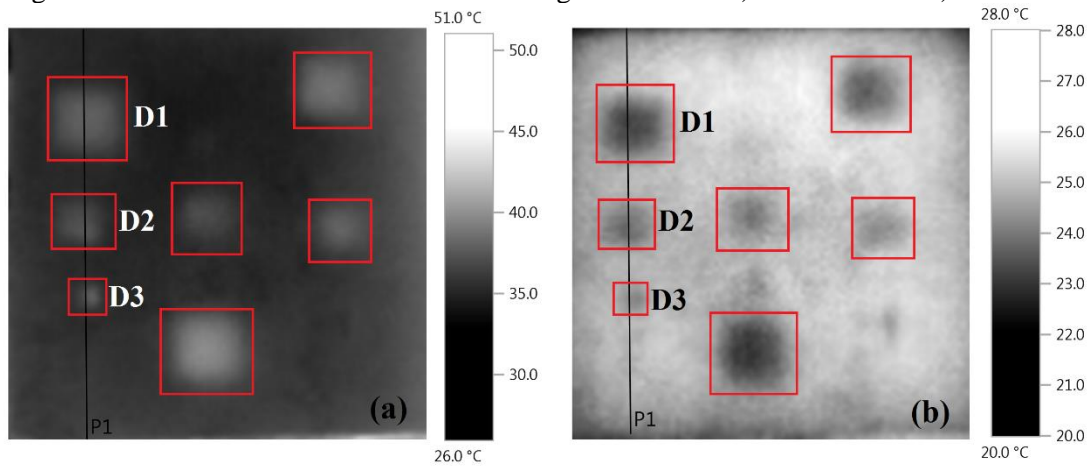
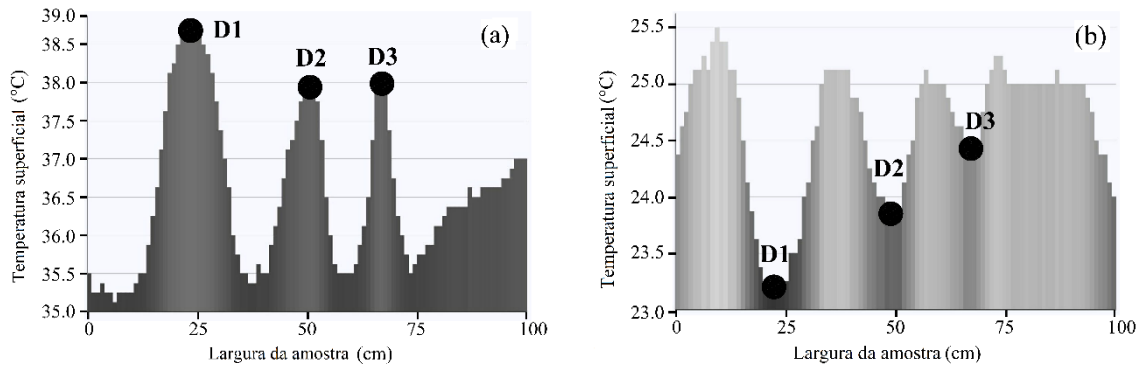


Figura 43– Perfil termográfico para os danos registrados na Figura 42: a) Durante o dia b) Durante a noite



Conforme visto na Figura 22, os defeitos D1 e D2 têm uma área de 225 cm² e 100 cm², respectivamente, e estão ambos posicionados a 2 cm de profundidade. Das figuras acima, percebe-se que um defeito de maior área aquece e resfria mais rapidamente do que os danos que possuem uma área menor. Isso é mostrado na Figura 42a e na Figura 43a para períodos de aquecimento, onde D1 aparece com temperatura maior que D2, e na Figura 42b e Figura 43b para períodos de resfriamento, onde o defeito de área maior tem uma temperatura mais baixa que o defeito de área pequeno. O defeito D1 também é observado mais claramente quando comparado com D2 nos termogramas da Figura 42a e Figura 42b. Isso é justificado pela quantidade de calor retido nos danos, onde o ar preenche a área atuando como isolante térmico, limitando a transferência de calor através do concreto. À medida que a área da delaminação aumenta, a quantidade de ar retido aumenta e o concreto acima da delaminação apresenta uma diferença de temperatura mais alta, aumentando a detecção de danos. O dano D3 aparece sutilmente, mesmo localizado a uma profundidade menor que os defeitos D1 e D2, devido aos mesmos fenômenos, ou seja, possui uma área menor retendo menor quantidade de energia.

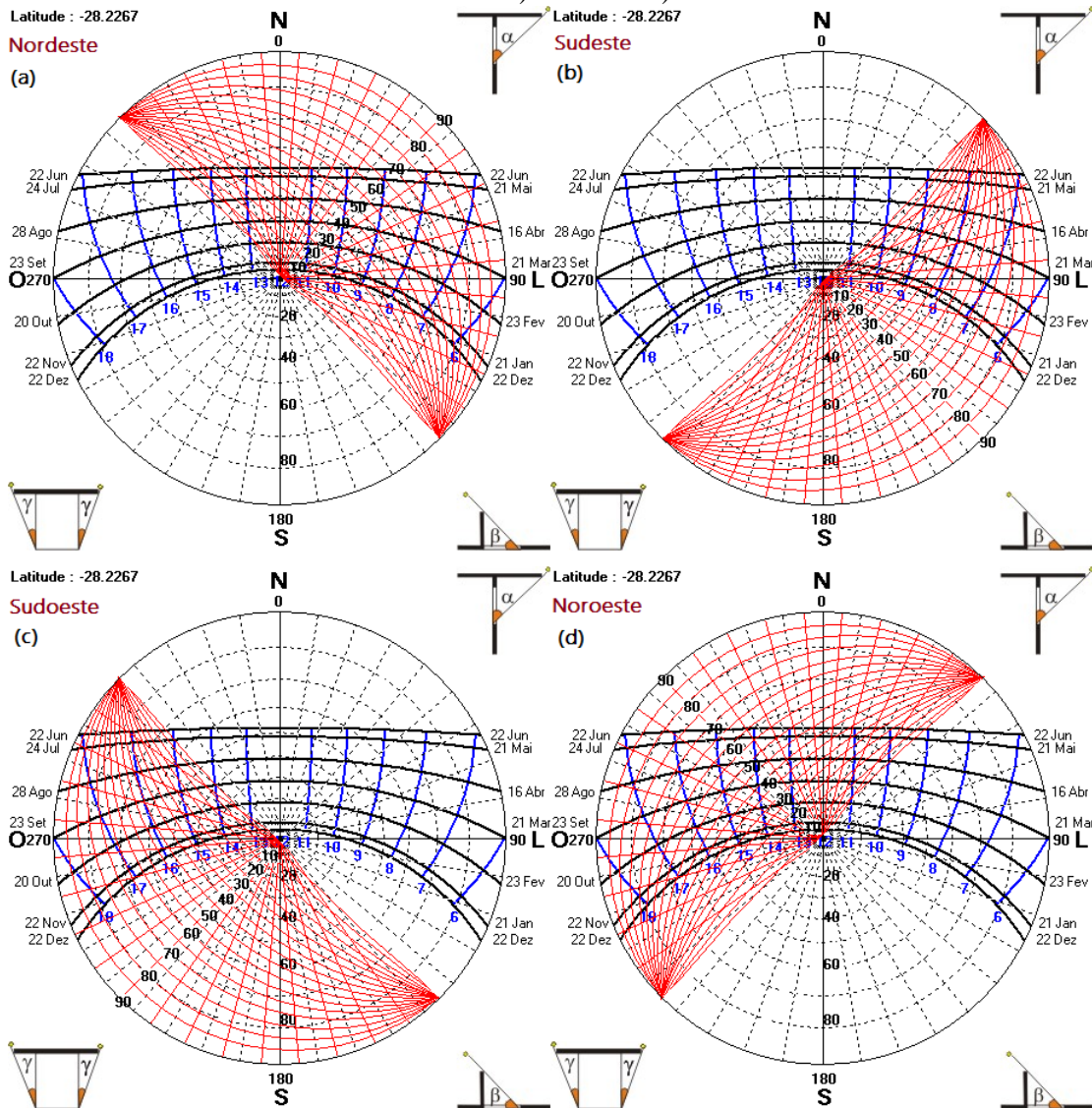
Assim, pequenas áreas delaminadas são de difícil identificação. Hiasa et al. (2017b) e Tran et al. (2017) abordam uma análise semelhante e também atestaram que a área de delaminação é o parâmetro mais influente para a detectabilidade de danos, em relação ao tamanho da delaminação, para inspeções termográficas.

4.4.2 Amostra de pilar

A análise do pilar difere da análise das lajes pois deve ser considerada, além do horário de tomada das imagens, a orientação solar da face inspecionada. Conforme visto no item 2.4.3.5 referente à geometria solar, dependendo da orientação geográfica do pilar em estudo este receberá radiação solar direta em períodos diferentes do dia. Além disso a fonte de aquecimento solar possui trajetórias diferentes para cada dia do ano, sendo variável a quantidade de radiação incidente nas faces dos pilares com o passar dos meses. A análise temporal, comparando os resultados termográficos dos diferentes meses, será feita graficamente, no item de análise quantitativa. Neste item faremos a análise em relação às diferenças de aquecimento entre as faces dos pilares ao longo dia, ilustrando os resultados obtidos no mês de fevereiro.

A carta solar para a latitude referente à cidade de Passo Fundo (Figura 44) foi utilizada para melhor entendimento da radiação solar atuante nos pilares. O pilar está posicionado conforme previsão metodológica (item 3.1.3). Logo, o transferidor, representado pela área vermelha na figura, posicionado sobre a carta solar com ângulo de 45° representa os horários de irradiação solar em que a face Nordeste está exposta. Similarmente o ângulo de 135° representa a irradiação na face Sudeste, o ângulo de 225° a irradiação na face Sudoeste e o ângulo de 315° mostra os horários do dia e a trajetória solar ao longo dos meses para a face com orientação Noroeste.

Figura 44- Trajetória solar nas diferentes faces das amostras de pilares: a) Face Nordeste b) Face Sudeste c) Sudoeste d) Noroeste

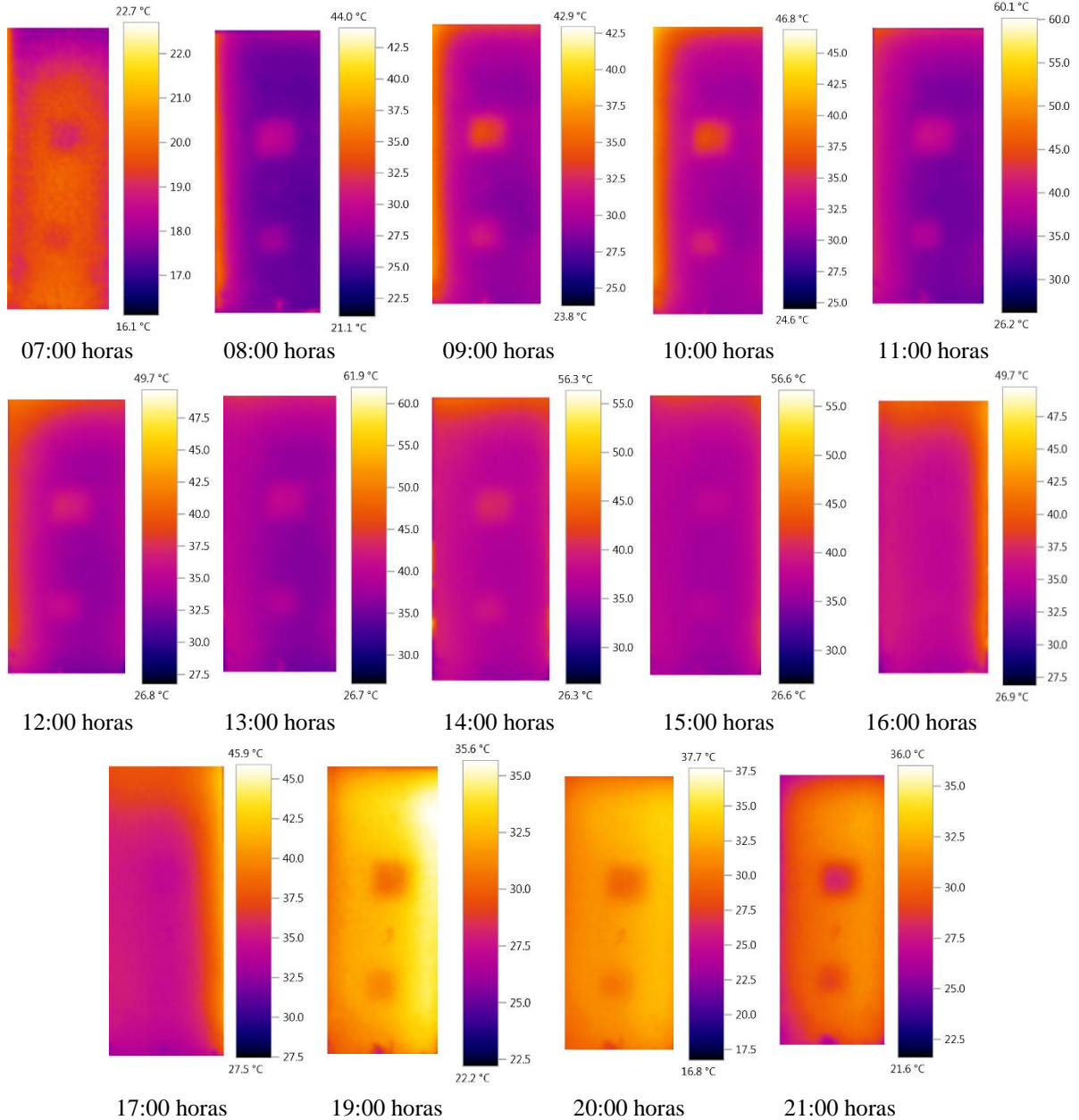


Fonte: LabEEE (2009)

A Figura 45 mostra as observações para a amostra de pilar P1, em sua orientação Nordeste. Nesta face, os dois defeitos estavam posicionados a 2 centímetros de profundidade (Figura 37). De acordo com a carta solar do local analisado, no mês de fevereiro, esta face recebe irradiação solar desde o amanhecer até, aproximadamente, às 13:00 horas, intervalo de tempo diurno em que os termogramas demonstram contrastes com maior destaque entre as áreas de concreto com e sem danos subsuperficiais, permitindo a identificação dos defeitos. Após este período, sem radiação solar direta, esta face começa seu período de resfriamento, as temperaturas superficiais e o contraste diminuem e as 17:00 horas a amostra está muito próxima de um estado de equilíbrio térmico, onde os danos já não podem ser identificados apenas de

forma visual. No período noturno o ciclo de resfriamento se intensifica e os danos podem ser percebidos novamente, agora com temperatura inferior ao concreto ao seu entorno.

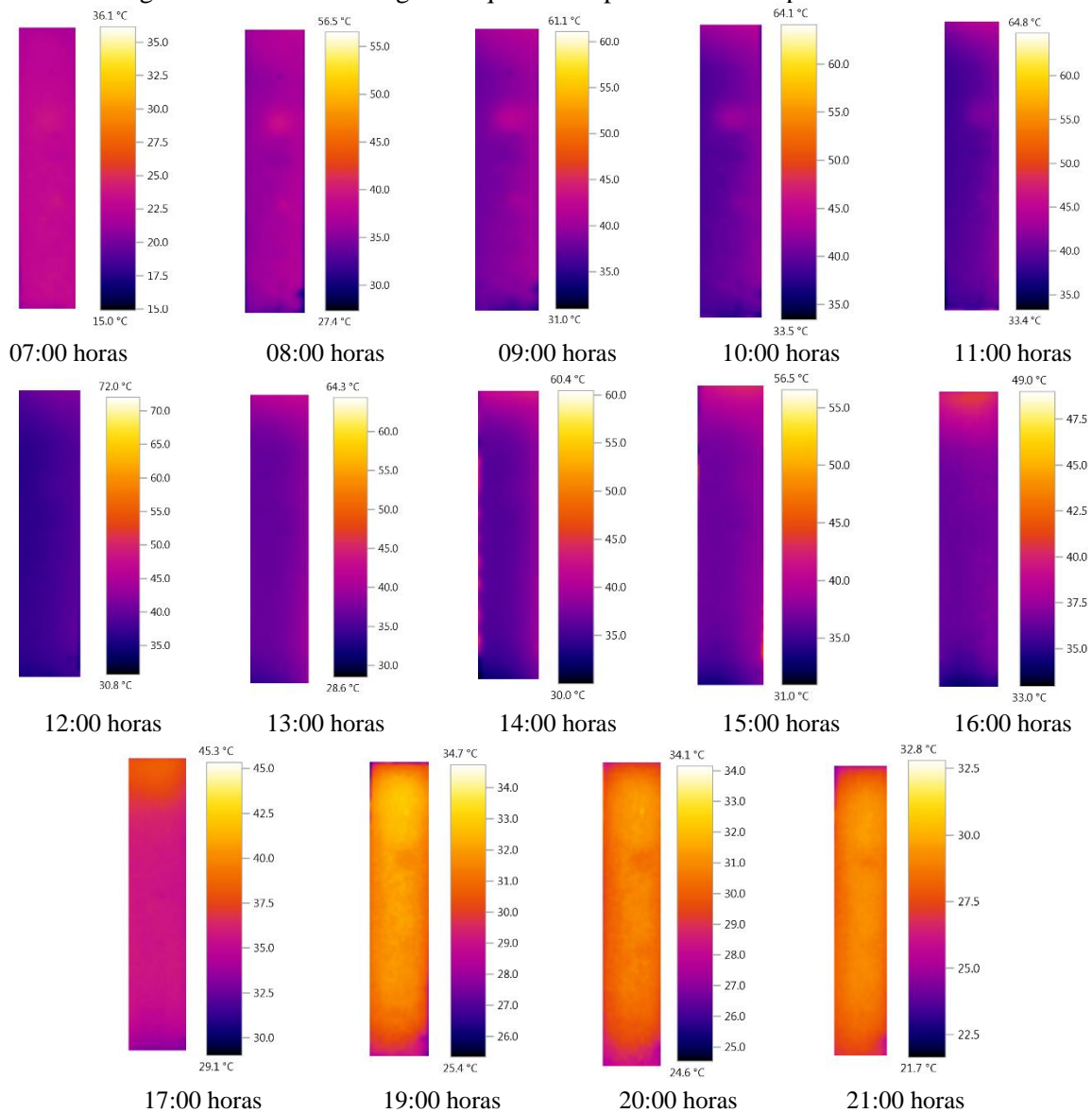
Figura 45- Análise termográfica qualitativa para amostra pilar na face Nordeste



Nota-se também que o maior dano simulado (20x20 cm) apresenta contraste mais nítido quando comparado ao menor defeito (15x15 cm), mesmo que nessa face os dois danos estejam posicionados na mesma profundidade. Isso ocorre devido a área do primeiro ser maior, fazendo com que o fluxo de calor retido no dano seja maior durante o dia e dissipe-se de maneira mais rápida durante a noite, resultando em contrastes mais notáveis, conforme notado para as lajes no item anterior.

A Figura 46 mostra as observações para a amostra de pilar P1, em sua orientação Sudeste, no mês de fevereiro. Nesta face, os defeitos estavam posicionados em 3, 3 e 2 centímetros de profundidade. Os contrastes de maior notoriedade ocorrem nas primeiras horas da manhã, coincidindo com os horários de incidência de radiação solar direta mostrados para esta face na carta solar (entre o amanhecer e as 10:30 horas). Assim como visto na face Nordeste, o termograma das 19:00, 20:00 e 21:00 exibem os danos subsuperficiais em temperatura inferior ao concreto ao seu entorno. Os danos de menor área são de difícil identificação.

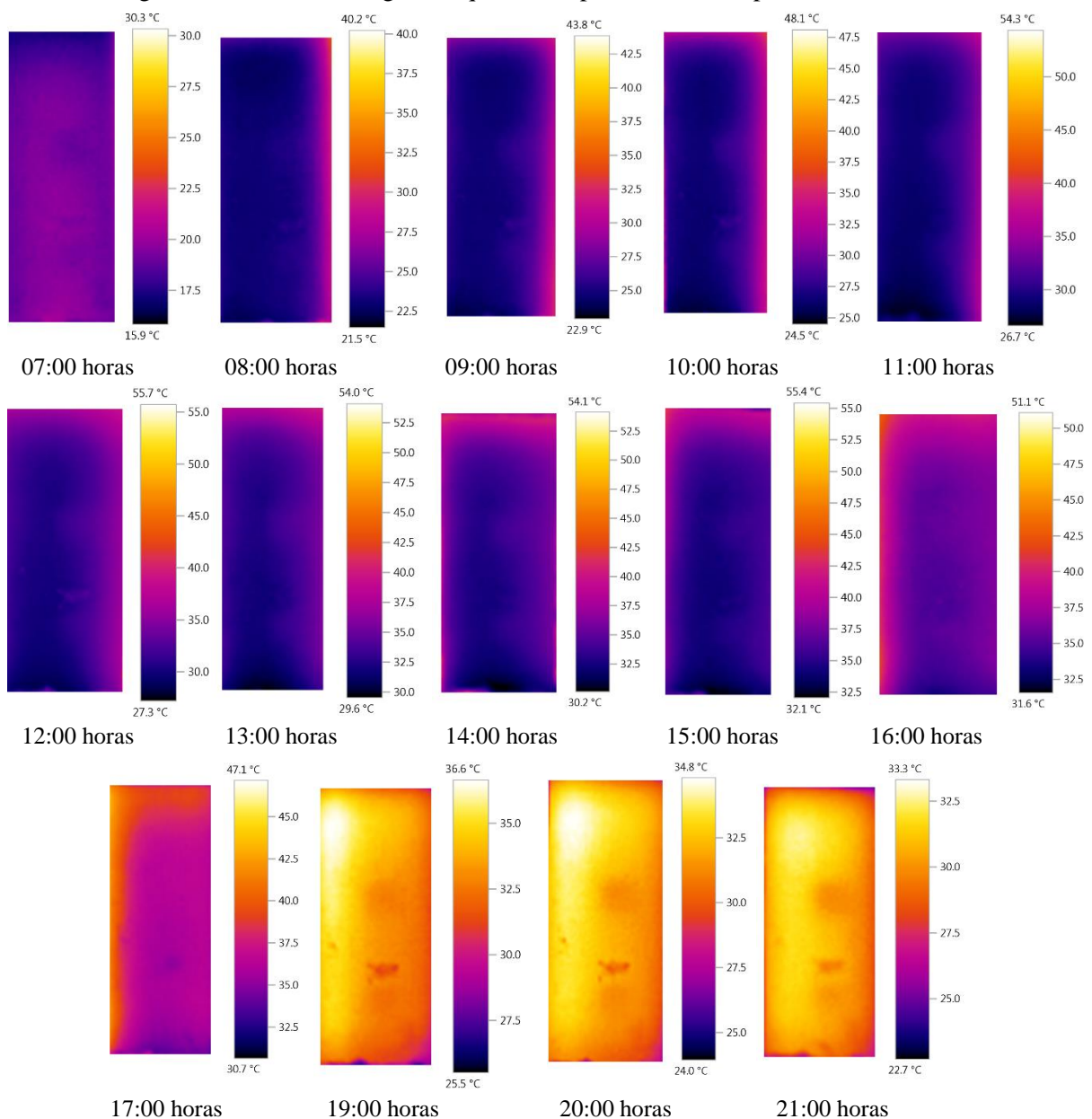
Figura 46- Análise termográfica qualitativa para amostra de pilar na face Sudeste



A Figura 47 mostra as observações para a amostra de pilar em sua orientação Sudoeste. Nesta face, os defeitos foram posicionados em profundidades maiores (3 e 4 centímetros), a fim

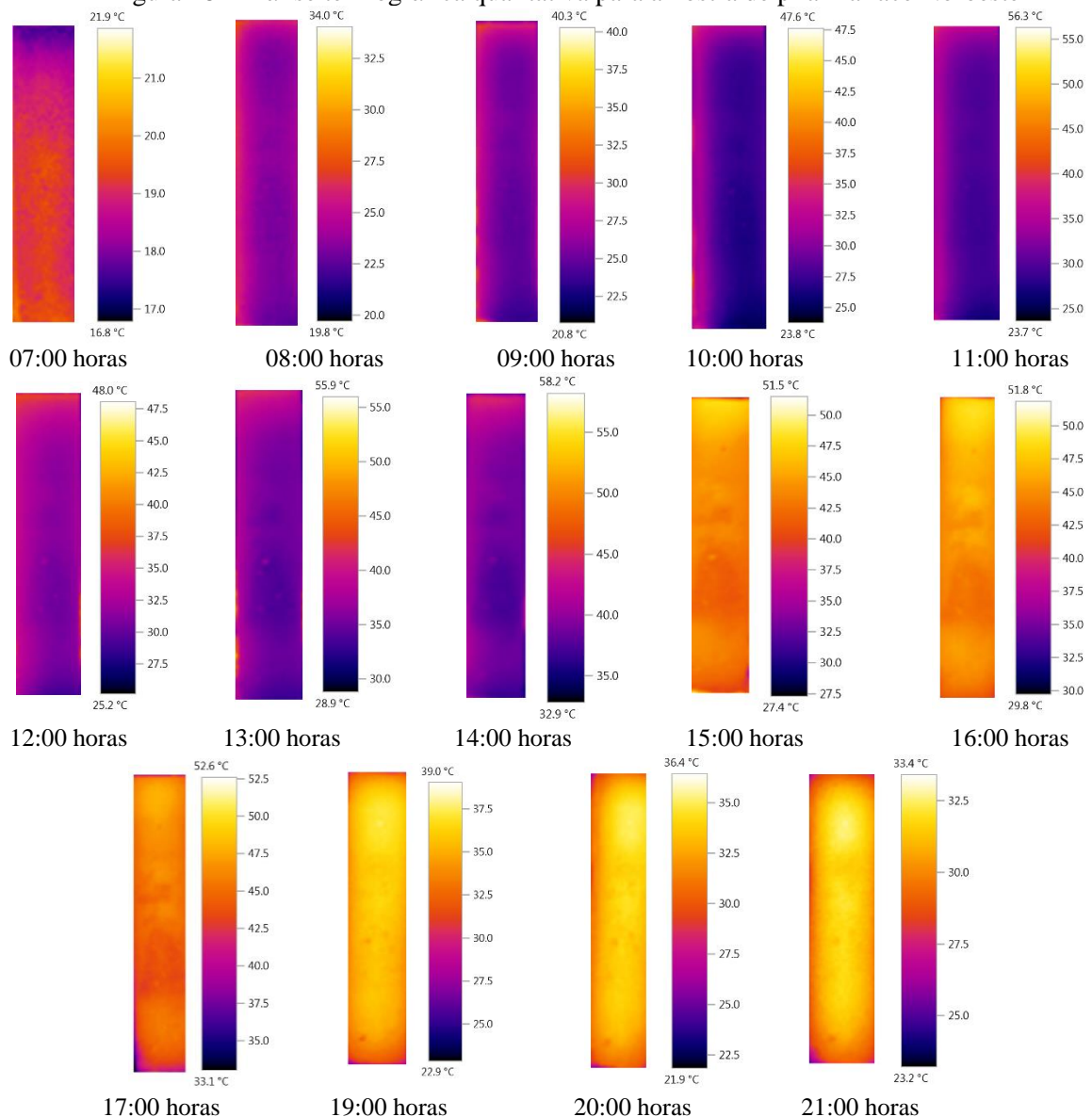
de testar o alcance da técnica em detectá-los mesmo em faces que recebem pouca irradiação durante o dia. Nesta face, a incidência solar direta no mês de fevereiro começa logo após às 13:00 e estende-se até o anoitecer. Os defeitos podem ser notados de maneira bastante sutil nos termogramas das 07:00 horas (com temperatura ainda inferior ao concreto ao seu entorno) e nos termogramas das 13:00 às 15:00 horas com temperatura levemente elevada em relação às áreas adjacentes. Após esse horário já se inicia o arrefecimento da face, não sendo mais possível identificar os defeitos. À noite os danos podem ser notados de maneira tênue, porém mais significativamente do que durante o dia.

Figura 47- Análise termográfica qualitativa para amostra de pilar na face Sudoeste



A Figura 48 mostra as observações para a amostra de pilar P1, em sua orientação Noroeste, no mês de fevereiro. Esta face comporta os danos com profundidades de 3, 2 e 1 centímetros, sendo os defeitos de maior área os mais profundos. Esta face recebe irradiação solar direta no período das 11:00 horas da manhã até o anoitecer, justificando a notoriedade dos danos nos termogramas a partir das 13:00. Como trata-se da face que recebe irradiação solar direta na parte da tarde por um período mais longo, demora mais a resfriar-se, motivo pelo qual os danos só começam a ser sutilmente notados durante a noite no termograma do último levantamento, feito às 21:00 horas. Não é possível identificar visualmente, neste caso, os defeitos de menor área, nesta configuração, posicionados a 2 e 1 centímetros de profundidade.

Figura 48- Análise termográfica qualitativa para amostra de pilar na face Noroeste



De maneira geral, através da análise qualitativa dos termogramas resultantes dos ensaios realizados nas amostras de lajes e pilar no mês de fevereiro foi possível identificar e localizar a maior parte dos danos subsuperficiais propostos nas amostras de elementos de concreto armado. Para os elementos horizontais (amostras de lajes), nota-se que é importante evitar inspeções nos períodos de intercâmbio entre aquecimento e resfriamento do elemento, que ocorrem no início da manhã e entardecer, pois nestes horários mesmo que o dano exista, ele não é identificado pela técnica termográfica. Dentro do período levantado na pesquisa, os melhores resultados para visualização de danos de maneira qualitativa, em termos de contraste mais nítido, ocorreram entre 10:00 e 15:00 horas, durante o dia, e no início do período noturno (período de resfriamento).

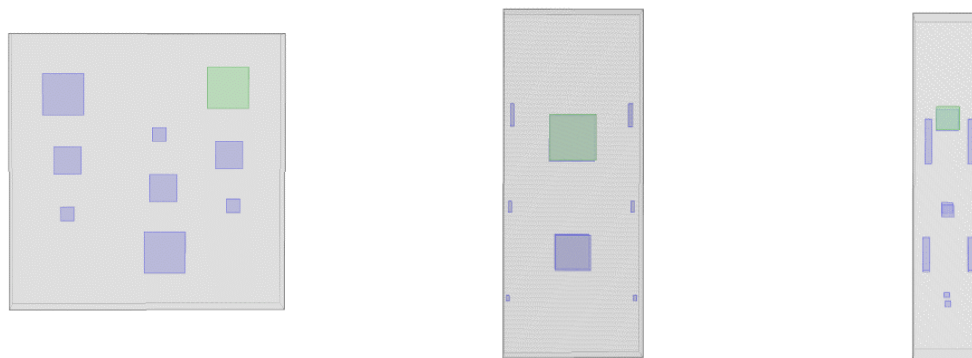
Quanto aos elementos verticais (amostra de pilar), em períodos diurnos é necessária cautela nos levantamentos, visto que a orientação das faces determina os períodos em que ocorre maior nível de carga solar direta, sendo estes os períodos em que os contrastes estão mais nítidos nos termogramas. Os resultados são convergentes com Washer et al. (2009, 2010a, 2010b, 2013), uma vez que o contraste conclusivo foi levantado quando as faces estavam expostas à radiação solar direta. De maneira geral, na localidade de estudo, faces com orientações voltadas ao Nordeste e ao Sudeste recebem radiação solar em maior quantidade no período da manhã, sendo esse turno mais indicado para inspeção termográfica em locais com condições geográficas similares a do estudo. Já as superfícies voltadas ao Sudoeste e ao Noroeste possuem aquecimento maior durante a tarde, facilitando a detecção dos danos em inspeções feitas após ao meio dia. Os levantamentos conduzidos no início do período noturno mostraram que é possível a detecção dos danos em elementos também no período de resfriamento do concreto, sem incidência de radiação solar.

4.5 Análise quantitativa dos ensaios termográficos

Neste item, a análise foi feita através dos resultados extraídos dos termogramas obtidos durante os levantamentos em termos de valores de temperatura superficial e contraste. A quantificação foi feita diretamente no software do termovisor, utilizando a metodologia descrita na Equação 7. A posição, as características e as profundidades dos danos são aquelas levantadas após o ensaio termográfico (item 3.1.2). Foram considerados nas amostras de laje os valores obtidos para o defeito superior direito, com tamanho de 15 cm x 15 cm, localizado em uma profundidade de 2 cm, na amostra de laje L1 (Figura 49a). Para a amostra de pilar foram considerados os defeitos posicionados na parte superior de cada face, conforme visto na Figura

49b e na Figura 49c. Os demais defeitos foram incluídos no item que analisa quantitativamente a variação total do contraste nas amostras de lajes e pilar.

Figura 49- Defeitos utilizados para análise quantitativa



a) Amostra de laje L1

b) Face Nordeste e Sudoeste

c) Face Noroeste e Sudeste

Foram analisadas as relações entre os dados termográficos e as variáveis de área, profundidade, horário de levantamento e condições ambientais observados em cada dia de inspeção, além da orientação solar no caso dos pilares. As informações completas referentes as condições ambientais observadas em cada levantamento dos meses de novembro, fevereiro, março, abril, junho e julho estão contidas no Apêndice 2 deste trabalho.

4.5.1 Variabilidade em função das configurações de inspeção: horário e mês

Na Figura 50 é possível observar o contraste e sua variação em relação ao horário e aos meses de levantamento. Os valores mostram que os maiores valores de contraste ocorrem no período das 10:00 às 16:00 horas, período em que há maiores níveis de radiação solar durante o dia, produzindo um maior aquecimento das amostras de estrutura. Da mesma forma, os meses de novembro e fevereiro são os meses em que há os maiores índices de radiação solar incidente dentro do horizonte de meses levantados, conforme mostra a Figura 51, o que explica o maior aquecimento das superfícies e, conseqüentemente, os maiores valores de contraste para estes meses. Os contrastes vistos no período noturno (após as 18:00 horas), onde há pouca ou nenhuma radiação solar também são significantes.

Figura 50- Variabilidade do contraste em amostra de laje em função do horário e mês

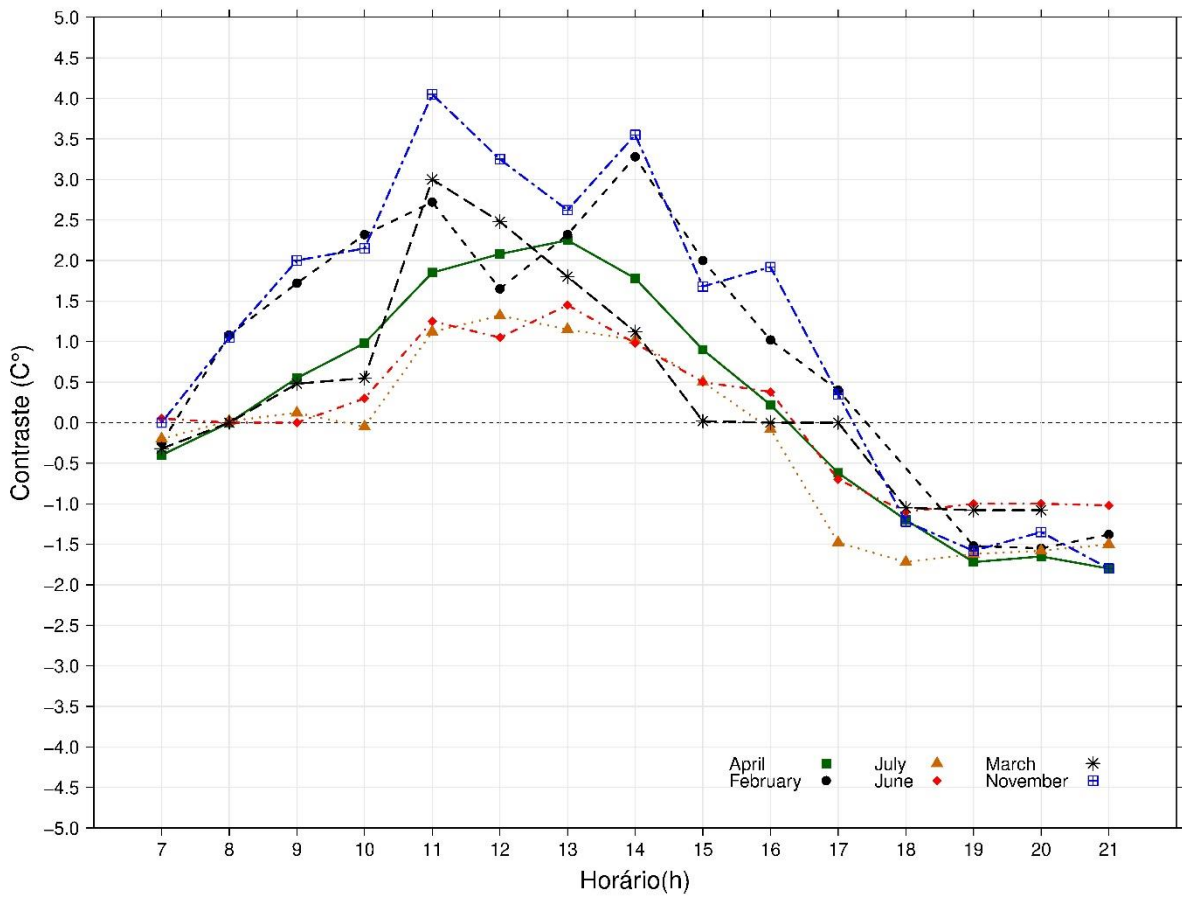
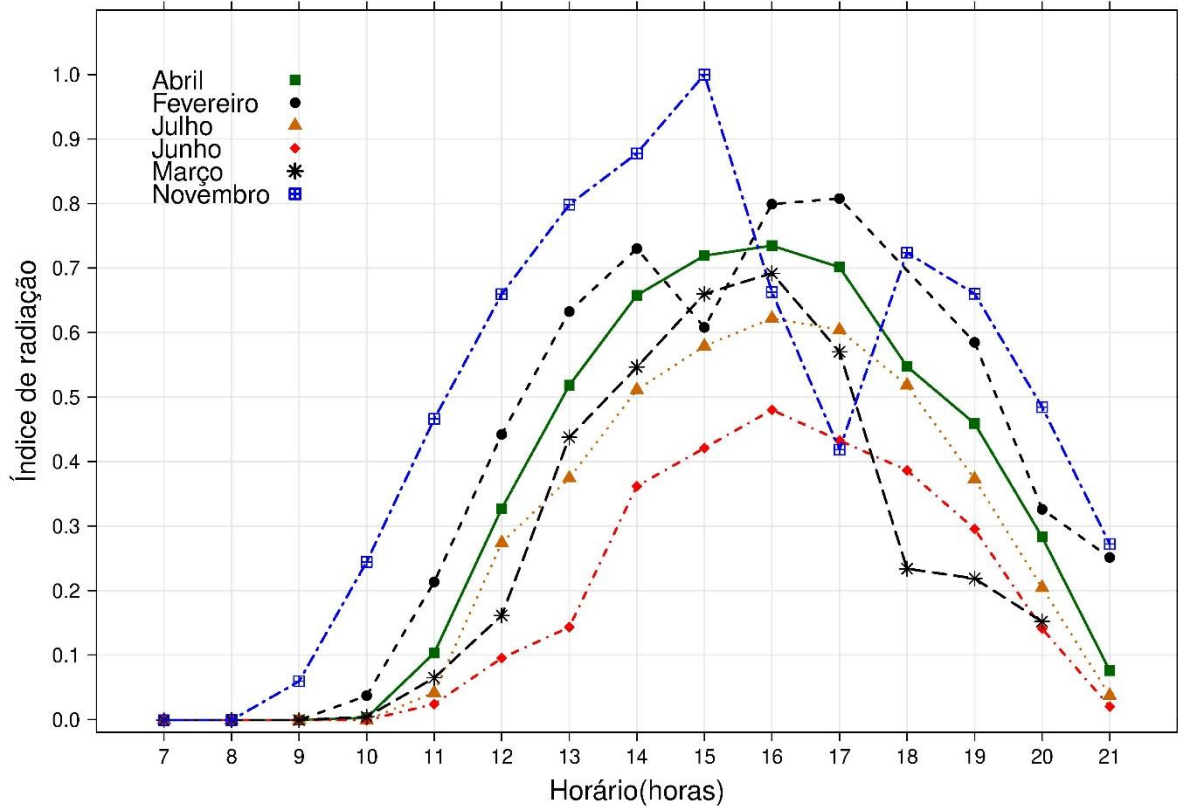


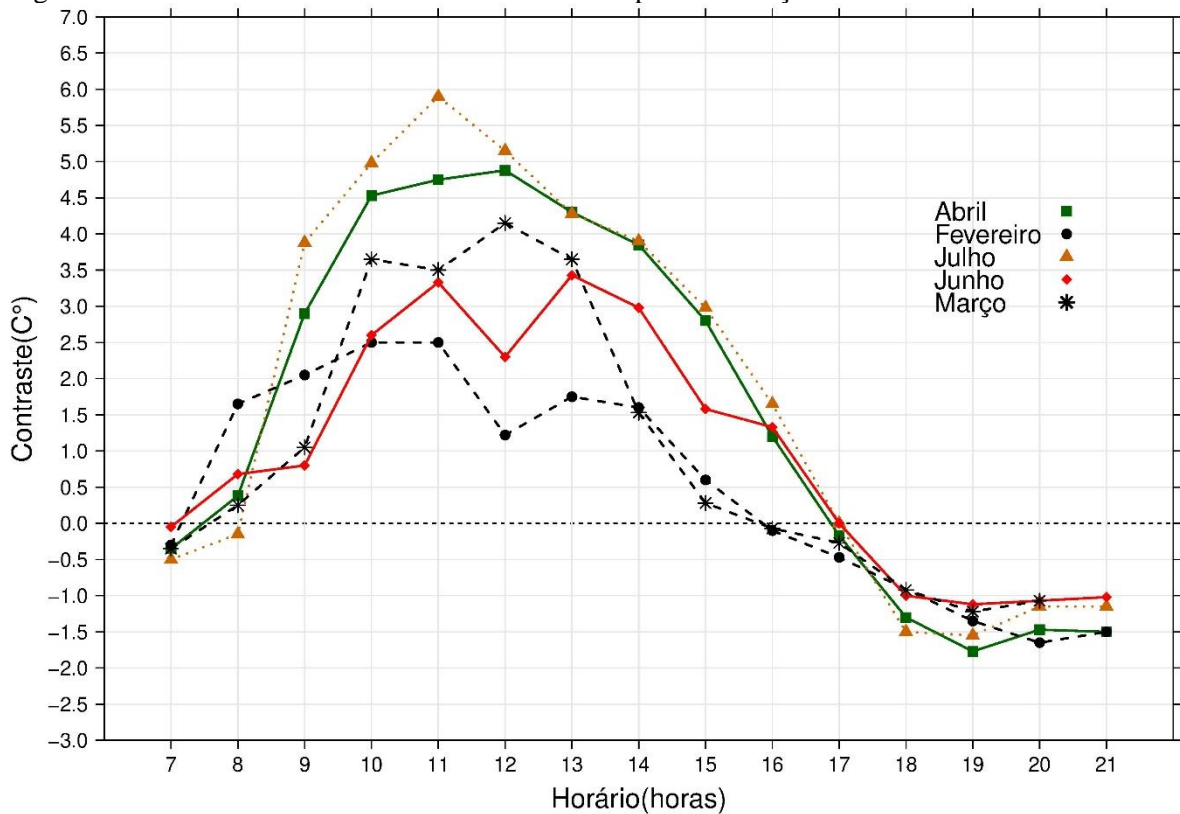
Figura 51- Variabilidade do índice de radiação solar ao longo dos meses



Os índices de radiação vistos na Figura 51 foram calculados através da divisão dos valores de radiação de cada horário pelo maior valor de radiação observado nos seis levantamentos. São vistos na figura acima declínios abruptos nos valores de radiação ao longo do dia, como foi o caso do mês de novembro, às 16:00 horas e fevereiro, 15:00 horas, retomados normalmente nas horas subsequentes. Isso ocorre devido à presença de nuvens. Observa-se que durante os levantamentos feitos inteiramente com céu limpo nos meses de março, abril e julho, os valores de radiação, bem como de contraste levantados seguiram um padrão que cresce e decresce continuamente ao longo do dia. No levantamento feito em fevereiro, por exemplo, quando houve presença de nuvens intercaladas com Sol entre as 14:00 e 16:00 horas, houve um intervalo brusco tanto na curva da radiação solar incidente quanto no contraste identificado. Desta maneira, é notado que a existência de nuvens tem influência nos valores de contraste levantados termograficamente, pois estas bloqueiam parte da radiação solar incidente na atmosfera fazendo com que exista uma redução no aquecimento superficial dos objetos, gerando um menor desempenho na detecção dos danos. Logo, é prudente priorizar a realização de levantamentos em períodos de céu limpo. Hiasa et al. (2018) também abordaram o efeito da presença de nuvens em seu estudo, apontando que condições ótimas para realização de inspeções termográficas em âmbito passivo são conduzidas sem presença de nuvens.

Na análise dos pilares, o fator da geometria solar deve ser adicionado, visto que este dita a intensidade de radiação atuante em cada face do elemento. Conforme abordado inicialmente, foi considerado para análise um dado diferente em cada face do pilar (Figura 49b e Figura 49c). Para a face Nordeste, a radiação solar direta atua desde o início da manhã até aproximadamente às 15:00 horas, considerando a na carta solar de Passo Fundo para todos os meses levantados (Figura 44). Esses são os horários em que houve maiores valores de contraste, conforme visto na Figura 52. O período noturno também se mostrou oportuno para identificação dos danos, visto que valores de contraste acima de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ foram detectados após as 18:00 horas em todos os meses de levantados. Os resultados são convergentes com a análise qualitativa feita para esta face em fevereiro, onde os maiores valores de contraste foram encontrados até as 13:00 horas, período aproximado em que a face recebe irradiação direta neste mês.

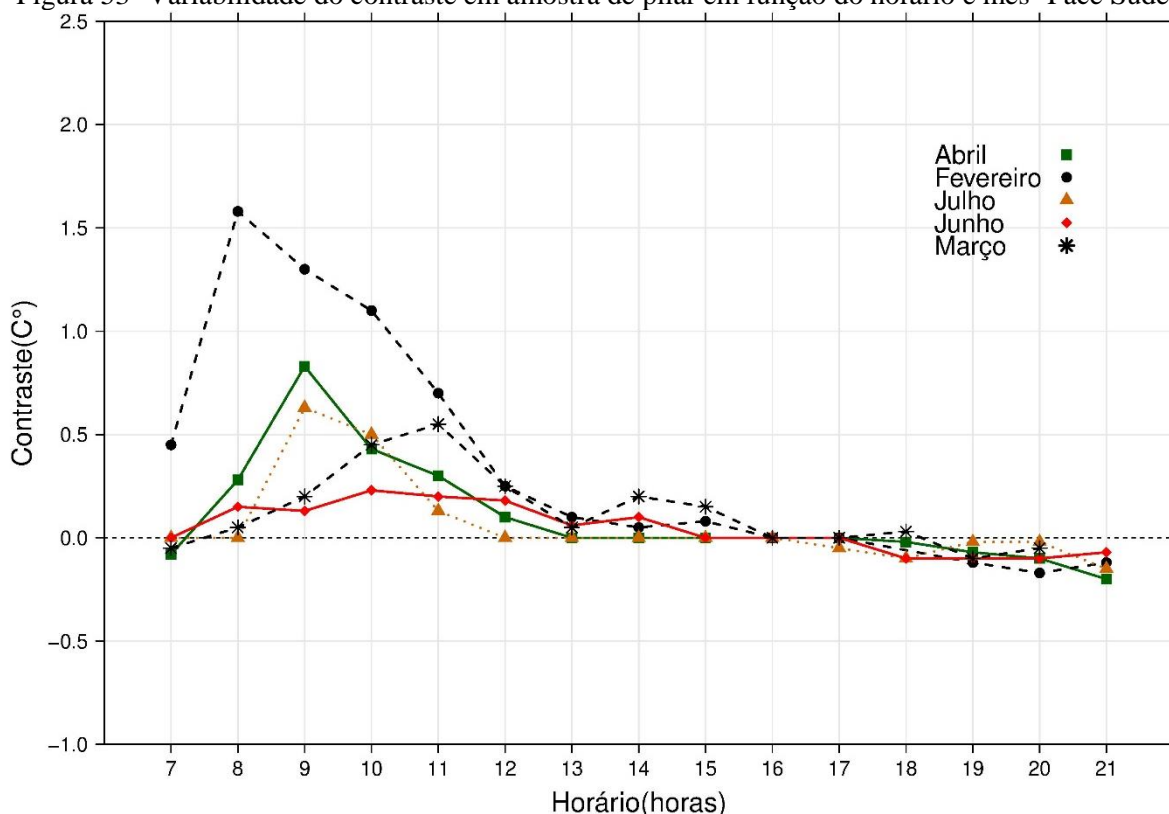
Figura 52- Variabilidade do contraste em amostra de pilar em função do horário e mês -Face Nordeste



Quanto à variação dos valores ao longo dos meses, ao observar a carta solar, percebe-se que no mês de julho a trajetória solar é uma das mais longas durante o período levantado. Dessa forma, o elemento encontrou-se exposto diretamente ao Sol por mais tempo, justificando os maiores valores de contraste por um maior intervalo de tempo, mesmo possuindo temperaturas baixas. O mês de junho também propicia elevado tempo de exposição ao sol, maior até do que o mês de julho, porém conforme visto na Figura 51 e no Apêndice 2, os índices de radiação foram menores no mês de junho do que no mês de julho.

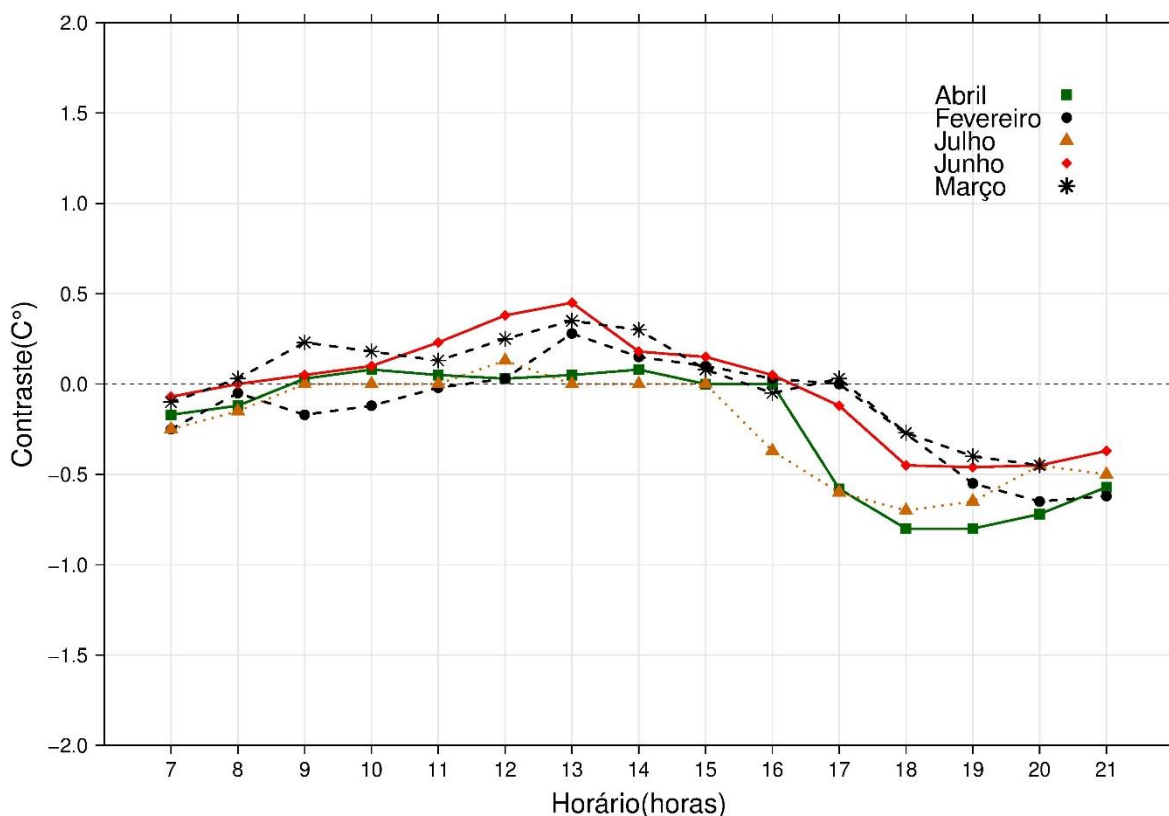
Para a face Sudeste foi considerado para análise os dados do dano de 10 x10 cm de área, localizado em uma profundidade de 3 centímetros. Nesta face, a radiação solar direta atua desde o início da manhã até aproximadamente às 11:00 horas, com trajetória solar máxima, dentro dos meses analisados, em fevereiro (Figura 44). Este foi o mês que apresentou maiores valores de contraste (Figura 53), visto que a face da amostra esteve sob efeitos de radiação solar direta por um período mais longo. Quanto ao horário, o período de melhor detecção dos danos condissse com o período de exposição solar da face, concentrando-se principalmente no período da manhã. Os resultados são consonantes com a análise qualitativa, onde no mês de fevereiro a mesma face concentrou seus melhores resultados entre o amanhecer e as 11:00 horas.

Figura 53- Variabilidade do contraste em amostra de pilar em função do horário e mês -Face Sudeste



Para a face Sudoeste, considerou-se as informações sobre o dano de 20 x 20 cm de área, porém agora posicionado a 3 centímetros de profundidade. Nesta face ocorre irradiação direta no período da tarde, desde aproximadamente 13:00 horas até o anoitecer, com trajetória máxima, dentre os meses estudados, no mês de fevereiro. A orientação solar e a profundidade robusta resultaram em valores de contraste baixos, conforme visto na Figura 54. Durante o dia, a detecção dos danos foi muito tênue, mesmo recebendo radiação solar direta. Durante a tarde os valores dos contrastes cresceram quando a face passou a estar exposta à luz solar direta. A partir do final da tarde, o ciclo de resfriamento foi iniciado e os danos foram detectados por estarem com temperatura menor do que seu entorno. A partir disso, percebe-se que os defeitos foram detectados com maior intensidade no período da noite, mesmo sem estar sob efeito da irradiação direta.

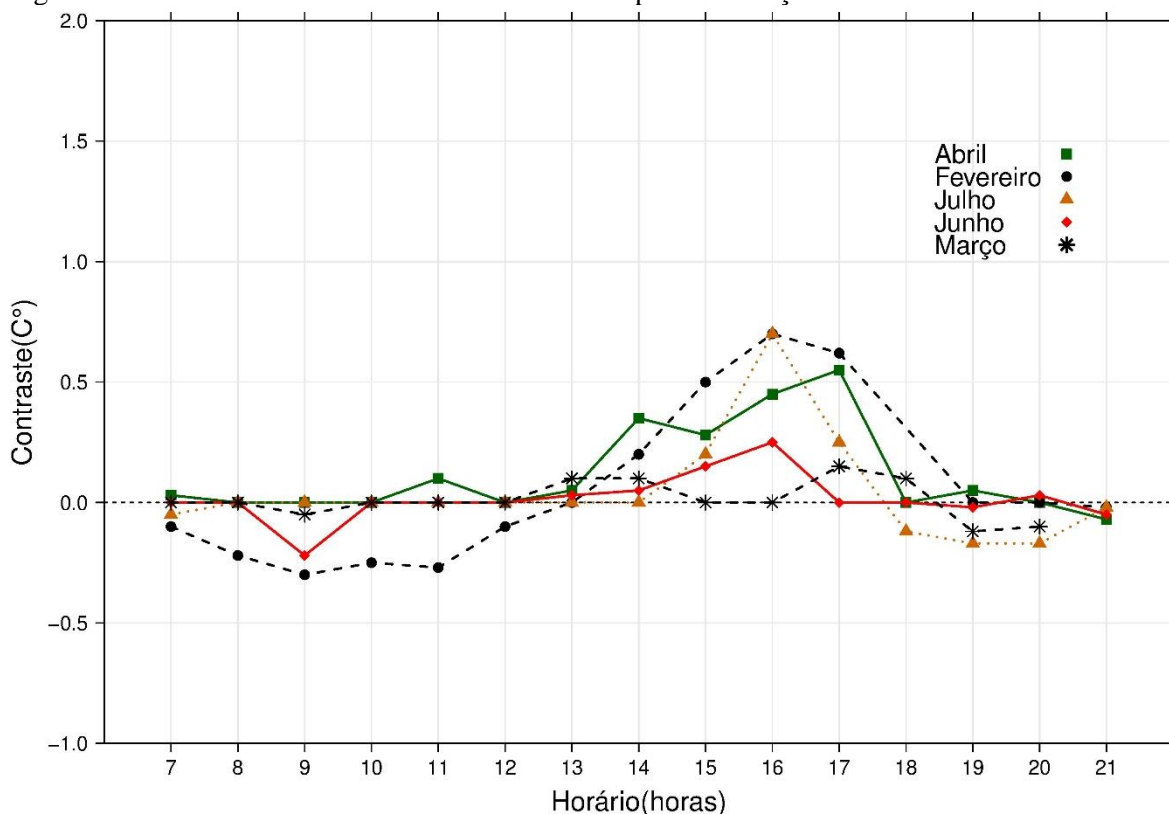
Figura 54- Variabilidade do contraste em amostra de pilar em função do horário e mês -Face Sudoeste



Sendo assim, percebe-se que para a face Sudoeste, nos meses estudados, o desempenho da detecção de danos foi mais efetivo no período noturno do que no período diurno, consonante novamente com a análise qualitativa feita no item 4.4.2 para esta face.

Para a face Noroeste foi considerado para análise o dano de 10 x 10 cm de área, em uma profundidade de 3 centímetros. Nesta face, no horizonte estudado, a radiação solar direta atua desde às 9:00 horas, aproximadamente, com trajetória solar máxima no mês de junho (Figura 44). A Figura 55 mostra o resultado do levantamento de danos para a superfície, onde o período da tarde apresentou os maiores contrastes após um período mais longo de aquecimento. O mês de fevereiro também apontou grandes valores de contraste, pois possui alto índice de radiação. Ao mesmo tempo, o mês de julho se sobressaiu, devido aos fatores de tempo sob exposição e valores de radiação solar incidente. O período noturno não demonstrou contrastes notáveis devido ao fato de que a face recebe luz solar direta até o anoitecer, demorando mais a resfriar-se e apresentar contraste novamente, indo ao encontro do que foi visto na análise qualitativa feita anteriormente.

Figura 55- Variabilidade do contraste em amostra de pilar em função do horário e mês -Face Noroeste



Para os pilares, o fator determinante na variação dos valores de contraste foi a geometria solar, visto que dita o período em que há radiação solar em cada face do elemento (horário e mês), gerando maior aquecimento das superfícies e, conseqüentemente, maiores valores de contraste. Os resultados são consonantes àqueles obtidos por Washer et al (2009, 2010a, 2010b, 2013), onde o contraste observado esteve diretamente relacionado à carga solar atuante.

4.5.2 Variabilidade em função das condições ambientais

Prosseguindo com o escopo de investigar a sensibilidade da técnica termográfica para detecção de danos em elementos de concreto armado, neste item foi feita a análise da variabilidade dos resultados em termos de contraste e/ou temperatura superficial, perante diferentes valores de temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade do vento, índices de radiação solar e pressão atmosférica. Utilizaram-se os dados das amostras de lajes pela justificativa de que as amostras de pilares possuem variabilidade muito grande em função da orientação solar e do mês do levantamento, decentralizando a relação entre o contraste e as variáveis ambientais.

Dessa forma, utilizaram-se os valores obtidos para o defeito apontado na Figura 49a, o mesmo utilizado na análise anterior, com tamanho de 15 x 15 cm, localizado em uma profundidade de 2 cm. Para cada variável, analisa-se separadamente os dados do mês de fevereiro e do mês de julho. Estes meses foram escolhidos por apresentarem temperaturas distintas de verão e inverno. Em seguida, fez-se uma análise geral do contraste em todos os dados de todos os meses de levantamentos.

4.5.2.1 Temperatura ambiente

Os resultados vistos na Figura 56 e na Figura 57 mostram que a temperatura superficial do concreto variou de maneira convergente aos valores de temperatura ambiente. A linha vertical tracejada no gráfico representa o período aproximado de transição entre o dia e a noite.

Figura 56- Variabilidade da temperatura superficial em função da temperatura ambiente- Fevereiro

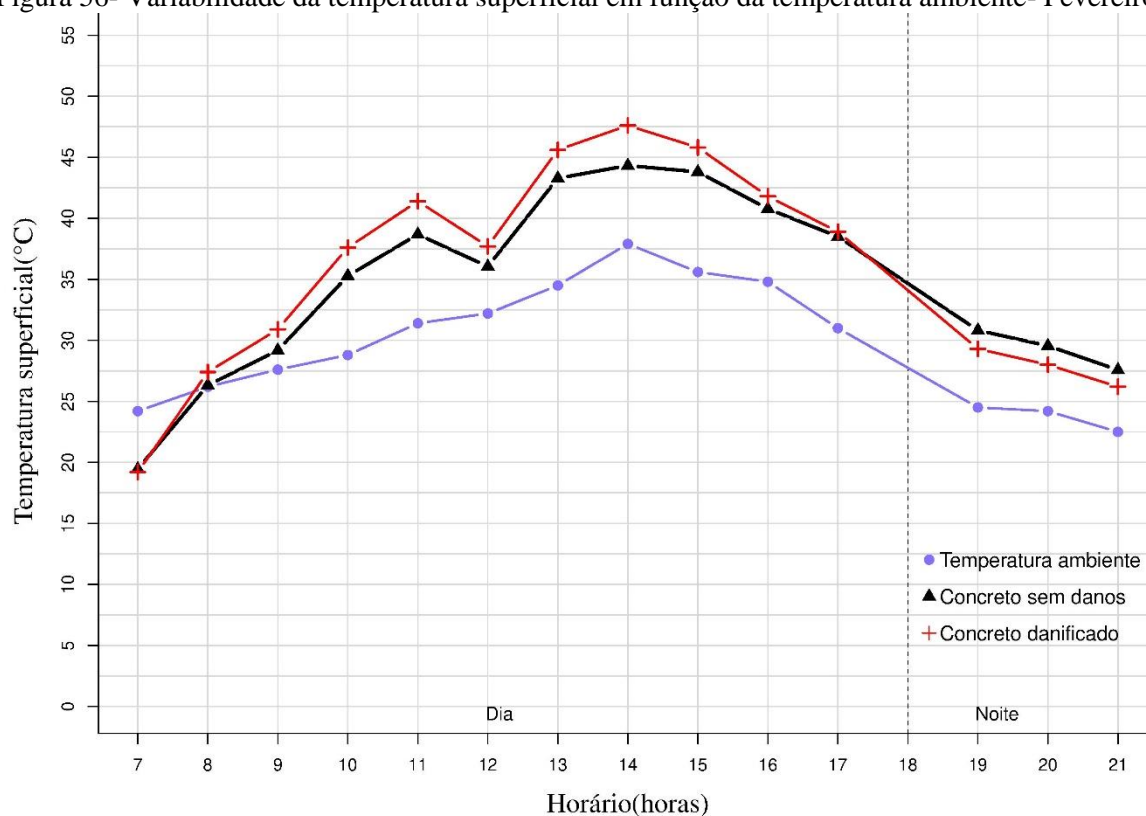
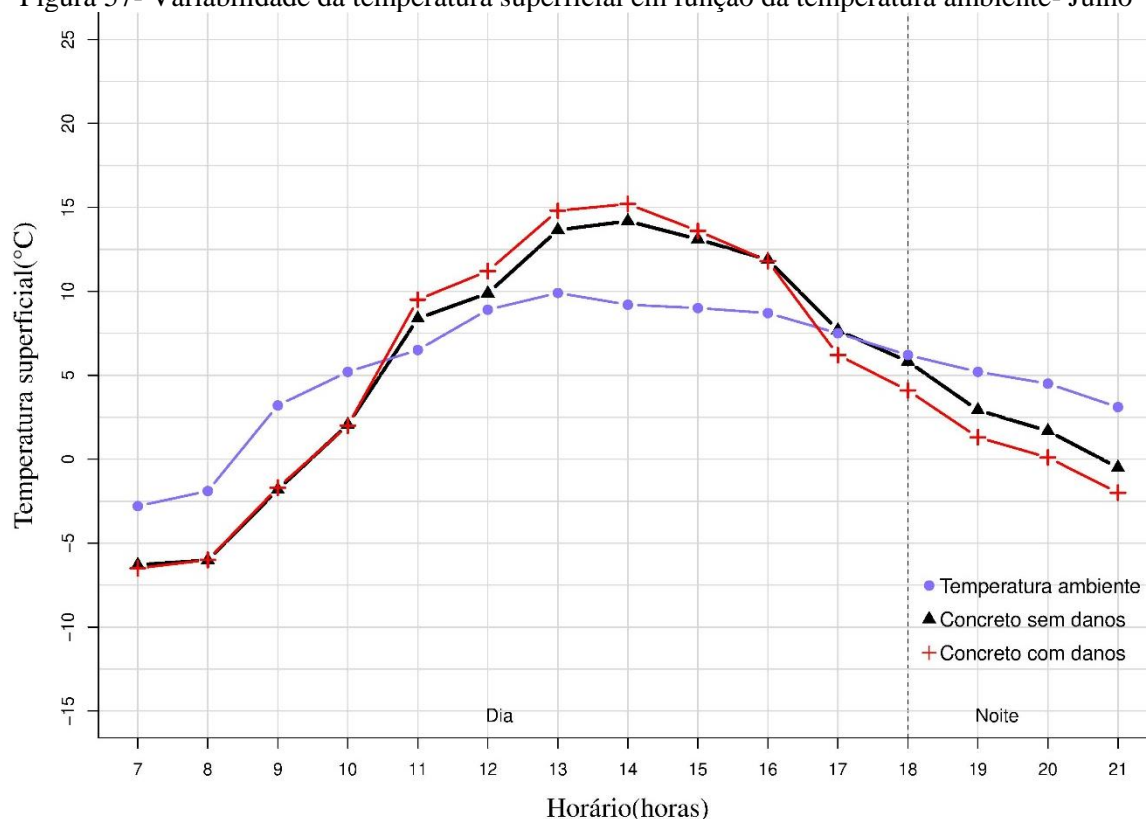


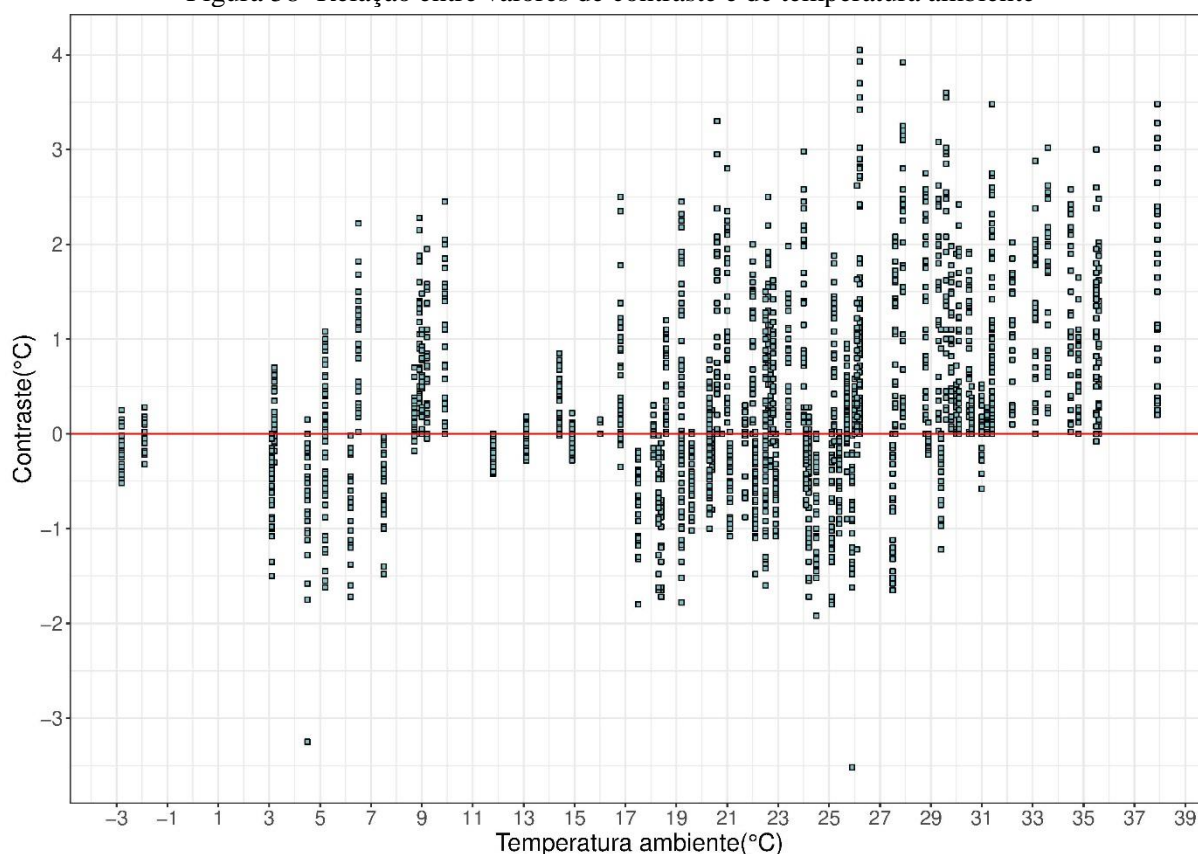
Figura 57- Variabilidade da temperatura superficial em função da temperatura ambiente- Julho



Em ambos os meses, quente e frio, a superfície de concreto sobre o dano aumentou sua temperatura de maneira mais ampla durante o dia do que a noite. Durante a noite o contraste continuou sendo detectado mesmo com a diminuição da temperatura, conforme descrito no item 4.1.1. A relação entre as temperaturas foi similar nos meses de verão e de inverno, diferenciada apenas pelo deslocamento que ocorre no eixo das temperaturas, onde o mês de fevereiro apresentou típicas temperaturas altas de verão e o mês de julho apresentou temperaturas mínimas e máximas menores, típicas do inverno no local. Isso fez com que os contrastes fossem maiores durante o dia em fevereiro do que em julho, devido à grande amplitude térmica da temperatura do ar entre dia e noite, como anteriormente discutido por Janků, Březina e Grošek (2017).

Além disso, é possível identificar em ambas as figuras períodos de equilíbrio térmico nos elementos, onde não se pode identificar os danos pois não existiu diferença entre as temperaturas superficiais. Dentro do horizonte estudado, esses períodos ocorreram no início da manhã e no final da tarde, consonante com a análise qualitativa feita anteriormente. A Figura 58 mostra os dados de todos os defeitos, nas três amostras de lajes, durante os 6 meses de observação. A maior densidade de valores de contraste mais robustos ocorreu em períodos com temperatura relativamente mais alta, entre 20 C° e 35 C°.

Figura 58- Relação entre valores de contraste e de temperatura ambiente



É notado que os valores de contraste e de temperatura superficial do concreto relacionam-se com a temperatura ambiente, mostrando que este é um fator influente na detecção dos danos por termografia infravermelha. Porém, ao passo que grandes contrastes foram levantados em ambos os extremos de temperatura ambiente, valores modestos e até mesmo nulos foram levantados nos mesmos extremos. Percebe-se que a temperatura ambiente não determina, por si só, o comportamento da temperatura superficial do concreto, sendo recomendado que se faça uma análise em conjunto com as demais variáveis.

4.5.2.2 Umidade relativa do ar

A Figura 59 e a Figura 60 mostram a variação da temperatura superficial do em função da variabilidade dos quantitativos de umidade relativa do ar durante um dia do mês de fevereiro e julho. Naturalmente, o dia iniciou com uma quantidade alta de umidade relativa do ar que diminuiu com o passar das horas, presença do Sol e aumento de temperatura e voltou a incrementar-se após o anoitecer, com a diminuição da temperatura ambiente.

Figura 59- Variabilidade da temperatura superficial em função da umidade relativa do ar - Fevereiro

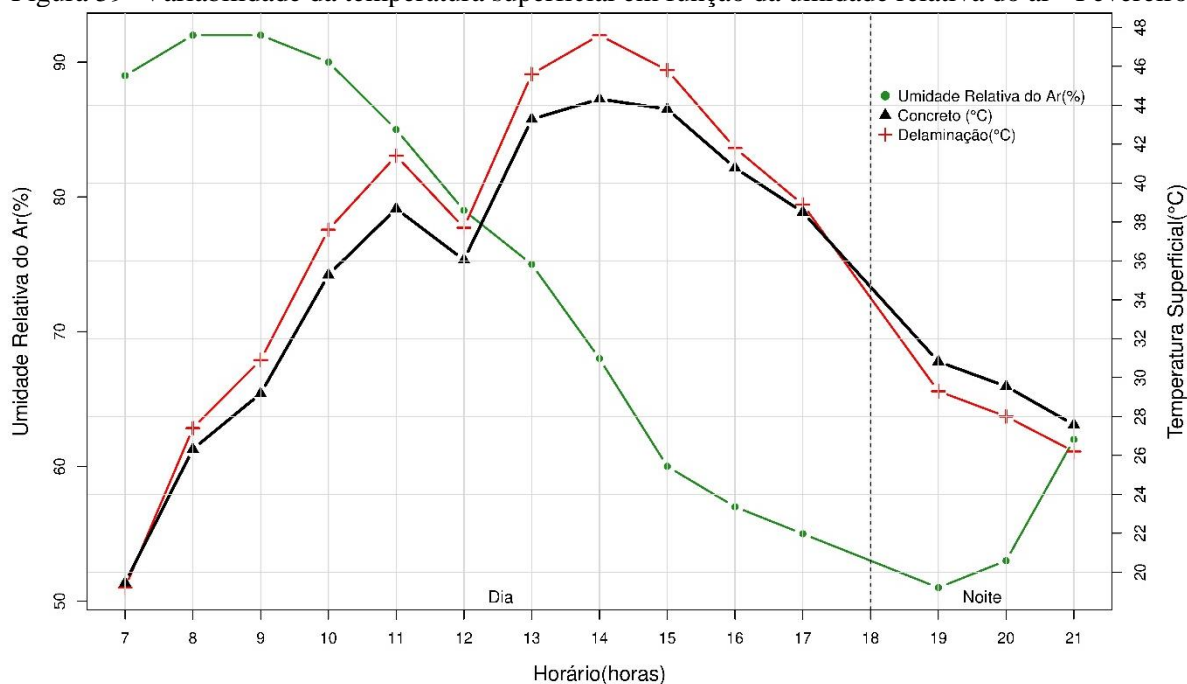
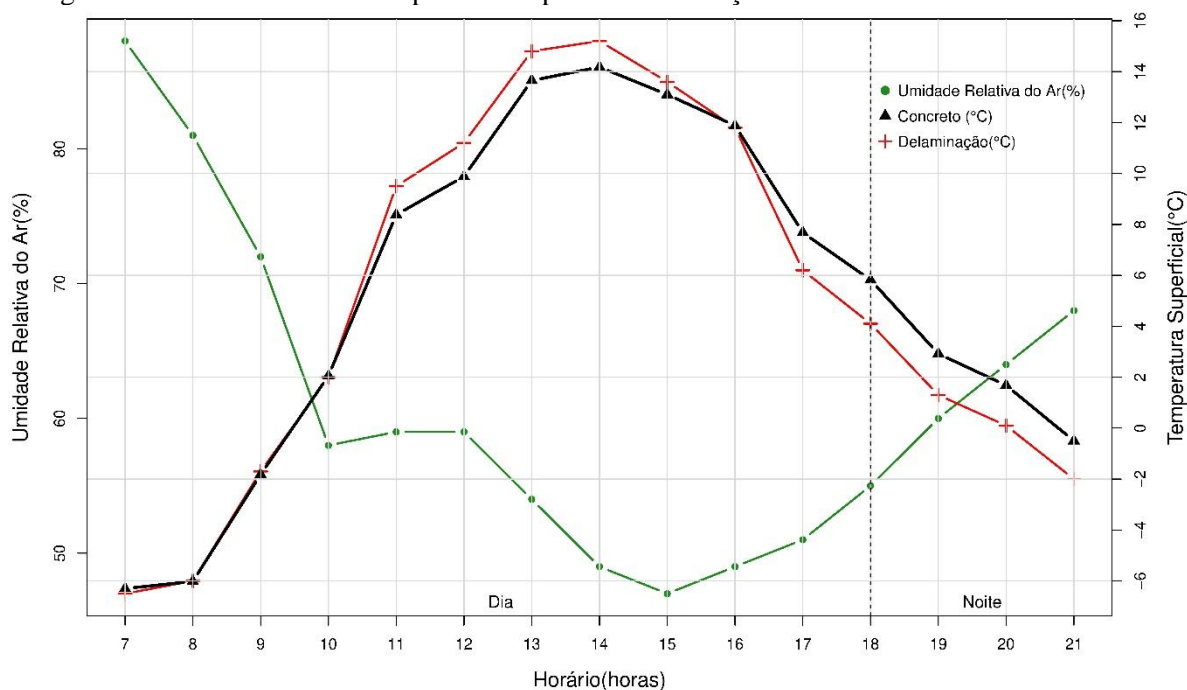


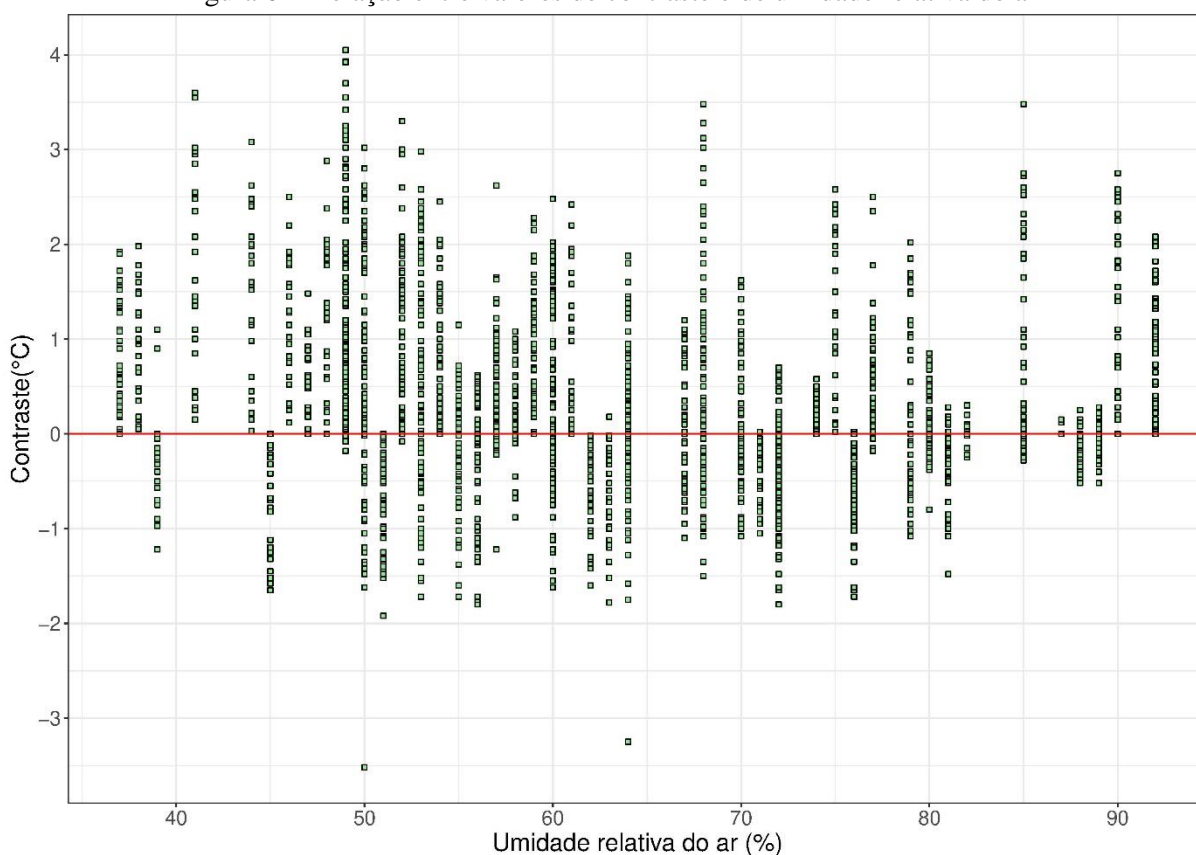
Figura 60- Variabilidade da temperatura superficial em função da umidade relativa do ar - Julho



De maneira geral, dentro do horizonte da pesquisa, os maiores valores temperaturas superficiais e de contraste ocorreram próximos ao meio dia devido à alta temperatura e aos altos níveis de radiação incidente. Neste horário, a umidade relativa do ar é baixa. À noite a umidade relativa do ar se intensificou e ocorreu o ciclo de resfriamento do concreto, onde também foi possível identificar contrastes de maneira satisfatória.

A Figura 61 mostra os dados levantados nesta pesquisa para todos os defeitos simulados, nas três amostras de lajes, durante os 6 meses de observação.

Figura 61- Relação entre valores de contraste e de umidade relativa do ar



Tran et al. (2017), por meio de ensaios com o uso de termografia ativa, encontraram valores de contraste maior em atmosferas de umidade relativa maior, principalmente em defeitos pouco profundos. No entanto, recomendaram que este parâmetro seja considerado em conjunto com demais variáveis ambientais, devido à alta probabilidade de correlação. Rocha, Póvoas e Santos (2018) apontaram que a umidade relativa contribui para a percepção do contraste durante a noite, devido ao aumento do teor de umidade do concreto e, portanto, da taxa de transferência de calor. Na presente pesquisa, observaram-se altos valores de contraste em ambas as atmosferas de umidade relativa do ar, mas com maior densidade de altos valores de contraste para baixos valores de umidade relativa do ar. Admite-se assim que existe uma relação entre a variabilidade da temperatura superficial do concreto e a umidade relativa do ar, influenciando conseqüentemente nos valores de contraste obtidos. Porém sabe-se que este não representa um fator de influência isolado, devendo ser analisado em conjunto com as demais variáveis correlacionadas para que sua influência possa ser atestada.

4.5.2.3 Radiação solar

A Figura 62 e a Figura 63 demonstram uma relação de convergência entre os valores de radiação solar atuante sobre a amostra e as temperaturas superficiais do concreto, seja com ou sem danos.

Figura 62- Variabilidade da temperatura superficial em função da radiação solar - Fevereiro

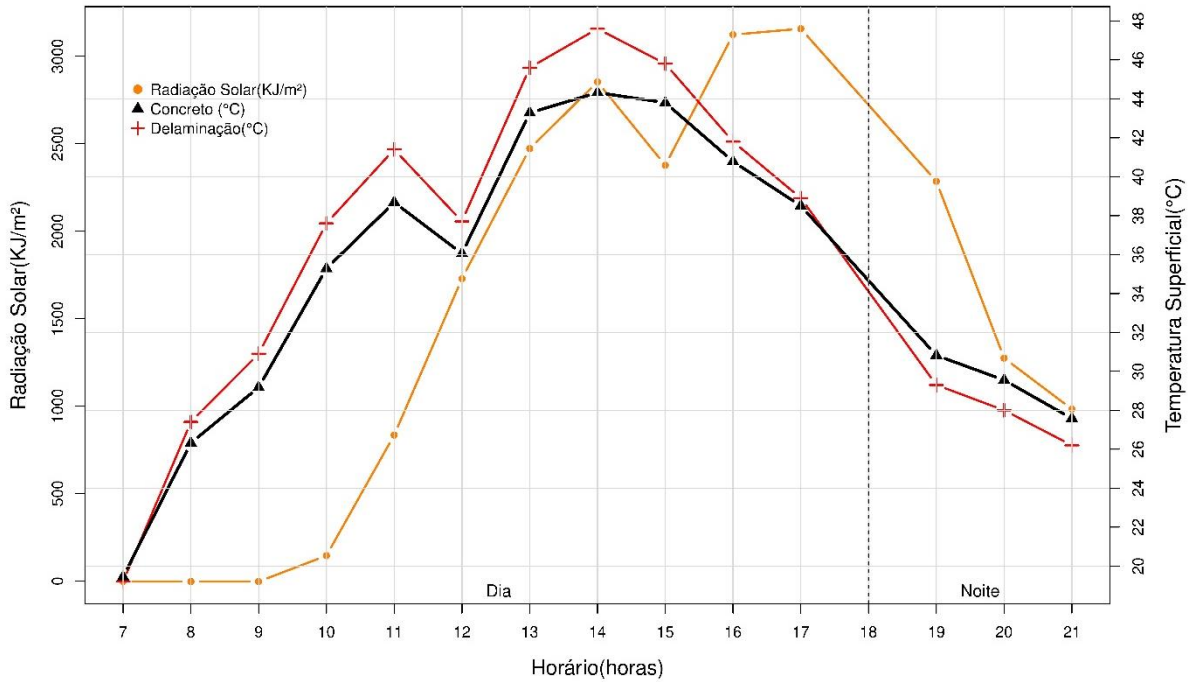
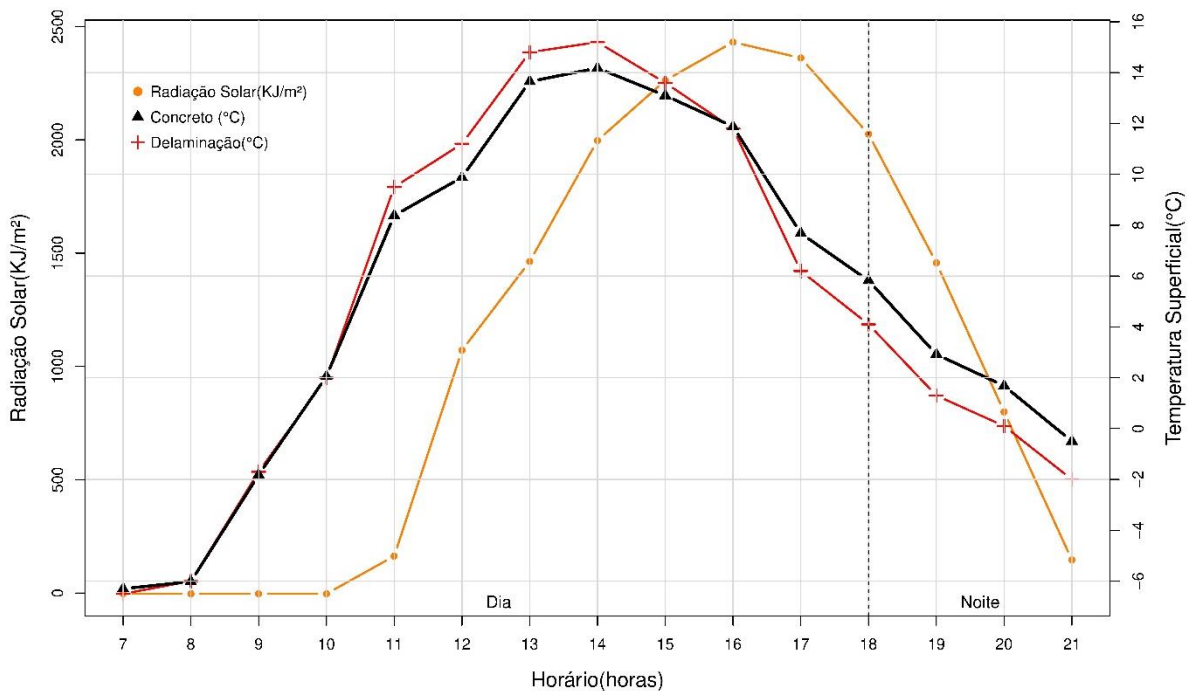
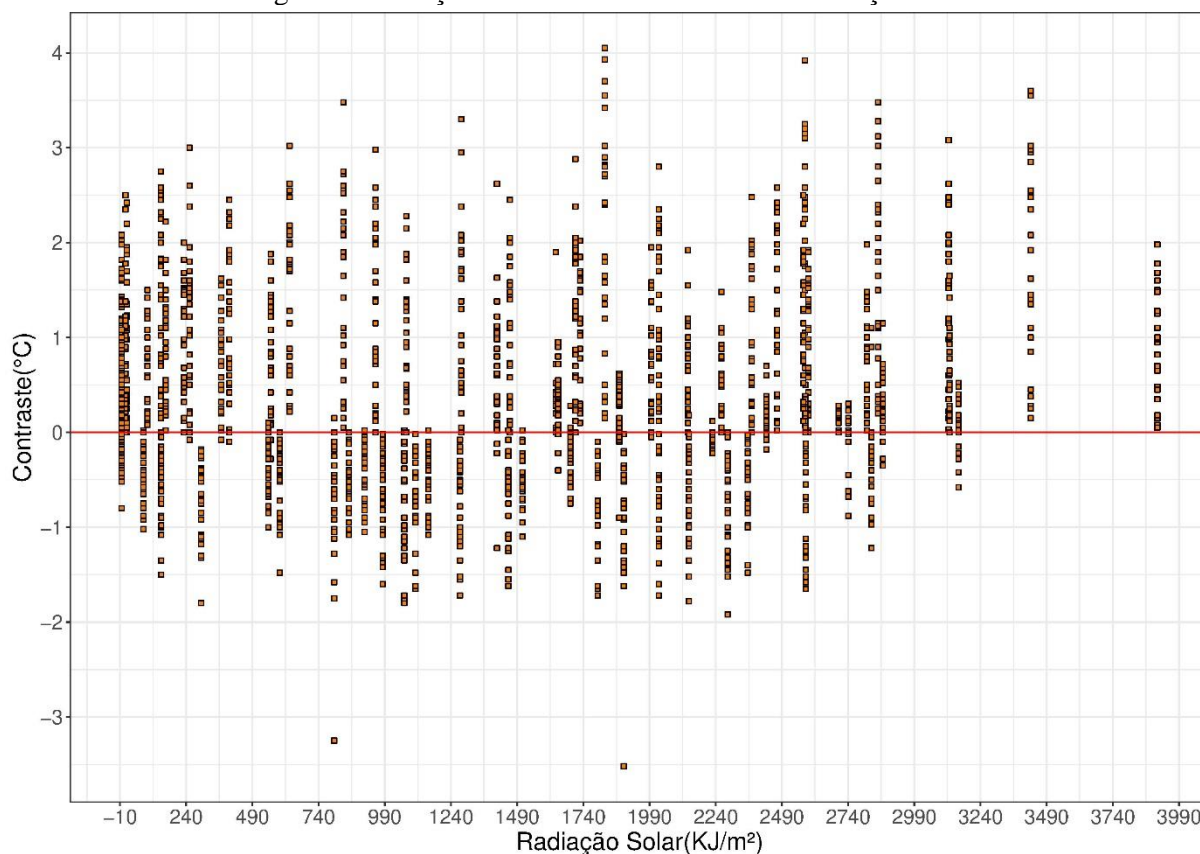


Figura 63- Variabilidade da temperatura superficial em função da radiação solar - Julho



Nota-se que a medida que o nível de radiação solar incidente aumentou, as temperaturas superficiais aumentaram de maneira convergente aos valores de radiação solar, assim como a medida que o anoitecer se aproxima e a incidência de radiação solar diminuiu, as temperaturas superficiais também foram diminuindo. Em termos de contraste, vistos na Figura 64, valores significativos foram observados para altos níveis de radiação solar incidente pois, em termografia passiva, esta é a principal fonte de aquecimento das superfícies. Na mesma linha de análise, períodos com baixos valores de radiação solar incidente e até mesmo períodos sem incidência de radiação solar apresentaram contrastes significantes, o que indica que existiram outras variáveis que influenciaram a detecção do dano.

Figura 64- Relação entre valores de contraste e radiação solar



Desta forma, a radiação solar configura uma variável ambiental que influencia diretamente a transferência de calor, porém não de forma isolada, devendo ser considerada em conjunto com as demais variáveis pertinentes ao estudo.

4.5.2.4 Pressão atmosférica

Ao contrário do item anterior, os valores de pressão atmosférica não demonstraram grande variação ao longo do dia. É possível perceber que nos mês de verão (Figura 65) os valores de pressão atmosférica são menores do que em Julho (Figura 66) Em fevereiro, a temperatura do ambiente é maior e por consequência o ar é menos denso, diminuindo a pressão atmosférica.

Figura 65- Variabilidade da temperatura superficial em função da pressão atmosférica – Fevereiro

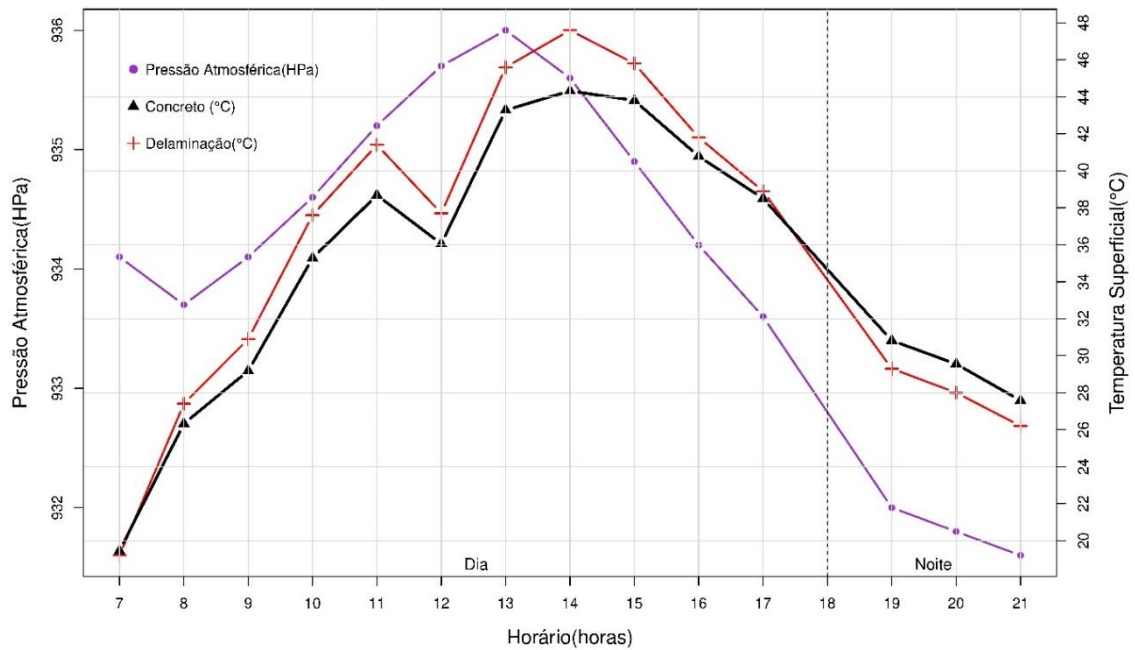
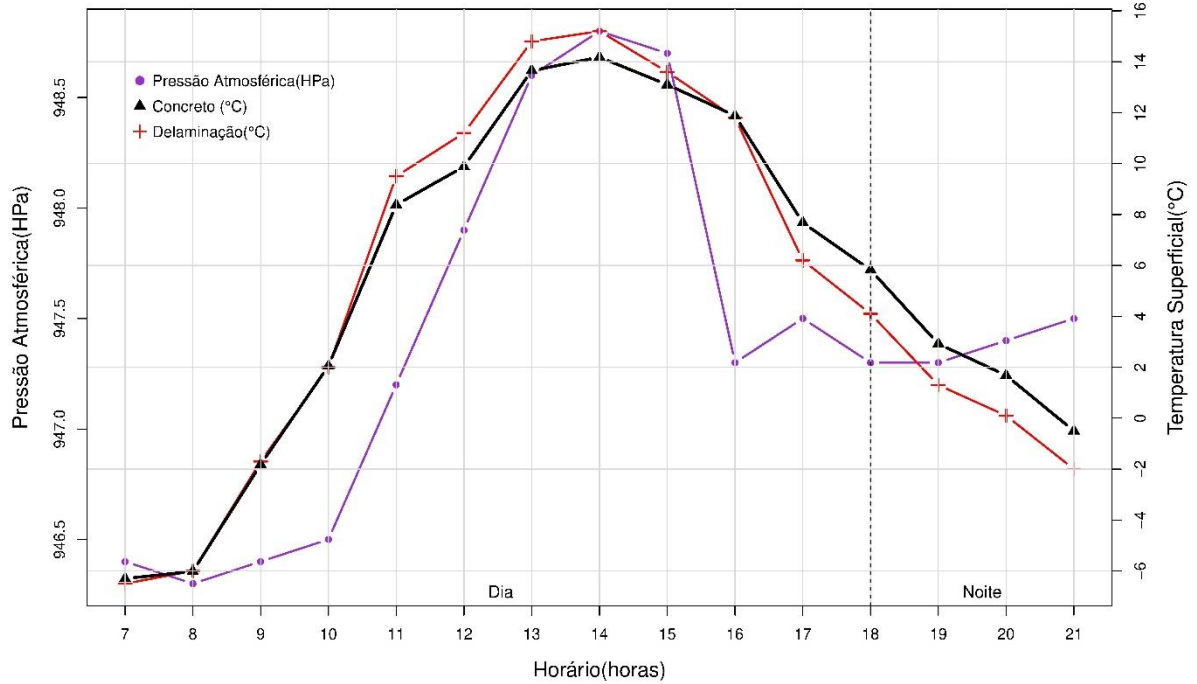
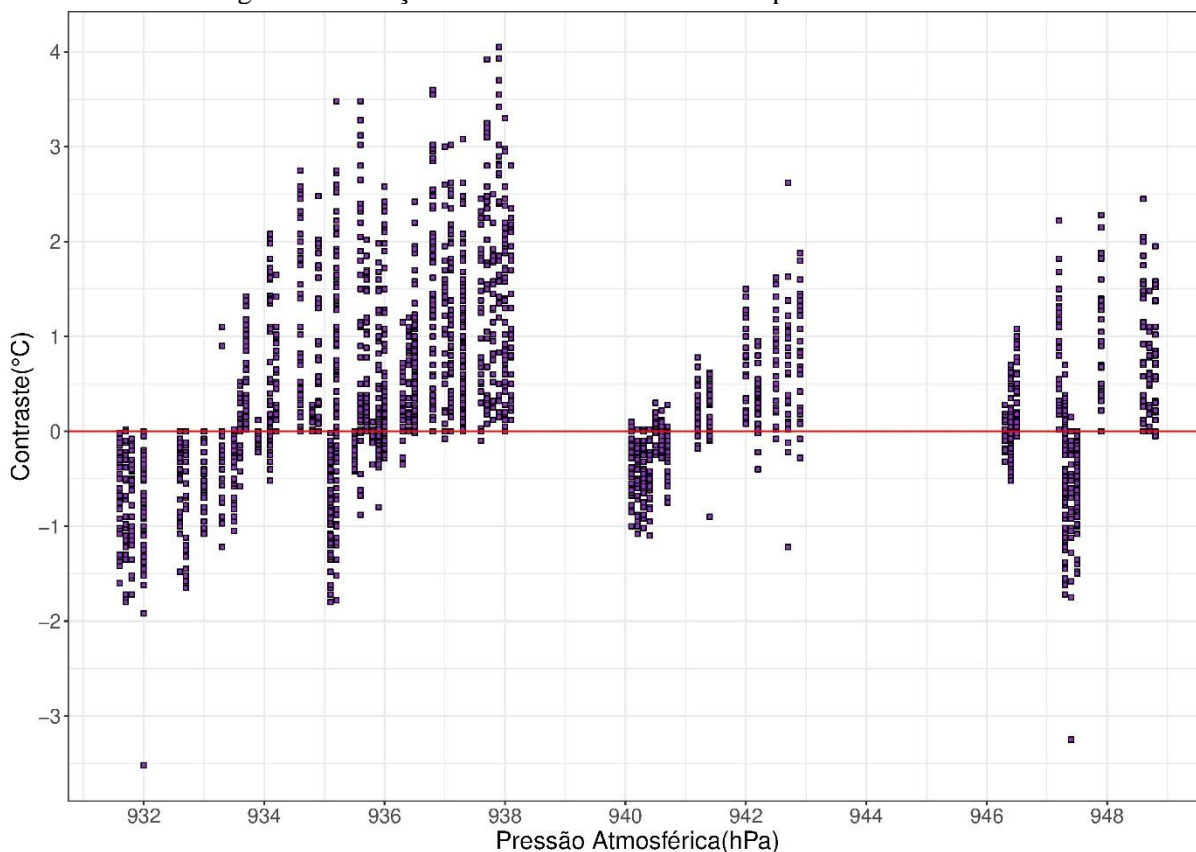


Figura 66- Variabilidade da temperatura superficial em função da pressão atmosférica - Julho



A Figura 67 mostra os dados levantados nesta pesquisa para todos os defeitos simulados, nas três amostras de lajes, durante os 6 meses de observação, com escala específica dentro dos valores de pressão atmosférica observados.

Figura 67- Relação entre valores de contraste e pressão atmosférica



Confirma-se que a variabilidade na pressão atmosférica foi pequena, no entanto, na análise total consegue-se observar uma relação inversa, onde valores de contraste mais notáveis estão concentrados entre os valores de 934 hPa e 938 hPa, os menores levantados. Dessa forma, percebe-se que a pressão atmosférica configura uma variável ambiental que tende a influenciar a detecção de danos. Porém, é importante investigar sua significância e sua relação em conjunto com as demais variáveis investigadas na pesquisa. Watase et al (2015) apontaram em seu estudo a relevância da pressão atmosférica para a temperatura superficial do concreto em levantamentos termográficos.

4.5.2.5 Velocidade do vento

A amostra de concreto recebe e emite calor (energia) principalmente por radiação e a transferência de calor no interior da amostra ocorre predominantemente condução. No entanto a presença de correntes de ar no ambiente aumenta a parcela de transferência de calor por meio da convecção, sendo importante a velocidade do vento neste processo. Washer et al. (2009) estudaram a ação do vento sobre as medidas de contraste termográfico em elementos de concreto e relacionaram os melhores resultados em detecções de danos com dias que apresentaram ventos de baixa velocidade média. A Figura 68 e na Figura 69 mostram a variação da velocidade do vento ao longo do dia nos dias de levantamento em fevereiro e julho. Observam se valores de contrastes significativos em altos e baixos valores de velocidade do vento.

Figura 68- Variabilidade da temperatura superficial em função da velocidade do vento- Fevereiro

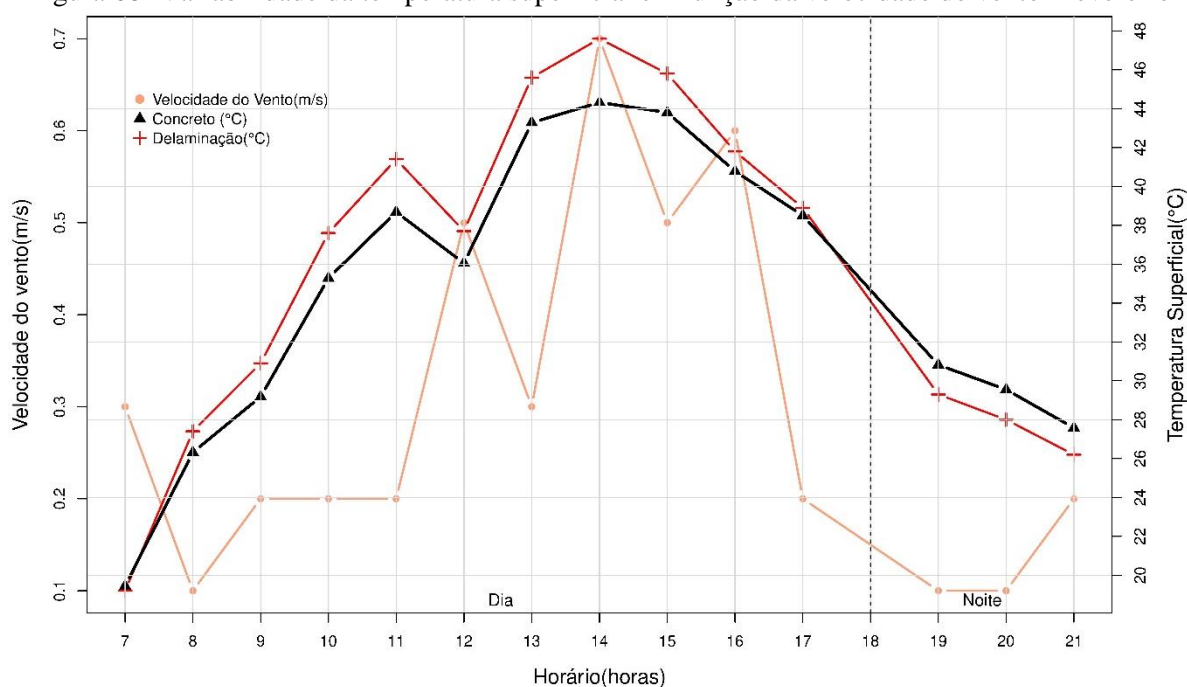
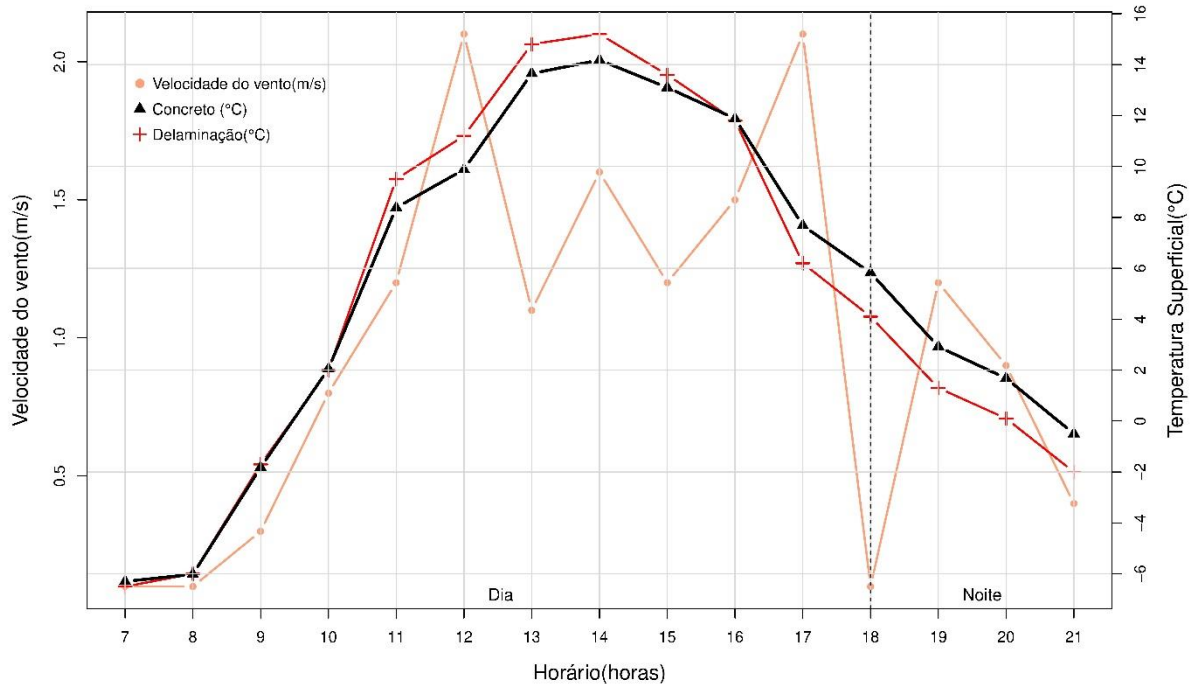
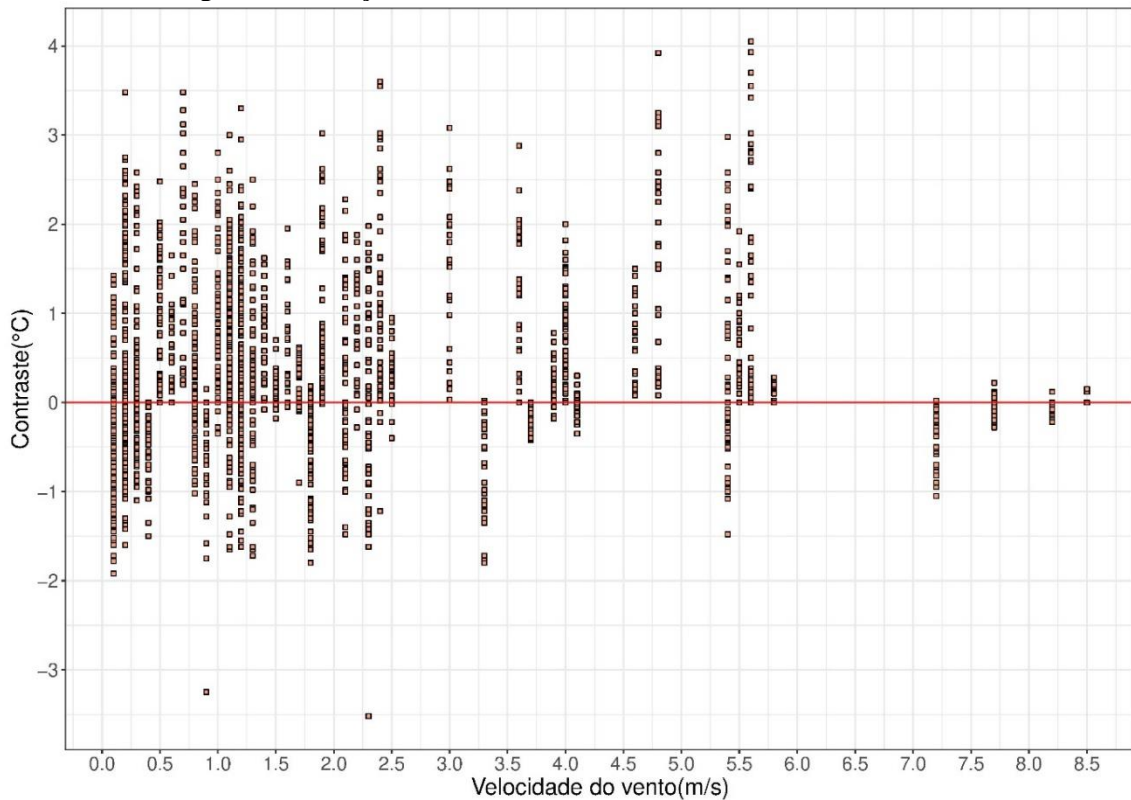


Figura 69- Variabilidade da temperatura superficial em função da velocidade do vento - Julho



A Figura 70 mostra os dados levantados nesta pesquisa para todos os defeitos simulados, nas três amostras de lajes, durante os 6 meses de observação, com escala específica dentro dos valores de velocidade do vento observados.

Figura 70- Relação entre valores de contraste e velocidade do vento



Foram levantados altos valores de contraste para valores baixos e moderados de velocidade do vento. No entanto, valores de contraste consideráveis foram levantados quando existiu ação relativamente maior do vento, retomando a premissa de que a detecção de danos não depende de fatores isolados, mas sim do conjunto de condições ambientais atuantes somado às configurações de inspeção e às características singulares dos danos.

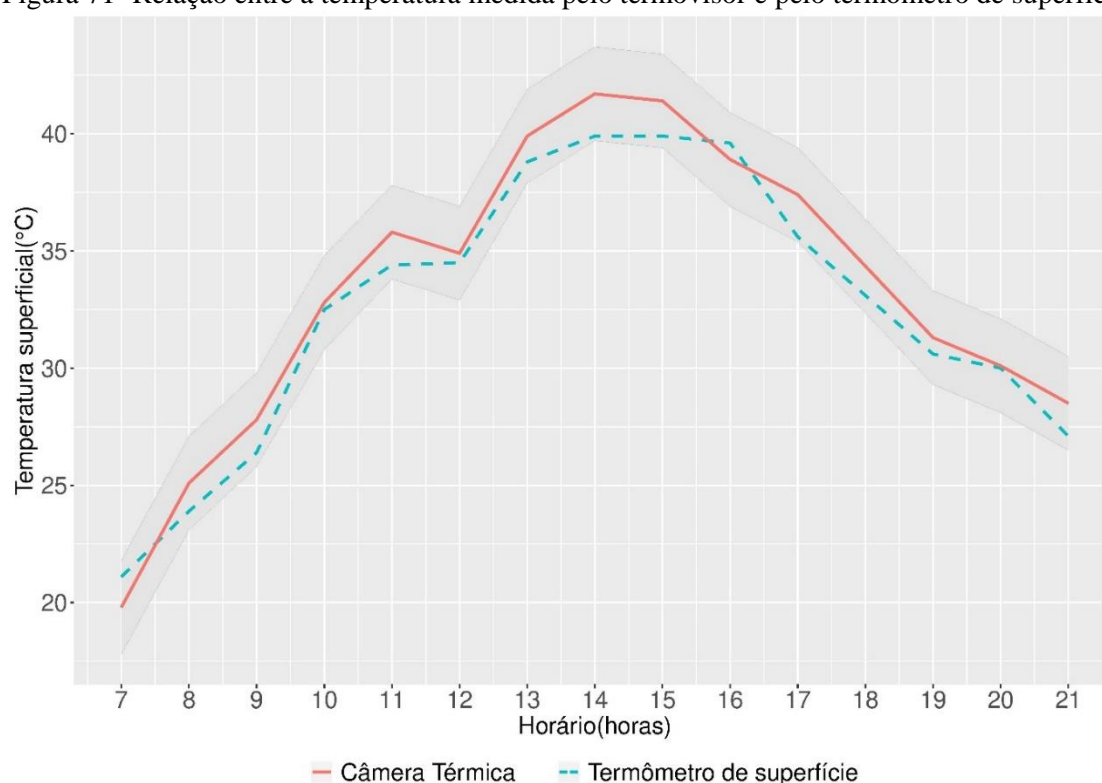
4.5.3 Instrumentação de apoio

Este item busca observar o desempenho dos instrumentos de medição listados no item 3.1.2.2 relacionados à verificação da temperatura superficial e no interior do concreto.

4.5.3.1 Termômetro de superfície

O termômetro de superfície utilizado na pesquisa possuiu como objetivo acompanhar o levantamento de temperaturas superficiais feito pelo termovisor no mês de fevereiro, a fim de validar os valores medidos e verificar se os valores de temperatura convergiam. Conforme visto no item 3.1.2.2, o equipamento utilizado possui uma precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, faixa de confiança (em cinza) utilizada na Figura 71.

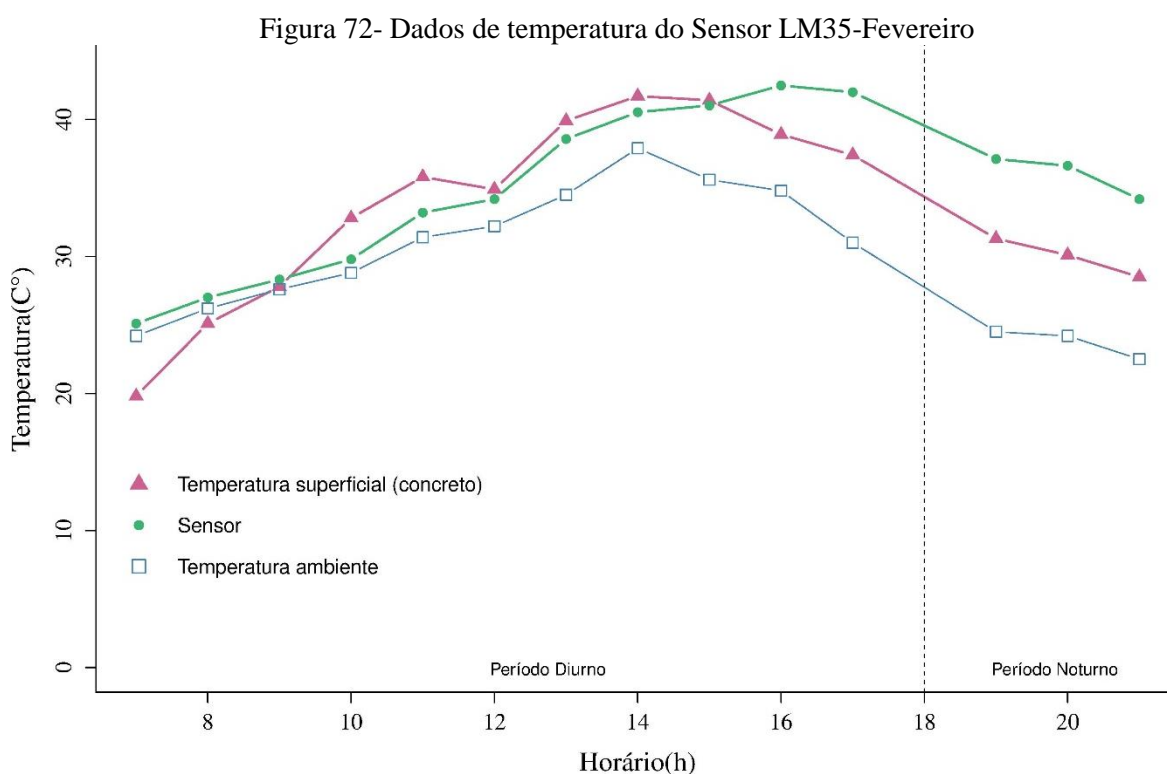
Figura 71- Relação entre a temperatura medida pelo termovisor e pelo termômetro de superfície

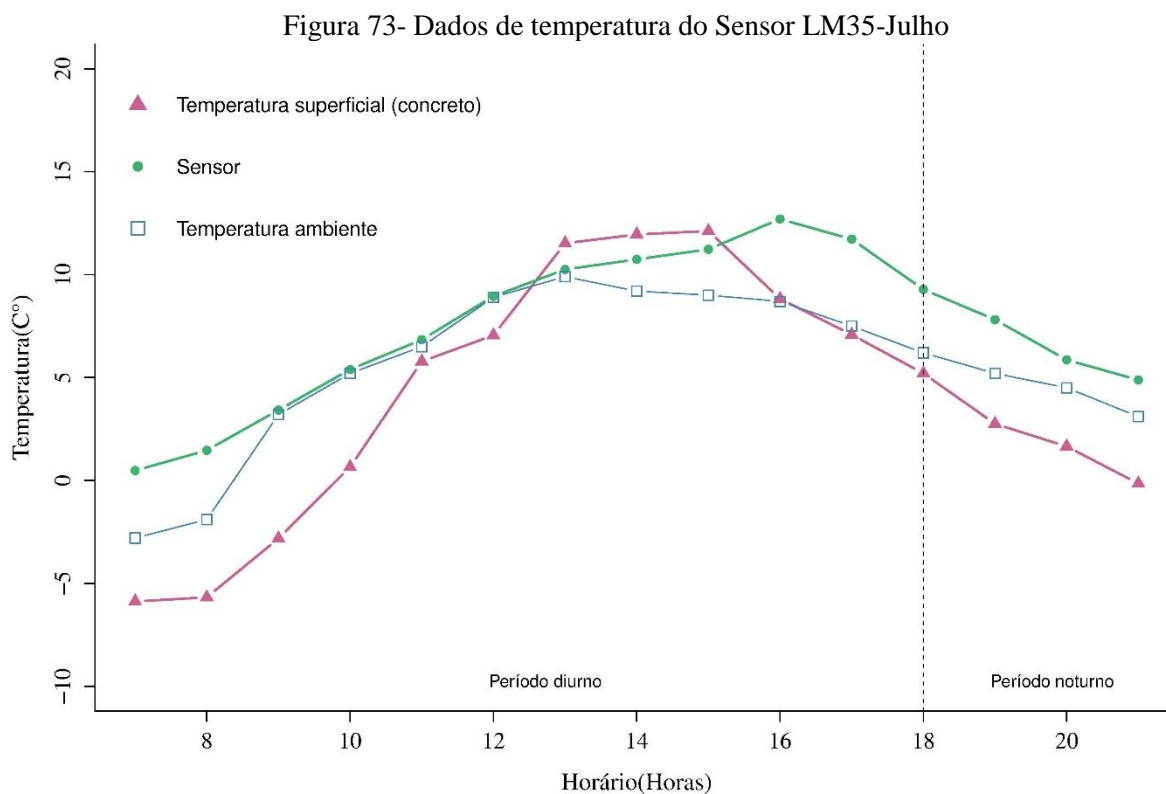


Conforme observado, apesar da variabilidade, os valores levantados pelos equipamentos são convergentes nas 15 observações feitas, mantendo-se a temperatura levantada pelo termovisor dentro da faixa de erro prescrita pelo equipamento de controle. Dessa maneira, assumiu-se como corretas as temperaturas levantadas pela câmera TESTO 881-1.

4.5.3.2 Sensores LM35

A Figura 72 e a Figura 73 mostram a comparação das temperaturas no interior do concreto levantadas pelo sensor LM 35 com a temperatura superficial do concreto na amostra e a temperatura ambiente durante os dias de levantamento nos meses de fevereiro e julho. Nota-se que nos dois levantamentos o comportamento das temperaturas na superfície e no interior do concreto foi convergente, acompanhando a variação da temperatura ambiente, porém a temperatura registrada pelo sensor esteve sempre acima dos valores de temperatura ambiente.





No início da manhã, no entardecer e durante a noite a temperatura no interior do concreto era maior do que sob sua superfície. Nestes períodos o elemento encontrava-se sob pouca ou nenhuma incidência de radiação solar, fazendo com que a transferência de calor partisse de si para o ambiente, em uma taxa relativa ao seu coeficiente de condutividade térmica, estando sua superfície com temperatura inferior ao seu interior. Ademais, nestes horários a umidade relativa do ar é maior e a temperatura ambiente menor, facilitando a transferência de calor da superfície para o ambiente. Os resultados são convergentes com o estudo semelhante de Karunarathne et al. (2010) em pavimentos de concreto.

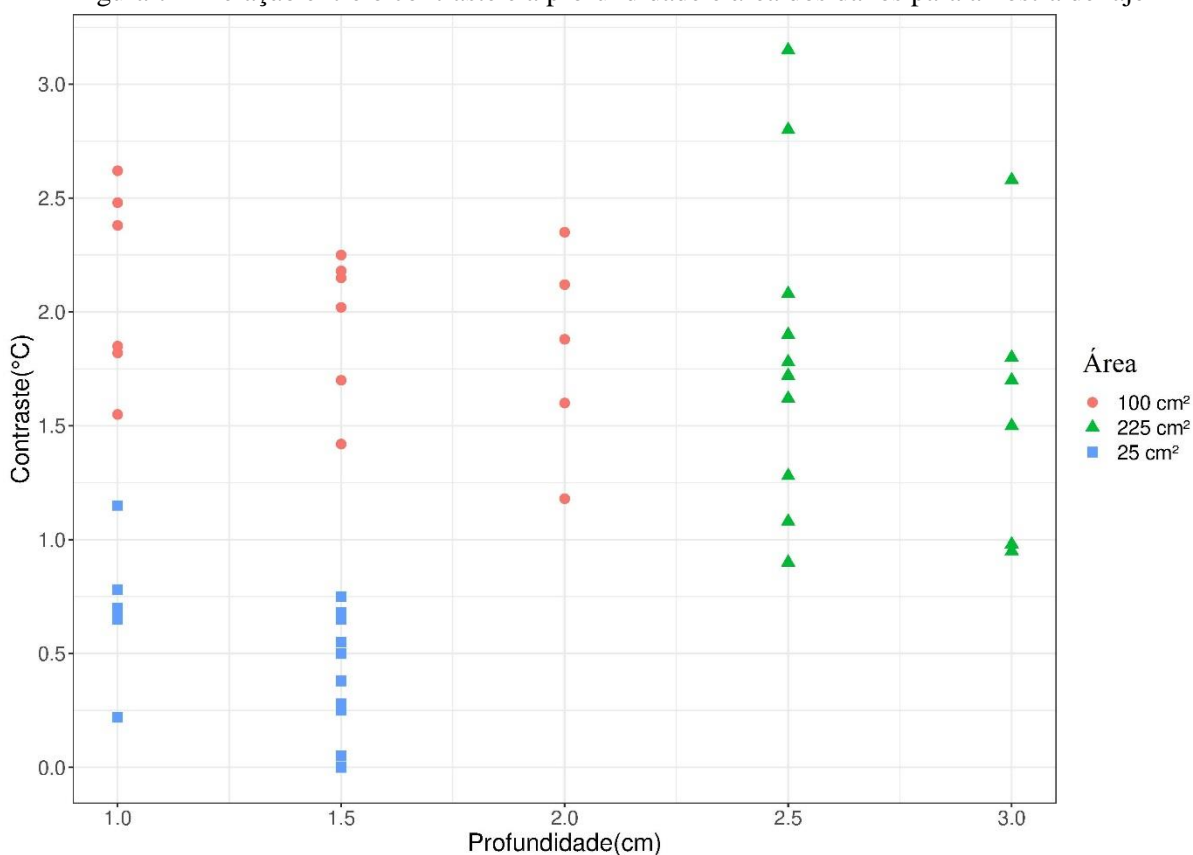
No mês de fevereiro, o ciclo de aquecimento do elemento se iniciou logo após o início da incidência de radiação solar (por volta das 9:00 horas), quando a temperatura superficial do concreto se mostrou acima da temperatura em seu interior. O fluxo de calor, neste caso, parte do ambiente para o interior do concreto, iniciando sobre a superfície e dissipando-se por condução para seu interior. Isto se manteve até a metade da tarde, aproximadamente, quando a temperatura superficial atingiu seu pico máximo e o ciclo de resfriamento (fluxo de calor partindo da amostra para o ambiente) iniciou novamente. No mês de julho, devido às temperaturas mais baixas, este ciclo tornou-se mais curto, pois a superfície do concreto demorou um tempo maior para aquecer-se a partir do início da incidência de radiação solar, o ciclo de aquecimento do elemento se iniciou mais tarde e somente por volta das 13:00 horas a

temperatura superficial do concreto foi registrada acima da temperatura em seu interior. Isto se manteve também por um período mais curto de tempo, quando próximo às 17:00 horas a temperatura superficial atingiu seu pico máximo e o ciclo de resfriamento iniciou novamente.

4.5.4 Variabilidade em função das configurações dos danos: área e profundidade

Considerando as profundidades verificadas, a Figura 74 mostra os resultados para a amostra de laje L2 em levantamentos feitos às 12:00 horas, em todos os meses levantados. A laje possui 9 defeitos simulados, com profundidades entre 1,0 e 3,0 centímetros. É visto que os defeitos de maior área, mesmo posicionados em uma profundidade maior, apresentaram contrastes maiores do que aqueles de menor área, mas com profundidade menor. Conforme abordado no item 4.4.1.1, isso ocorre porque a quantidade de calor retida no dano é maior, fazendo com que a superfície sob o dano emita uma quantidade de radiação maior que os danos com menor área, aumentando probabilidade de detecção dos danos termograficamente.

Figura 74- Relação entre o contraste e a profundidade e área dos danos para amostra de laje



Quanto ao parâmetro de área, isoladamente, a Figura 75 compara todos os 27 danos, nas 3 placas, em todo o horizonte do levantamento feito. Nota-se, novamente, que os valores de contraste foram maiores para os defeitos de maior área. Em seguida a Figura 76 mostra a relação entre os valores de contraste e de profundidade do dano, isoladamente. Nesta, observa-se o gradiente é mais elevado para defeitos posicionados mais próximos à superfície.

Figura 75- Relação entre os valores de contraste e área do dano para amostra de laje

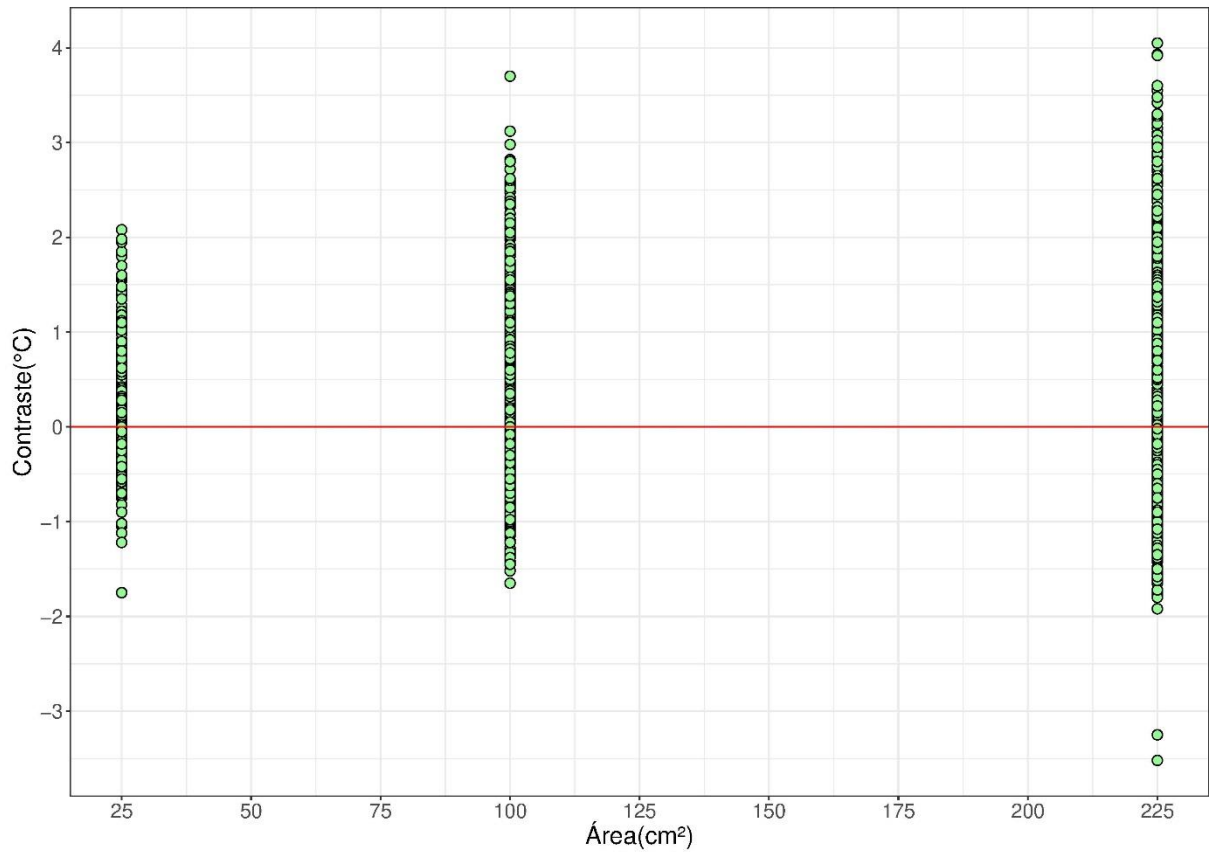
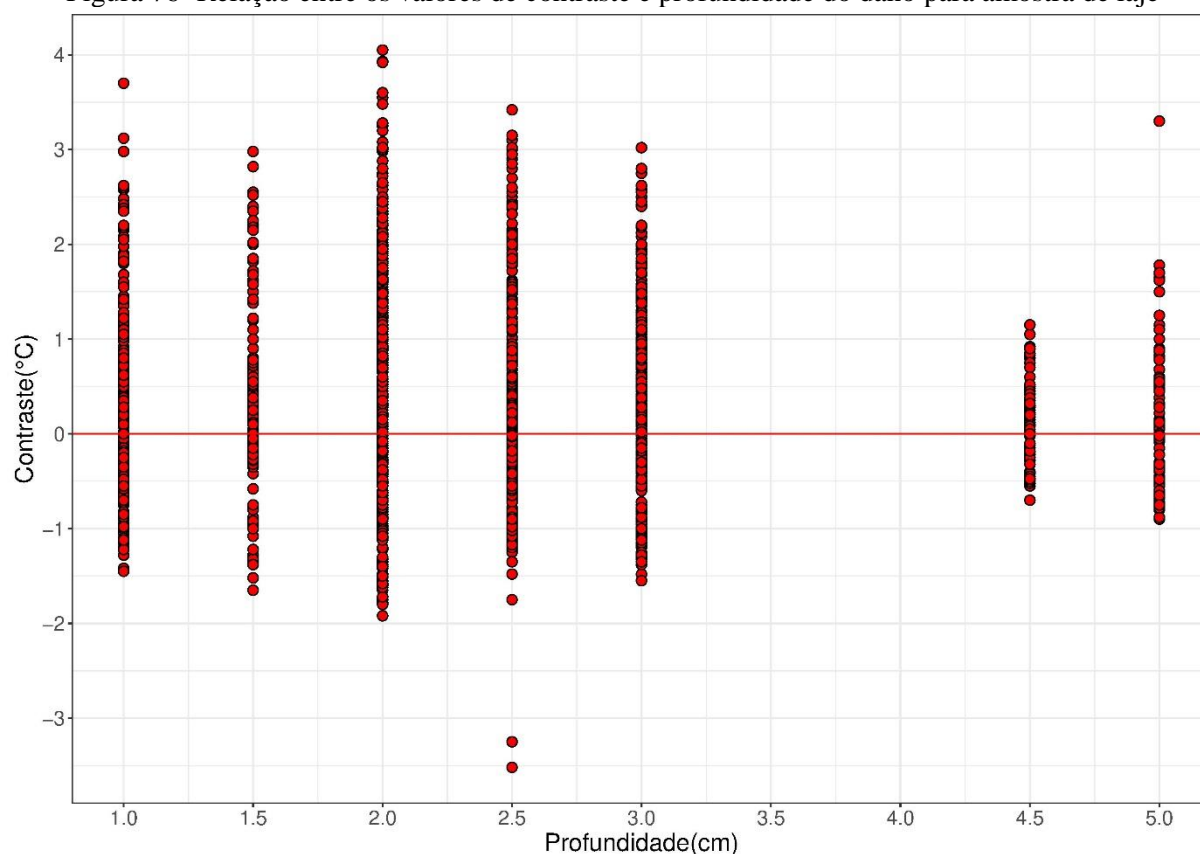


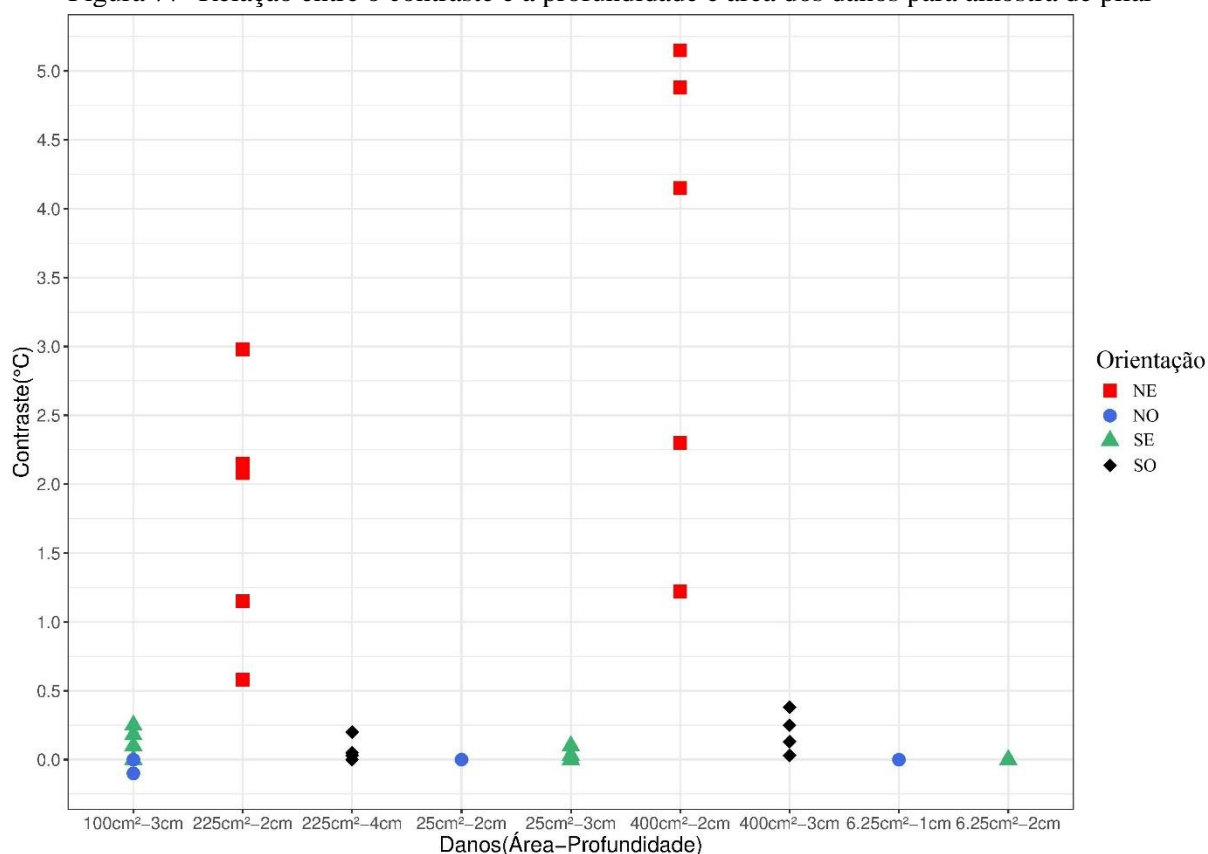
Figura 76- Relação entre os valores de contraste e profundidade do dano para amostra de laje



Estas observações são convergentes com os trabalhos de Hiasa et al. (2017a) e Tran et al. (2017), que estudaram os efeitos da área e profundidade dos danos sob as detecções termográficas. Mesmo observando que defeitos próximos à superfície foram mais propensos a detecção, quando se compara os dois fatores (área e profundidade), a área de delaminação foi o parâmetro mais influente para a detectabilidade de danos.

Para o pilar, considerou-se os danos dispostos nas 4 faces da amostra, conforme profundidades verificadas na Figura 37. Os resultados vistos na Figura 77 são de levantamentos feitos às 12:00 horas, durante os seis meses de estudo, e nos permitem observar mais uma vez a influência da orientação solar e do período de levantamento quando se consideram superfícies verticais.

Figura 77- Relação entre o contraste e a profundidade e área dos danos para amostra de pilar



Conforme já discutido anteriormente, a face nordeste do pilar apresentou os máximos valores de contrastes por tratar-se da face que recebeu mais radiação solar direta durante o dia. Nesta face estavam posicionados os defeitos de maior área (400 e 225 cm²), sendo este fator outro contribuinte para os altos valores de contraste. Porém os defeitos de mesma área estavam posicionados na face Sudoeste e apresentaram contrastes inferiores aqueles previstos na face nordeste, justificado principalmente pela orientação solar.

A Figura 78 compara o resultado de detecção de danos para todos os 10 danos, no pilar P1, em todo o horizonte do levantamento, em função da área de cada dano. Em seguida, a Figura 79 mostra a relação entre os valores de contraste e de profundidade do dano, isoladamente. Nota-se que, assim como ocorreu nas lajes, os valores de contraste foram maiores para os defeitos de maior área, somando-se o fato de que parte dos defeitos de maior área estavam posicionados na face Nordeste, onde há grande incidência de radiação solar direta no local da pesquisa.

Figura 78- Relação entre os valores de contraste e área dos danos para amostra de pilar

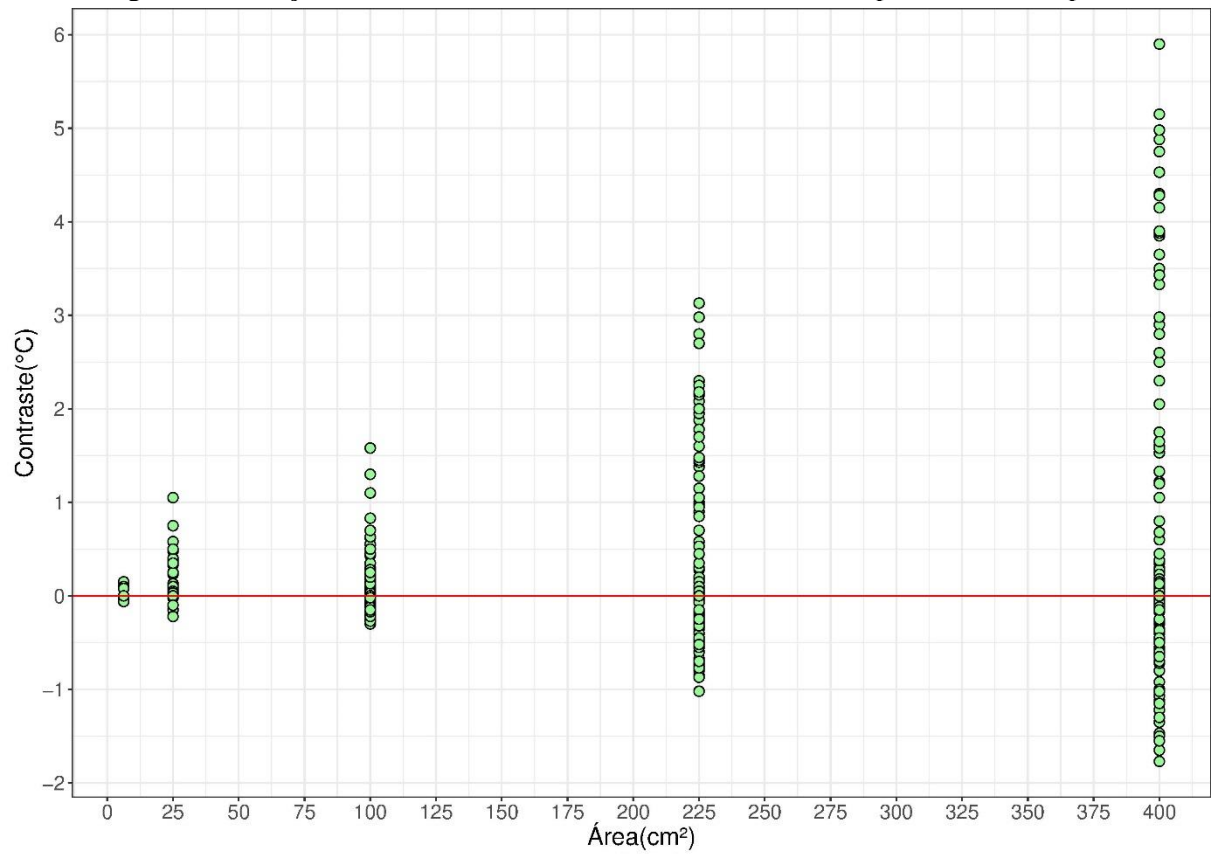
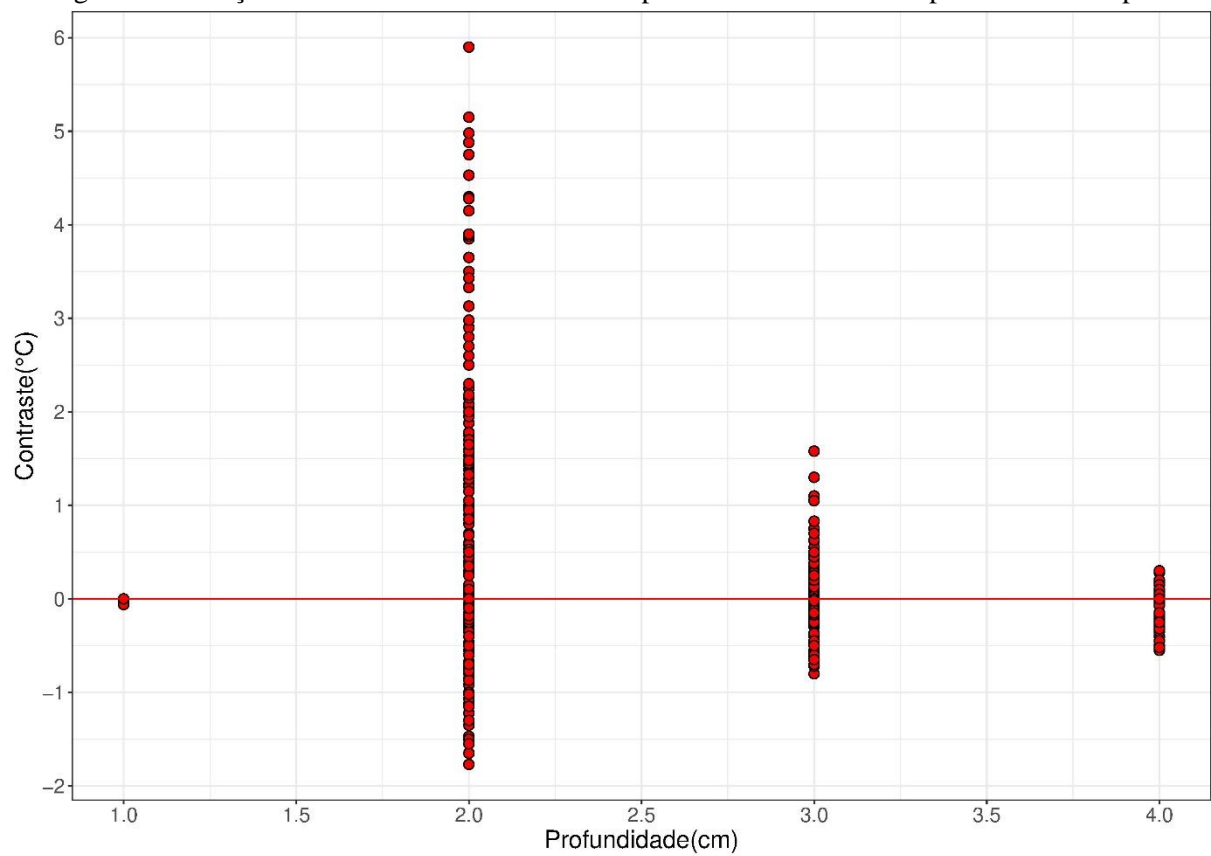


Figura 79- Relação entre os valores de contraste e profundidade dos danos para amostra de pilar



Quanto às profundidades, os defeitos posicionados 2 centímetros abaixo da superfície apresentaram os contrastes mais notáveis. Alguns destes também estavam posicionados na face Nordeste, o que conjuntamente contribuiu para o aquecimento maior de sua superfície. Mas observa-se que a menor das profundidades (1 cm) não apresentou contraste significativo. Isso porque está nesta posição o menor dos defeitos, de 6.25 cm², que mesmo que próximo à superfície reteve pouca quantidade de calor e não foi notado na inspeção termográfica realizada.

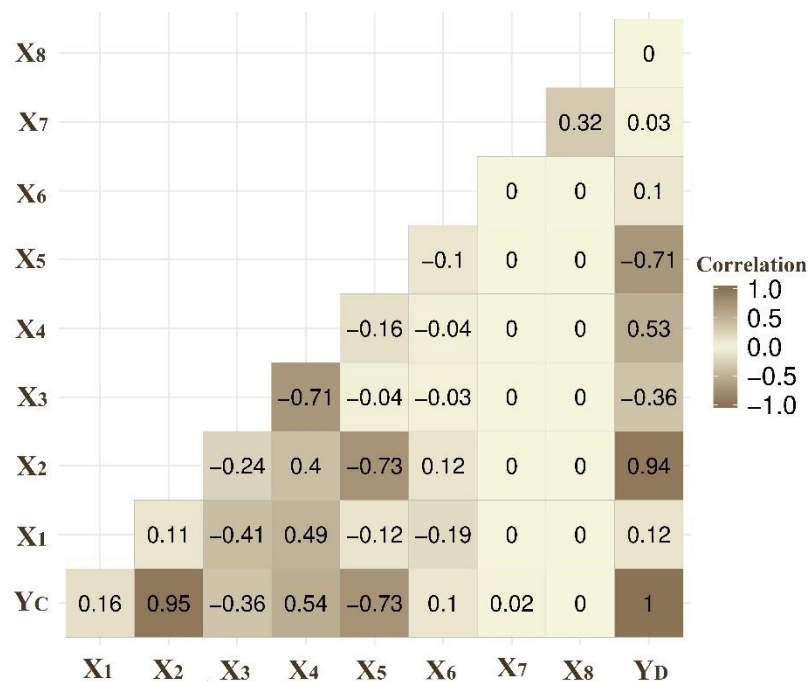
4.6 Abordagem estatística

4.6.1 Definição do modelo de regressão linear multivariada

Definiu-se inicialmente as variáveis dependentes como sendo a temperatura superficial do concreto sem a presença de danos (y_c) e a temperatura superficial do concreto com presença de danos (y_d), ambos sobre as amostras de lajes. As variáveis estatísticas iniciais foram as mesmas nas duas equações, que calculam o conjunto de características ambientais, de inspeção e danos medidas no estudo: X_1) horário de levantamento; X_2) temperatura ambiente; X_3) umidade relativa do ar; X_4) radiação solar; X_5) pressão atmosférica; X_6) velocidade do vento; X_7) área do dano; X_8) profundidade do dano. A análise determinou a importância e os tipos de relação ou inter-relações entre as variáveis independentes para a previsão da variável dependente.

A partir do conhecimento teórico sobre a termografia e da análise dos resultados dos levantamentos, percebeu-se que grande parte das variáveis ambientais possuem correlação entre si. A Figura 80 reforça esta premissa, onde o grau de correlação, ou colinearidade, é mostrado. O grau de correlação varia entre os valores de -1 e 1, sendo que os valores positivos representam a de correlação positiva entre as variáveis, ou seja, quando uma aumenta a outra também tem valor acrescido. Os valores negativos, por outro lado, indicam que quando uma das variáveis aumenta, a outra tende a diminuir. Quanto mais próximo o valor estiver de 1, positivo ou negativo, mais forte é a colinearidade entre as variáveis.

Figura 80- Diagrama de correlação entre as variáveis da regressão de X1 a X8



Nota-se que as variáveis ambientais, em grande parte, correlacionam-se entre si e o horário correlaciona-se com a umidade relativa do ar e com a radiação solar. Apenas as variáveis de área e profundidade do dano são praticamente independentes, com valores de correlação próximos a 0. Os maiores níveis de colinearidade entre as variáveis independentes são negativos, vistos entre a pressão atmosférica e a temperatura ambiente (-0,73) e a radiação solar e a umidade relativa do ar (-0,71). Em relação à colinearidade positiva, nota-se que os valores de radiação solar se correlacionam com os valores de horário do levantamento (0,49) e com os valores da temperatura ambiente (0,40).

Conforme é notado, algumas das variáveis demonstram multicolinearidade, ou seja, relacionam-se com duas ou mais variáveis. O grau de multicolinearidade pode ser medido pelo fator de inflação de variância (FIV), valor inverso da tolerância, que é a medida de variabilidade da variável independente selecionada não explicada pelas outras variáveis independentes. Quanto mais próximo de 1 os valores de FIV, menor a multicolinearidade (HAIR JR. et al. 2009). A Tabela 4 mostra os valores FIV, calculados no software RStudio, para a variável estatística (conjunto de variáveis independentes) de y_c . Os valores são os mesmos para a segunda equação de regressão, pois as duas variáveis dependentes possuem as mesmas observações e as mesmas variáveis.

Tabela 4- Fator de Inflação de Variância (FIV) para a variáveis

	Área	Horário	Profundidade	Temperatura ambiente	Umidade Relativa	Velocidade do Vento	Radiação Solar	Pressão atmosférica
FIV	1,12	1,48	1,12	2,86	2,25	1,07	2,58	2,55

Os valores de multicolinearidade são relativamente altos para as variáveis de temperatura ambiente, radiação solar, pressão atmosférica e umidade relativa do ar. Segundo Hair Jr. et al. (2009) um valor limite de corte para a multicolinearidade é 10, onde valores acima deste limite distorcem significativamente a variável estatística de regressão. Considerando este valor, os níveis presentes no estudo estão aceitáveis, devendo apenas serem adequadamente considerados na análise de sensibilidade do modelo.

Após a análise anterior, adicionou-se o efeito de interação entre as variáveis ambientais e de horário do estudo, devido a existência comprovada de correlação. O teste feito no software estatístico mostrou um acréscimo considerável no nível de ajuste do modelo, com maior nível de significância e maior grau de generalização dos modelos quando adicionados os efeitos moderadores. Além do acréscimo de representatividade ocasionado pela consideração das interações, a Tabela 5 mostra o processo de *backward* utilizado no software RStudio para auxiliar na definição da equação final do modelo de regressão. O sinal de adição (+) entre as variáveis representa a relação entre as variáveis independentes sem interação, enquanto o símbolo de multiplicação (*) representa as variáveis interagindo entre si. Os trechos do modelo elevados ao quadrado (^2) representam que, dentre essas variáveis, será calculada apenas interações de primeira ordem

Tabela 5- Análise da equação do modelo de regressão

TEMPERATURA SUPERFICIAL	ÁREA NÃO DANIFICADA					ÁREA DANIFICADA				
VARIÁVEIS	R ²	Ajust R ²	F	GL	Valor p	R ²	Ajust R ²	F	GL	Valor p
Modelos sem interação										
$X_1+X_2+X_3+X_4+X_5+X_6+X_7+X_8$	0.9459	0,9456	3441	8-1575	< 2.2e ⁻¹⁶	0.9358	0.9355	2871	8-1575	< 2.2e ⁻¹⁶
$X_1+X_2+X_3+X_4+X_5+X_6+X_7$	0.9459	0.9456	3933	7-1566	< 2.2e ⁻¹⁶	0.9356	0.9354	3273	7-1576	< 2.2e ⁻¹⁶
$X_1+X_2+X_3+X_4+X_5+X_6$	0.9453	0.9451	4539	6-1577	< 2.2e ⁻¹⁶	0.9345	0.9343	3750	6-1577	< 2.2e ⁻¹⁶
$X_1+X_2+X_3+X_4+X_5$	0.945	0.9449	5426	5-1578	< 2.2e ⁻¹⁶	0.9341	0.9338	4470	5-1578	< 2.2e ⁻¹⁶
Modelos com interação total entre todas as variáveis										
$X_1*X_2*X_3*X_4*X_5*X_6*X_7*X_8$	0.9916	0.9912	2747	65-1518	< 2.2e ⁻¹⁶	0.9897	0.99892	2237	65-1518	< 2.2e ⁻¹⁶
$X_1*X_2*X_3*X_4*X_5*X_6*X_7$	0.9916	0.9912	2787	64-1519	< 2.2e ⁻¹⁶	0.9895	0.989	2234	64-1519	< 2.2e ⁻¹⁶
$X_1*X_2*X_3*X_4*X_5*X_6$	0.991	0.9906	2645	63-1520	< 2.2e ⁻¹⁶	0.9884	0.9879	2048	63-1520	< 2.2e ⁻¹⁶
$X_1*X_2*X_3*X_4*X_5$	0.9765	0.976	2081	31-1552	< 2.2e ⁻¹⁶	0.972	0.9715	1740	31-1552	< 2.2e ⁻¹⁶
Modelos com interação de primeira ordem										
$X_7+X_8+(X_1*X_2*X_3*X_4*X_5*X_6)^2$	0.9765	0.9762	2820	23-1560	< 2.2e ⁻¹⁶	0.9731	0.9727	2458	23-1560	< 2.2e ⁻¹⁶
$X_7+(X_1*X_2*X_3*X_4*X_5*X_6)^2$	0.9765	0.9762	2948	22-1561	< 2.2e ⁻¹⁶	0.973	0.9726	2553	22-1561	< 2.2e ⁻¹⁶
$(X_1*X_2*X_3*X_4*X_5*X_6)^2$	0.9759	0.9756	3012	21-1562	< 2.2e ⁻¹⁶	0.9718	0.9715	2566	21-1562	< 2.2e ⁻¹⁶
$(X_1*X_2*X_3*X_4*X_5)^2$	0.9702	0.9699	3407	15-1568	< 2.2e ⁻¹⁶	0.9656	0.9652	1931	15-1568	< 2.2e ⁻¹⁶

O objetivo foi eliminar variáveis independentes que se mostraram pouco correlacionadas com as variáveis dependentes (Figura 80), até atingir um adequado nível de ajuste do modelo, com pertinentes níveis de significância e grau de generalização. Os melhores ajustes foram obtidos para os modelos com interação total entre variáveis. Porém, a equação resultaria em um modelo matemático extenso, com 65 coeficientes e interações de até sétima ordem, que dificultariam a compreensão da importância de cada variável para a temperatura prevista. Para facilitar a interpretação de resultados, adotou-se para equação apenas interações de primeira ordem.

Assim como visto no gráfico que ilustra a correlação entre as variáveis (Figura 80), os dados referentes à configuração dos danos (área e profundidade) e a velocidade do vento não possuem relação significativa com as variáveis dependentes, visto que sua eliminação das equações não causou grande prejuízo à representatividade do modelo. Em vista disso, decidiu-se, por parcimônia, manter a equação mais simples, com apenas as variáveis ambientais de temperatura ambiente (X_2), umidade relativa do ar (X_3), radiação solar (X_4) e pressão atmosférica (X_5), juntamente com o horário de inspeção (X_1). Dessa forma, o conjunto de dados a ser coletado torna-se menos extenso, facilitando a interpretação dos resultados sem perda significativa de precisão. A seleção das variáveis também tomou como base o conhecimento do processo de inspeção termográfica, transferência de calor e estudos científicos aplicados em casos similares (item 2.7). Além disso, os parâmetros relacionados à área e profundidade danificadas não estarão disponíveis nas inspeções práticas.

Em relação ao tamanho da amostra para cálculo dos modelos de regressão, a proporção desejada é de, pelo menos, 15 a 20 observações para cada variável independente (HAIR JR. et al. 2009). No presente estudo há 316 observações por variável independente, atendendo largamente essa premissa. Este número maior de observações foi benéfico pois aumenta o número de graus de liberdade da análise, aumentando por consequência o poder do teste e o grau de inferência dos resultados obtidos. Em relação à possibilidade de superajuste, a validação do modelo feita em uma terceira amostra visou garantir a generalidade das descobertas.

4.6.2 Implementação do modelo de regressão

A Tabela 6 e a Tabela 7 mostram os resultados transcritos do teste realizado no software RStudio para o modelo de regressão que prevê a temperatura superficial sobre o concreto danificado e sem a presença de danos, respectivamente. Os valores da primeira coluna numérica da tabela representam os coeficientes de regressão para cada variável independente e o efeito

moderador. O erro padrão é uma estimativa do desvio padrão de cada coeficiente, ou seja, quanto ele pode variar a cada observação. Já a estatística t (valor t) representa a divisão do valor do coeficiente por seu erro padrão. Logo, quanto menor for o valor do erro padrão e, conseqüentemente, maior o valor t, maior significância terá o coeficiente calculado (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). Para as duas equações, a maior parte dos coeficientes compostos por efeitos moderadores foram significativos, contribuindo de maneira importante para a composição da variável dependente.

Tabela 6- Resultados do modelo de regressão para temperatura superficial do concreto danificado (y_D)

Código	Variáveis	Coefficientes	Erro padrão	Valor t	Valor p
	Intercepto	1532.2852	197.7000	7.751	1.63 e ⁻¹⁴
X ₁	Horário	-4.154	6.259000	-0.664	0.50702
X ₂	Temperatura Ambiente	-3.5265	1.898000	-1.858	0.06340
X ₃	Umidade Relativa do Ar	13.9929	2.489000	-5.622	2.23 e ⁻⁰⁸
X ₄	Pressão Atmosférica	0.1797	0.035280	5.093	3.95 e ⁻⁰⁷
X ₅	Pressão Atmosférica	-1.6089	0.208400	-7.719	2.08 e ⁻¹⁴
X ₁ . X ₂	Time* Temperatura Ambiente	0.0126	0.004464	2.822	0.00483
X ₁ . X ₃	Time* Umidade Relativa do Ar	0.0059	0.002145	2.766	0.00574
X ₁ . X ₄	Time* Pressão Atmosférica	-0.0009	0.000036	-24.991	<2 e ⁻¹⁶
X ₁ . X ₅	Time* Pressão Atmosférica	0.0039	0.006580	0.591	0.55476
X ₂ . X ₃	Temperatura Ambiente * Umidade Relativa do Ar	0.0092	0.001038	8.892	<2 e ⁻¹⁶
X ₂ . X ₄	Temperatura Ambiente * Pressão Atmosférica	-0.00009	0.000017	-5.551	3.33 e ⁻⁰⁸
X ₂ . X ₅	Temperatura Ambiente * Pressão Atmosférica	0.0039	0.002035	1.912	0.05609
X ₃ . X ₄	Umidade Relativa do Ar * Pressão Atmosférica	-0.00004	0.000006	-6.441	1.58 e ⁻¹⁰
X ₃ . X ₅	Umidade Relativa do Ar * Pressão Atmosférica	0.0146	0.002626	5.562	3.13 e ⁻⁰⁸
X ₄ . X ₅	Pressão Atmosférica * Pressão Atmosférica	-0.0002	0.000037	-4.571	5.22 e ⁻⁰⁶

Equação de regressão:
 $y_D = 1532.28 - 4.15X_1 - 3.53X_2 - 14.0X_3 + 0.18 X_4 - 1.61X_5 + 0.013 X_1, X_2 + 0.006 X_1, X_3 - 0.0009 X_1, X_4 + 0.004 X_1, X_5 + 0.009 X_2, X_3 - 0.0001 X_2, X_4 + 0.0039 X_2, X_5 - 4.02 E^{-05} X_3, X_4 + 0.015 X_3, X_5 - 0.0002 X_4, X_5 + e$

Erro padrão residual: 2.295 °C em 1568 graus de liberdade R²: 96,56%, Valor F: 2931, valor p: < 2.2e⁻¹⁶

Tabela 7- Resultados do modelo de regressão para temperatura superficial do concreto sem danos (y_C)

Código	Variáveis	Coefficientes	Erro padrão	Valor t	Valor p
	Intercepto	1645.0754	178.4000	9.2190	<2 e ⁻¹⁶
X ₁	Horário	-2.86850	5.650000	-0.508	0.6117
X ₂	Temperatura Ambiente	-5.57640	1.713000	-3.255	0.0012
X ₃	Umidade Relativa do Ar	-14.7094	2.246000	-6.548	7.88 e ⁻¹¹
X ₄	Pressão Atmosférica	0.14280	0.031840	4.485	7.82 e ⁻⁰⁶
X ₅	Pressão Atmosférica	-1.73190	0.188100	-9.205	<2 e ⁻¹⁶
X ₁ . X ₂	Time* Temperatura Ambiente	0.01070	0.004029	2.657	0.0080
X ₁ . X ₃	Time* Umidade Relativa do Ar	0.00510	0.001936	2.644	0.0083
X ₁ . X ₄	Time* Pressão Atmosférica	-0.00080	0.000033	-23.733	<2 e ⁻¹⁶
X ₁ . X ₅	Time* Pressão Atmosférica	0.00270	0.005938	0.450	0.6528
X ₂ . X ₃	Temperatura Ambiente * Umidade Relativa do Ar	0.00870	0.000937	9.238	<2 e ⁻¹⁶
X ₂ . X ₄	Temperatura Ambiente * Pressão Atmosférica	-0.0001	0.000015	-5.217	2.06 e ⁻⁰⁷
X ₂ . X ₅	Temperatura Ambiente * Pressão Atmosférica	0.00610	0.001837	3.318	0.0009
X ₃ . X ₄	Umidade Relativa do Ar * Pressão Atmosférica	-0.00004	0.000006	-6.859	9.95 e ⁻¹²
X ₃ . X ₅	Umidade Relativa do Ar * Pressão Atmosférica	0.01540	0.002371	6.499	1.09 e ⁻¹⁰
X ₄ . X ₅	Pressão Atmosférica * Pressão Atmosférica	-0.00010	0.000033	-3.968	7.56 e ⁻⁰⁵

Equação de regressão:
 $y_C = 1645.07 - 2.87X_1 - 5.58X_2 - 14.71X_3 + 0.14 X_4 - 1.73X_5 + 0.011 X_1, X_2 + 0.005 X_1, X_3 - 0.0008 X_1, X_4 + 0.003 X_1, X_5 + 0.009 X_2, X_3 - 0.0001 X_2, X_4 + 0.0061 X_2, X_5 - 3.86 E^{-05} X_3, X_4 + 0.015 X_3, X_5 - 0.0001 X_4, X_5 + e$

Erro padrão residual: 2.072 °C em 1568 graus de liberdade R²: 97,02%, Valor F: 3407, valor p: < 2.2e⁻¹⁶

Para uma melhor compreensão dos efeitos moderadores, um exemplo da variável independente “horário” é mostrado na Equação 11, em relação à equação de regressão resultante na Tabela 7, para a temperatura da superfície do concreto sem danos. Para calcular a contribuição dessa variável, ou seja, o horário, recomenda-se estimar a combinação da contribuição individual com os outros coeficientes de interação, multiplicados pelas respectivas variáveis moderadoras.

$$\frac{\Delta y_c}{\Delta x_1} = -2.87 + 0.011x_2 + 0.005x_3 - 0.0008x_4 + 0.003x_5 \quad \text{Equação 11}$$

Onde $\Delta y_c / \Delta x_1$ representa o efeito parcial de x_1 sobre y_c .

Como se trata de variáveis contínuas, que possuem um amplo intervalo de valores e que se correlacionam com outras 4 variáveis, é difícil estimar isoladamente a contribuição de cada uma. Na seção 4.6.5.1 o aspecto de importância de cada variável será abordado com mais detalhes.

O valor de R^2 mostrado na Tabela 6 e na Tabela 7 representa o coeficiente de determinação e mede o grau de ajuste do modelo estatístico, 02%) e nos aponta que os valores previstos pelo modelos propostos se ajustaram linear generalizado. Quanto maior é o valor de R^2 , medido em porcentagem, mais explicativo é o modelo (HAIR JR. et al. 2009). O valor de R^2 encontrado foi alto nos dois modelos (96,56% e 97% adequadamente aos valores observados).

O teste global F (Fisher-Snedecor) representa a relação entre a variação explicada e não explicada pelo modelo global. Trata-se de um teste de hipótese sobre os parâmetros da equação, para verificar a efetividade do modelo. Um valor F robusto foi obtido em ambos os testes, o que indica que a variável estatística do modelo especificado é importante para a explicação dos valores de temperatura da superfície para concreto danificado e sólido. O resultado do valor p do teste global, menor que o nível $\alpha = 0,05$, indicou que a hipótese nula do teste F global, ou seja, todos os parâmetros não contribuem para a variável resposta, pode ser rejeitada, com 95% de nível de confiança. Assim, indica que a relação pode ser explicada por regressão linear, apontando que os modelos não são específicos apenas para a amostra, mas significativos em várias porções da população. O pequeno valor do erro padrão residual geral (próximo a 2 ° C) também suporta esta observação. Os graus de liberdade (DF) são calculados pela diferença entre os valores observados e previstos. No presente caso, temos 1584 observações e 16 valores previstos (15 variáveis e intercepto), resultando em um modelo com 1568 graus de liberdade. Quanto maior o número de graus de liberdade do modelo, melhor sua generalização e menor a chance de adaptação excessiva do modelo (HAIR JR. et al. 2009).

4.6.3 Suposições em análise de regressão múltipla

Atender as suposições referentes à linearidade, à normalidade, à homocedasticidade (variância constante) e independência dos resíduos da análise de regressão é um passo fundamental para garantir a representatividade dos resultados (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). Para tanto, os gráficos de resíduos padronizados são utilizados.

Primeiramente, na Figura 81 são ilustrados os resultados para a análise de regressão que determinou a temperatura superficial sobre o concreto sem danos. Na Figura 82, são vistos os resultados para a análise de regressão que determinou a temperatura superficial sobre o concreto com a presença de danos subsuperficiais. A análise pode ser feita de maneira conjunta pois os dois modelos possuem comportamento convergente no que concerne a distribuição de seus dados. A variável estatística possuiu, nos dois casos, distribuição muito próxima à distribuição normal, conforme visto na distribuição do histograma dos resíduos da Figura 81a e Figura 82a. No gráfico Quantile-Quantile (QQ) a distribuição real dos dados se aproxima da diagonal que representa uma distribuição normal padrão, mostrando assim que a amostra atende aos requisitos da normalidade (Figura 81b e Figura 82b).

Figura 81- Suposições de regressão para y_c

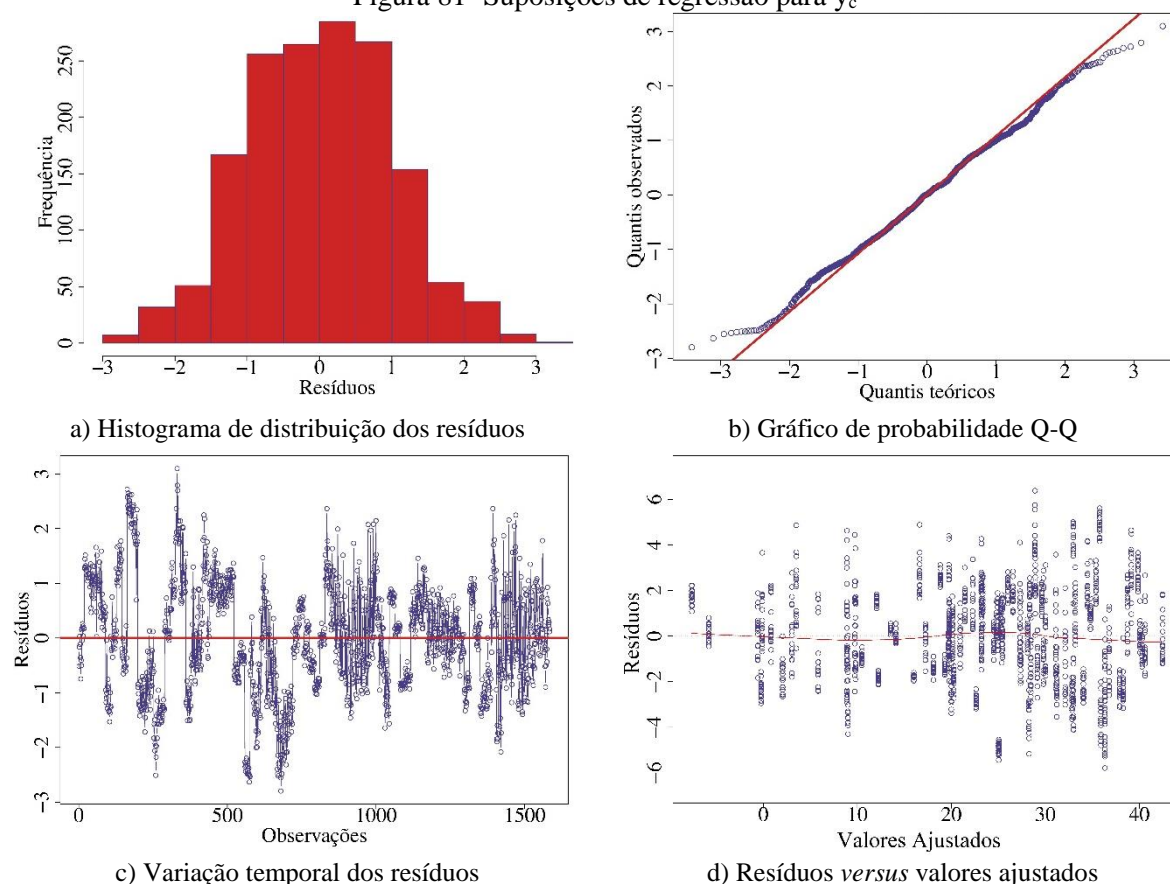
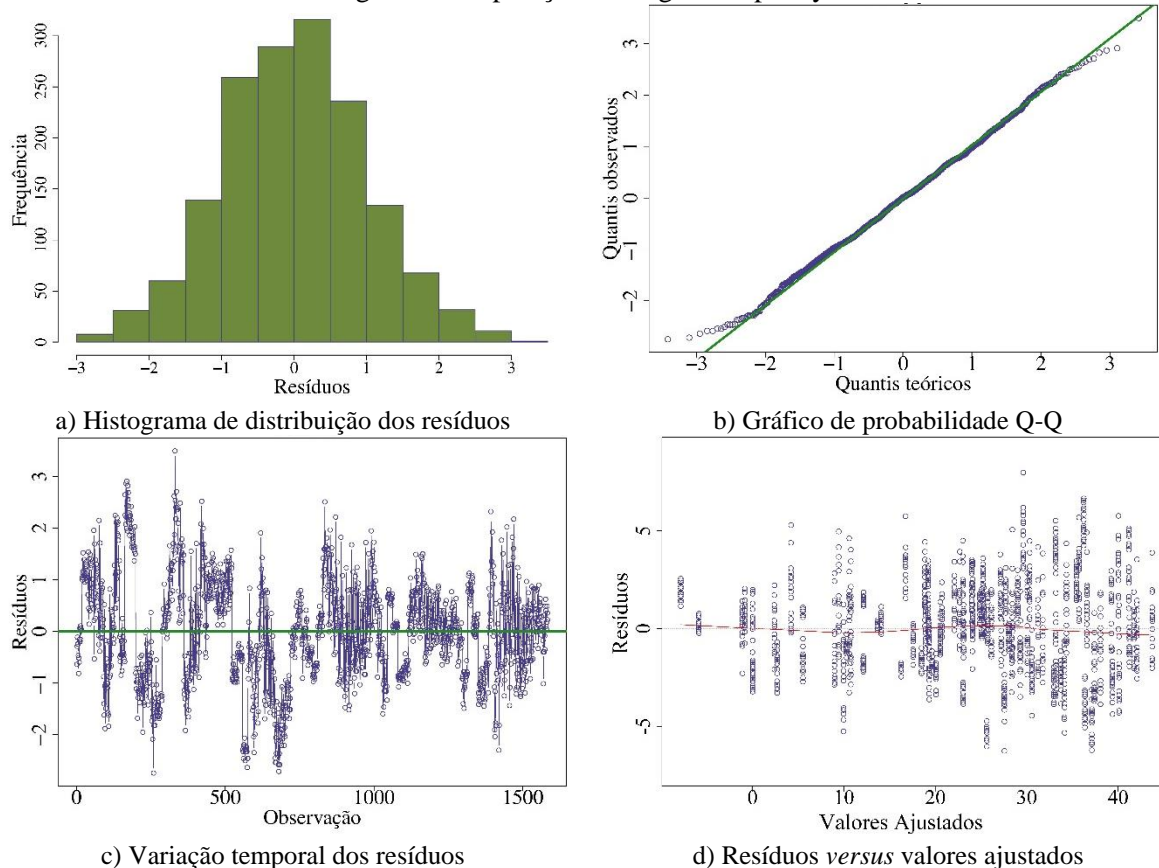


Figura 82- Suposições de regressão para y_D 

Para a premissa da independência, os gráficos que plotam a variação temporal dos resíduos (Figura 81c e Figura 82c) mostram distribuições que não apresentam nenhum padrão ao longo das observações, o que atesta que os resíduos são independentes. Em relação à linearidade, os gráficos dos resíduos em relação aos valores ajustados também não exibem padrão não-linear significativo, além do que a linha de tendência (em vermelho) é praticamente horizontal, próxima a zero. Pode-se assumir assim que as equações atendem às relações lineares. Em relação à uniformidade da variância, os resíduos não apresentam desvios consideráveis e a variância é assumida como constante.

4.6.4 Validação dos resultados

Conforme estipulado inicialmente, duas das amostras de lajes foram utilizadas para a o treinamento estatístico e a terceira amostra foi utilizada para validação do modelo de regressão, a fim de garantir a generalização dos resultados previstos. Para avaliar o quanto o modelo se ajusta aos dados de validação, os resultados previstos e observados são plotados na Figura 83 (concreto sem danos) e na Figura 84 (concreto sob os danos). Para os dois casos a amostra de

validação demonstrou um bom ajuste ao modelo linear proposto, visto a distribuição dos pontos próximos à reta de regressão.

Figura 83- Ajuste do modelo de regressão para a temperatura superficial do concreto sem danos y_c

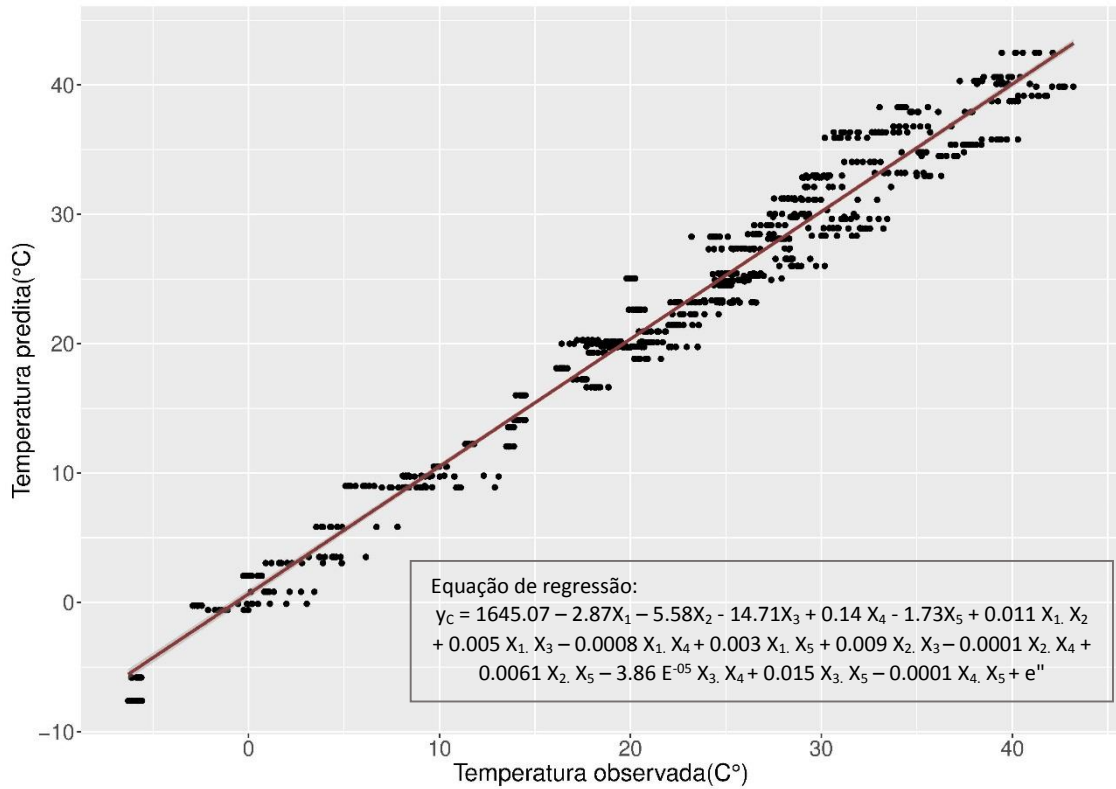
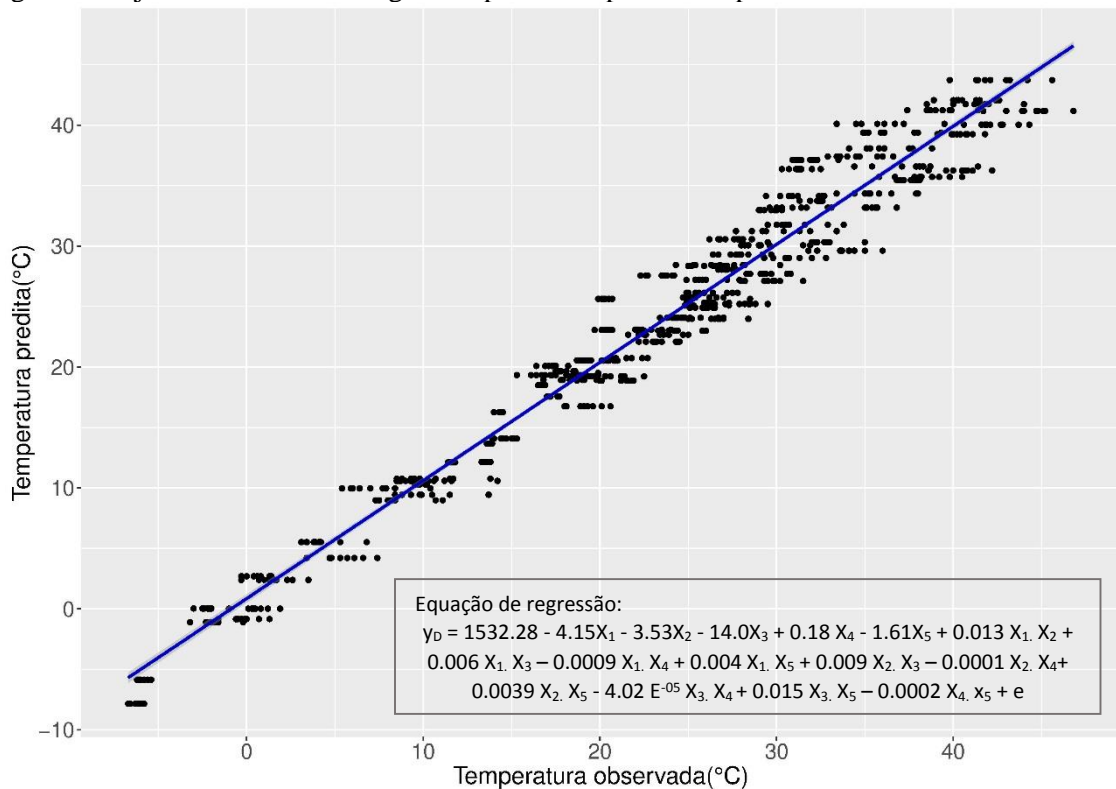


Figura 84- Ajuste do modelo de regressão para a temperatura superficial do concreto danificado y_D



De acordo com o objetivo inicial da análise de regressão, é importante observar a diferença entre os contrastes previstos e os contrastes reais levantados durante todo o horizonte do levantamento, visto que este é o parâmetro que determina a detecção de danos através de inspeção termográfica. Como há uma quantidade grande de observações (792 dados) em intervalos de tempo relativamente próximos, foi utilizado um filtro simples de média móvel para facilitar a visualização gráfica, tanto para os resultados previstos quanto para os resultados observados. O filtro de média móvel tem a função de suavizar a visualização de um conjunto de dados por meio da média de seus pontos adjacentes (GRAY;THOMSON, 2017). A equação abaixo mostra o código/fórmula utilizado diretamente no software estatístico R para calcular a média móvel (BORCHERS, 2019).

$$\text{movavg}(x, n, \text{type}=\text{c}(\text{"s"})) \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

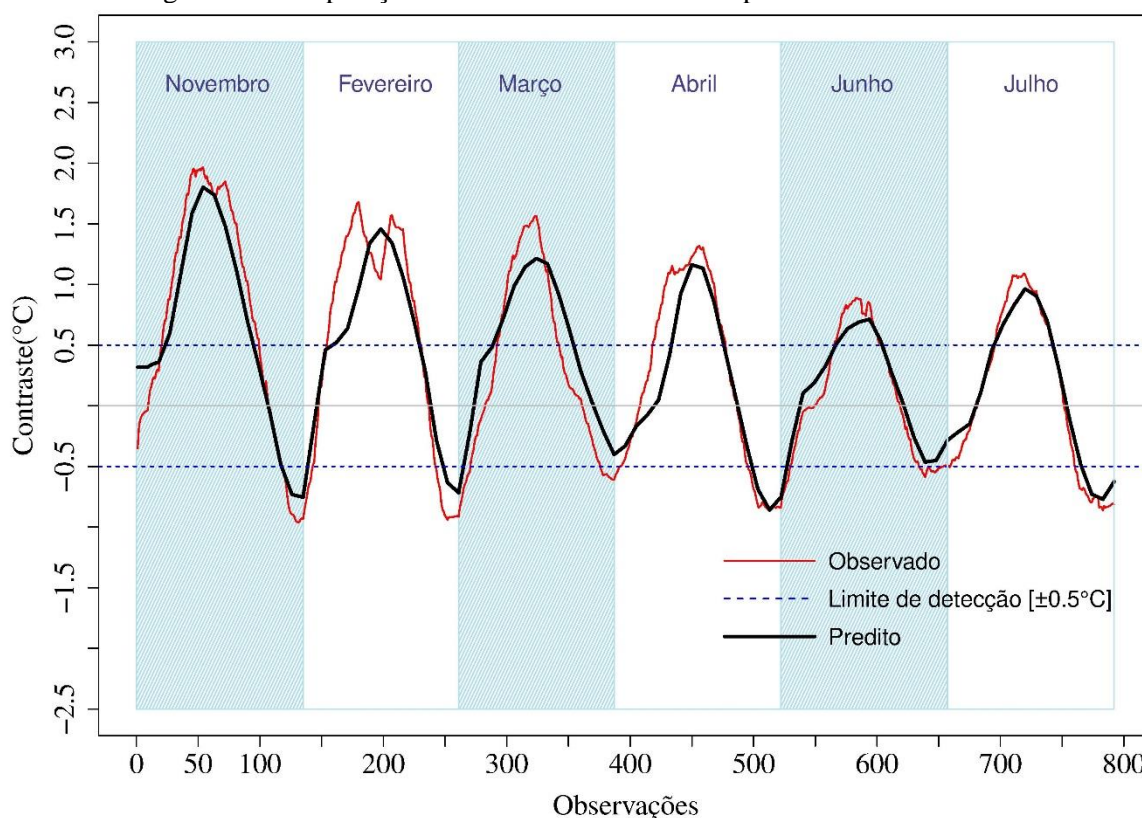
x =é o conjunto de dados

n = indica o número de pontos de dados anteriores usados com o ponto de dados atual ao calcular a média móvel.

type =categoria da média móvel. Nesse caso “s”, calcula a média móvel simples, onde “n” valores anteriores são agrupados ao valor atual para cálculo da média móvel.

Após alguns testes quanto à suavização dos resultados, foram utilizados 18 dados adjacentes para cálculo de cada média móvel, tanto para o contraste previsto quanto para o observado. Esse valor representa a média dos dados do conjunto de observação em intervalos de duas horas. Para avaliar o quanto o modelo se ajusta aos dados de validação, os resultados de contrastes previstos e observados são plotados na Figura 85. O contraste observado é dado pela subtração da temperatura superficial do concreto com presença de delaminação pela temperatura superficial do concreto sem danos levantados nas inspeções práticas pela câmera térmica, enquanto o contraste predito é dado pela subtração dos resultados previstos pelas duas equações obtidas a partir da amostra de treino, detalhadas na Tabela 6 e na Tabela 7.

Figura 85- Comparação entre valores de contrastes previstos e observados



A comparação das linhas que demonstram o contraste entre áreas de concreto danificadas e não danificadas confirma que os modelos de regressão propostos podem ser validados, uma vez que os contrastes superficiais previstos são convergentes com os contrastes superficiais observados. É notada alguma discrepância em algumas observações, porém em âmbito geral os valores são parelhos. Percebe-se que os meses de verão (novembro e fevereiro) apresentaram uma grande quantidade de observações abaixo/acima da faixa de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ estipulada pela ASTM D4788-03 (2013) para um gradiente térmico confiável. Como esses meses possuem dias com maior amplitude da temperatura do ar entre dia e noite, a inspeção foi otimizada, assim como apontado no estudo de Jankö, Březina e Grošek (2017).

Medidas comumente utilizadas na verificação da precisão de modelos são o coeficiente de determinação (R^2), o erro absoluto médio (MAE) e a raiz do erro quadrado médio quadrático (RMSE). Estes agentes de validação esclarecem o ajuste e os desvios do teste (HAIR JR. et al. 2009). Para os modelos deste estudo, os resultados são vistos na Tabela 8.

Tabela 8 - Agentes de validação das equações de regressão

	R^2	RMSE	MAE
y_c	98,01	2,00	2,00
y_D	96,04	2,00	2,00

Nota-se que o coeficiente de correlação foi abrangente para os dois modelos, indicando que 98,01% dos valores previstos para temperatura superficial do concreto sem danos na amostra de validação se ajustaram ao modelo criado. Para os valores previstos para temperatura superficial do concreto sob delaminação, o coeficiente de ajuste foi ligeiramente menor. Quanto aos desvios, os dois modelos de previsão da temperatura superficial apresentaram erros de, em média, 2°C acima ou abaixo do valor observado. Comparando com o estudo de regressão de Watase et.al. (2015), o modelo atual apresentou um maior coeficiente correlação (91,6% para y_C e 93,2% para y_D no estudo anterior). A justificativa pode ser que o presente estudo considerou um número maior de variáveis, bem como a interação entre elas. Com relação aos valores de RMSE e MAE, os estudos anteriores não realizam essas medidas. No entanto, os valores calculados indicaram que a previsão de dados quantitativos não esteve tão distante dos valores observados, visto que os valores médios de erros foram de 2°C.

4.6.5 Análise dos resultados modelo de regressão

Conforme o objetivo de pesquisa, com as equações definidas e adequadamente verificadas, iniciou-se a etapa que visou explicar a influência das variáveis preditoras ambientais e de inspeção nas respostas de temperatura superficial do concreto e prever janelas de oportunidade onde as condições de contorno permitam um melhor desempenho da técnica termográfica como ensaio não destrutivo para inspeção de lajes de pontes.

4.6.5.1 Variáveis explicativas

Para explicar a influência de cada variável independente na temperatura da superfície do concreto foram avaliados os coeficientes de regressão para valores numéricos e sinais estimados pelo modelo. Portanto, os coeficientes gerados pelas equações de regressão inicial não puderam ser utilizados para interpretação direta, pois consideram os dados originais da pesquisa, com unidades e magnitudes distintas. Assim, todas as variáveis foram padronizadas, ou seja, dispostas na mesma escala. Como resultado, a comparação de magnitude se tornou viável, onde as variáveis com os maiores coeficientes padronizados são interpretadas como as mais "importantes" (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). A Tabela 9 mostra os coeficientes de regressão padronizados (beta) para os dois modelos.

Tabela 9- Coeficientes de regressão padronizados (*beta*)

Code	Variável	<i>beta</i> (y_a)	<i>beta</i> (y_c)
x ₁	Horário	-0.3528	-0.2852
x ₂	Temperatura Ambiente	0.5637	0.5603
x ₃	Umidade Relativa do Ar	-0.0647	-0.0547
x ₄	Radiação Solar	0.3033	0.2920
x ₅	Pressão Atmosférica	-0.3001	-0.3074
x ₁ . x ₂	Horário * Temperatura Ambiente	0.0398	0.0349
x ₁ . x ₃	Horário * Umidade Relativa do Ar	0.0297	0.0264
x ₁ . x ₄	Horário * Radiação Solar	-0.3483	-0.3076
x ₁ . x ₅	Horário * Temperatura Ambiente	0.0066	0.0046
x ₂ . x ₃	Temperatura Ambiente * Umidade Relativa do Ar	0.0982	0.0948
x ₂ . x ₄	Temperatura Ambiente * Radiação Solar	-0.0771	-0.0674
x ₂ . x ₅	Temperatura Ambiente * Pressão Atmosférica	0.0139	0.0225
x ₃ . x ₄	Umidade Relativa do Ar * Radiação Solar	-0.0517	-0.0512
x ₃ . x ₅	Umidade Relativa do Ar * Pressão Atmosférica	0.0830	0.0901
x ₄ . x ₅	Radiação Solar * Pressão Atmosférica	-0.0736	-0.0594

De acordo com os valores da tabela, no presente horizonte de estudo, as variáveis mais importantes na composição da variável dependente foram temperatura ambiente, pressão atmosférica, radiação solar e horário de inspeção. O efeito moderador da radiação solar para a variável de horário também foi importante, reforçando a contribuição dessas duas variáveis na composição das variáveis dependentes (y_c e y_D). Os coeficientes de regressão relacionados à umidade relativa e interações entre as variáveis também foram significativos para a composição do valor da temperatura e o ajuste de todo o modelo. As variáveis temperatura ambiente e radiação solar tiveram uma relação positiva com a variável dependente, o que significa que a temperatura da superfície do concreto aumentou principalmente com o aumento da temperatura ambiente e o aumento da carga solar. Em relação às variáveis isoladas, a umidade relativa do ar, a pressão atmosférica e o horário apresentaram sinais negativos, indicando que o aumento dessas variáveis levou a uma redução no valor da temperatura da superfície.

Os resultados estão de acordo com o que foi observado na prática e em estudos anteriores (WATASE et al. 2015, WASHER et al. 2009, ROCHA; PÓVOAS; SANTOS, 2018), onde valores mais altos de temperatura ambiente e radiação solar ao longo do dia geraram um aumento na temperatura da superfície e, conseqüentemente, no contraste detectado. Da mesma forma, quando os níveis de umidade relativa foram mais altos, a temperatura da superfície do concreto foi mais baixa. Essa variação é justificada devido à pressão do vapor saturado ser determinada pela temperatura ambiente, diminuindo quando a temperatura do ar aumenta e aumenta substancialmente à medida que a temperatura do ar cai (TRAN et al. 2017). Como resultado, a temperatura ambiente, bem como a radiação solar, tem alta influência no contraste

térmico durante o dia, enquanto a umidade relativa aumenta a umidade na superfície do concreto e o fluxo de calor durante a noite (ROCHA; PÓVOAS; SANTOS, 2018, WASHER et al. 2010b). Assim, a "importância" de cada variável independente varia de acordo com os níveis das demais. Por exemplo, quando os valores de temperatura ambiente e radiação solar são extremamente baixos, a umidade relativa do ar e a pressão atmosférica contribuem de maneira mais pontual para a variação da temperatura da superfície. Apesar dessas variações, esta pesquisa abrangeu diferentes cenários e percebeu-se a tendência de que os efeitos ambientais considerados neste estudo participem ativamente na variação da temperatura da superfície do concreto e, conseqüentemente, no contraste térmico levantado termograficamente. Além disso, os resultados identificados foram, em parte, convergentes com os de Watase et al. (2015), onde determinaram a temperatura ambiente e a pressão atmosférica como variáveis que influenciam significativamente a temperatura da superfície do concreto.

4.6.5.2 Previsão de janela de tempo favoráveis para inspeção

Para fins de previsão de janelas de oportunidade onde as condições de contorno permitam um melhor desempenho na detecção dos contrastes, foram analisados os valores de contrastes previstos e observados na amostra de validação, em função da variabilidade de seus principais fatores interferentes, a fim de levantar quais foram as janelas de tempo e condições ambientais em que a termografia infravermelha demonstrou maior eficácia. Segundo a análise feita no item 4.6.5.1, dentre as variáveis estudadas, a temperatura ambiente, pressão atmosférica, radiação solar e o horário de levantamento foram os fatores mais presentes na composição da temperatura superficial do elemento inspecionado, influenciando, por consequência, no contraste levantado.

Antes da análise das janelas de tempo e das condições favoráveis para inspeção, uma função de agrupamento foi aplicada ao conjunto de dados de cada variável, dentro do próprio software estatístico RStudio, para dividi-las em grupos (janelas). O algoritmo PAM (Partitioning Around Medoids) foi utilizado. Trata-se de um método muito similar ao algoritmo de agrupamento k-Means, pois ambos possuem foco em trabalhar na divisão automática de um conjunto de dados em grupos, minimizando a distância entre os pontos rotulados em um cluster e outro ponto rotulado como o centro desse cluster (REYNOLDS et al, 2004). Depois de encontrar um conjunto de k medóides, k clusters são construídos atribuindo cada observação ao medóide mais próximo. O objetivo é encontrar k objetos representativos que minimizem a soma

das diferenças entre as observações e o objeto representativo mais próximo. O código para o algoritmo, utilizado diretamente do software RStudio, é (MAECHLER et al, 2019):

`pam(x , k, metric="manhattan")` Equação 13

Onde:

x=conjunto de dados

k=número de agrupamentos, obrigatoriamente menor que o número de observações.

metric= especifica a métrica a ser usada para calcular as diferenças entre as observações.

Sendo assim, todos os valores de cada variável potencialmente interferente nas inspeções termográficas (horário, temperatura ambiente, radiação solar e pressão atmosférica) foram divididos, por meio do algoritmo PAM, em 3 clusters diferentes, adotando-se a métrica “manhattan”, para representar os diferentes horários (manhã, tarde e noite) e os diferentes níveis (baixo, médio e alto) das condições ambientais de temperatura ambiente, radiação solar e pressão atmosférica.

A partir deste agrupamento foram construídos gráficos de probabilidade de densidade para os valores de contraste para cada grupo. O objetivo foi observar em qual janela de tempo e em quais condições ambientais os contrastes podem ser percebidos de maneira mais conclusiva, dentro do horizonte de estudo. O critério para consideração do valor de contraste como conclusivo é de que seu valor seja igual ou maior do que aquele estipulado pela norma americana para detecção de danos em inspeções termográficas de lajes de concreto de pontes, ou seja, 0,5° C (ASTM, 2013). A janela de tempo ou a condição favorável em cada caso foi dada pelo intervalo de valores de tempo, temperatura ambiente, radiação solar e pressão atmosférica que, dentre os três clusters calculados, que apresentou maior probabilidade de densidade de valores de contraste com valores iguais ou maiores do que 0,5°C.

Visto que as premissas dos modelos de regressão das temperaturas superficiais do concreto quanto a normalidade foram atestadas e os valores de contraste possuem distribuição normal, as áreas sob cada curva de probabilidade de densidade foram calculadas a partir da distribuição normal padronizada (tabela z). A área sob cada curva é igual a 1 (100%). Os resultados do agrupamento e os gráficos de probabilidade de densidade para a variável horário podem ser vistos na Figura 86 para os contrastes previstos e na Figura 87 para os contrastes observados. Em seguida, as Tabelas 10-13 mostram as porcentagens de área sobre a curva calculadas entre os limites de contraste $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (Ainvalid) e fora deste intervalo (Avalid), para os valores previstos e para os valores observados para cada variável de estudo.

Figura 86- Contraste previsto para os diferentes horários de levantamento

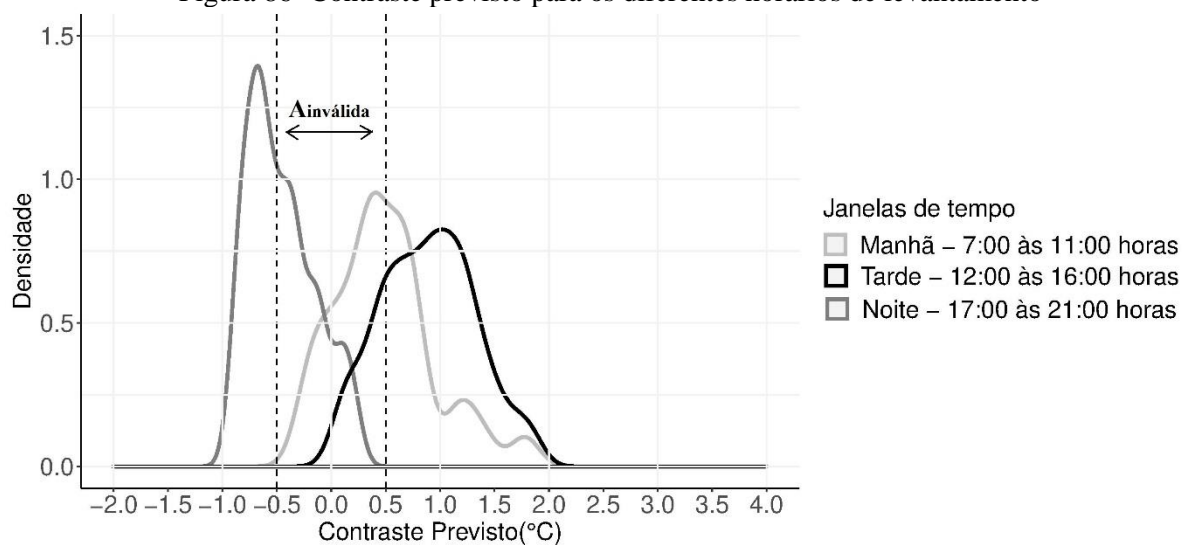


Figura 87- Contraste observado para os diferentes horários de levantamento

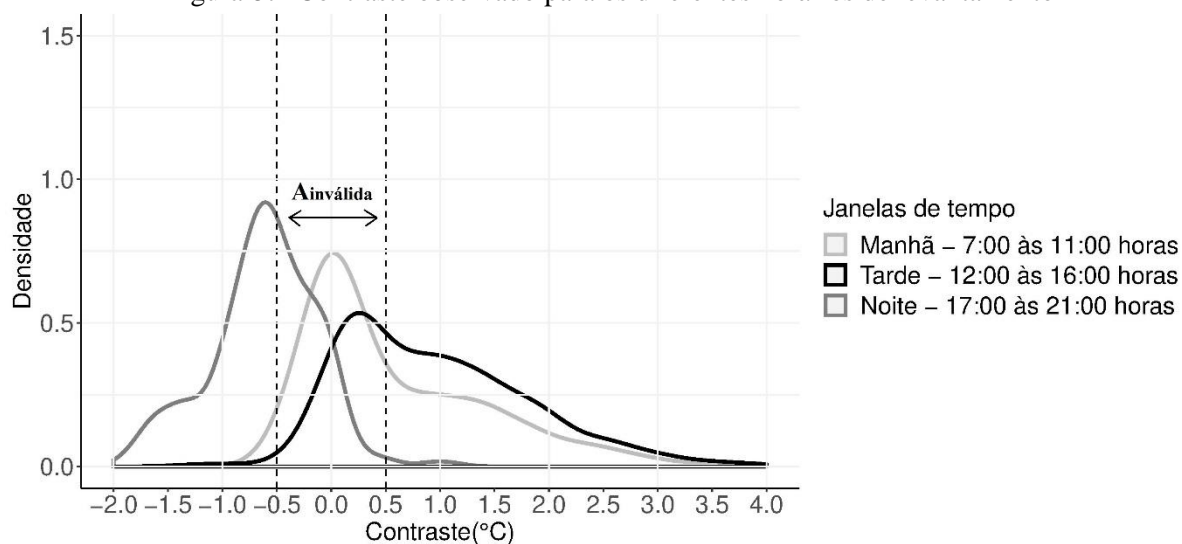


Tabela 10- Porcentagem de contrastes conclusivos e inconclusivos para diferentes períodos de tempo

	N (cluster)	Previsto				Observado			
		μ	σ	A _{inválida} (%)	A _{válida} (%)	μ	σ	A _{inválida} (%)	A _{válida} (%)
Manhã(7-11horas)	270	0.49	0.46	49	51	0.61	0.86	35	65
Tarde(12-4horas)	270	0.89	0.43	18	82	0.96	0.85	25	75
Noite(5-21horas)	252	-0.45	0.30	57	43	-0.61	0.49	40	60

Onde N representa o número de observações calculados pelo algoritmo PAM para cada grupo e μ e σ são, respectivamente, a média e o desvio padrão dos valores de contraste para cada referido grupo.

Assim como pressuposto, as áreas previstas e observadas não apresentaram resultados idênticos, embora sejam convergentes para todas as variáveis. A razão para a diferença entre os valores previstos e observados pode ser justificada pelo fato de que foram mantidas no modelo de regressão apenas as variáveis com maior significância para a predição das temperaturas superficiais. Mesmo não presente no modelo, outras variáveis fizeram parte da composição final da temperatura superficial e dos contrastes. Quando não incorporados no modelo, esses fatores são diluídos no erro estatístico, compondo a diferença entre os valores previstos e calculados.

Tabela 11- Porcentagem de contrastes conclusivos e inconclusivos para diferentes níveis de temperatura ambiente

	N (cluster)	Previsto				Observado			
		μ	σ	Ainválida(%)	AVálida(%)	μ	σ	Ainválida(%)	AVálida(%)
Baixo(-2.8-13.1°C)	153	0.08	0.59	60	40	0.06	0.79	47	53
Médio(-14.4-25.2°C)	414	0.15	0.64	55	45	0.12	0.94	40	60
Alto(27.5-37.9°C)	225	0.81	0.60	29	71	0.94	1.02	25	75

Tabela 12- Porcentagem de contrastes conclusivos e inconclusivos para diferentes níveis de radiação solar

	N (cluster)	Previsto				Observado			
		μ	σ	Ainválida(%)	AVálida(%)	μ	σ	Ainválida(%)	AVálida(%)
Baixo(-3.54-630.70KJ/m²)	315	0.30	0.45	63	37	0.37	0.80	43	57
Médio(799.2-1893KJ/m²)	225	0.16	0.87	43	57	0.10	1.17	33	67
Alto(1977-3908KJ/m²)	252	0.50	0.71	42	58	0.51	1.05	33	67

Tabela 13- Porcentagem de contrastes conclusivos e inconclusivos para diferentes níveis de pressão atmosférica

	N (cluster)	Previsto				Observado			
		μ	σ	Ainválida(%)	AVálida(%)	μ	σ	Ainválida(%)	AVálida(%)
Baixo(931.6-938.1 Hpa)	522	0.42	0.75	43	57	0.46	1.10	32	68
Médio(940.1-942 Hpa)	135	0.17	0.41	74	26	0.10	0.66	55	45
Alto(946.3-948.8 Hpa)	135	0.11	0.62	57	43	0.09	0.84	45	55

Os resultados mostrados na Figura 86, na Figura 87 e na Tabela 10 mostram que, dentro do intervalo de tempo estipulado entre as 7:00 horas da manhã e as 9:00 horas da noite, a maior parte dos contrastes significativos foi detectada pelas inspeções termográficas realizadas no intervalo de tempo entre o meio dia e às 4:00 horas da tarde. Esse resultado está de acordo com os resultados de Watase et al (2015) em relação as medições feitas no topo da laje e com Washer et al (2009, 2010b) em relação aos horários ideais constarem no intervalo entre 5 e 9 horas após o nascer do Sol. Também coincide como início do período ideal encontrado por Guray e Birgul (2018), que observaram que o melhor intervalo de tempo para uso de termografia infravermelha para inspeções de pontes de concreto inicia durante a tarde. Hiasa et al (2018) apontaram

períodos de intercâmbio entre resfriamento noturno e efeito de aquecimento diurno no início da manhã e no final da tarde, onde não é possível detectar delaminação devido ao fato de as amostras atingirem um ponto de equilíbrio térmico. Esses períodos também foram observados neste estudo, ocorrendo cerca de 1 hora em torno das 7:00 da manhã e 5:00 horas da tarde, vistos também na análise qualitativa e quantitativa realizada anteriormente. A janela de tempo prevista pela abordagem estatística evitou com êxito os períodos de intercâmbio, mostrando-se adequada para uso prático nas inspeções termográficas.

A Tabela 11 mostra que o período ideal de levantamento termográfico ocorre com altas temperaturas. Os maiores valores registrados, entre 27.5°C e 37.9°C, foram atribuídos à maior densidade de contrastes conclusivos, 15% e 26% acima do que foi registrado para os valores observados e previstos, respectivamente, para as temperaturas médias. As temperaturas baixas, entre -2,8°C e 13.1°C também tiveram resultados confiáveis, com mais de 50% dos contrastes observados acima do intervalo limite de detecção estipulado pela D4788-03 (ASTM, 2013). Para a radiação solar, os grupos classificados com valores de alta e média carga solar obtiveram resultados muito parecidos, sendo que entre os valores de radiação de 1977 KJ/m² e 3908 KJ/m² foram previstos a maior parte dos gradientes confiáveis do estudo. Com isso, pode-se inferir que as condições preferíveis para inspeção são favoráveis à presença de carga solar direta relativamente alta, assim como determinado por Washer et al (2009, 2010a, 2010b) em seus estudos. O resultado coincide também com o aspecto do horário observado anteriormente, onde os melhores resultados ocorreram a partir do meio dia até as 4:00 horas da tarde, horário em que os níveis de radiação solar atingem valores mais robustos. Por fim, a Tabela 13 nos mostra que, segundo o estudo aqui conduzido, a detecção de contrastes genuínos ocorre com mais frequência quando os valores de pressão atmosférica são menores.

Dessa forma, quando se analisam os resultados de maneira conjunta o estudo nos mostra que, dentre o horizonte estudado, janelas de oportunidade ideais para condução da inspeção termográfica em lajes de pontes de concreto armado incluem períodos de tempo entre o meio dia e as 4:00 horas da tarde, em períodos de altas temperaturas, quantidade razoavelmente alta de radiação solar direta e baixos índices de pressão atmosférica. Quanto à umidade relativa do ar, presume-se que no horário e condições de carga solar/temperatura ambiente favoráveis, a umidade relativa apresente-se em seus índices mais baixos. É importante salientar que os modelos aqui previstos e seus coeficientes padronizados e de previsão possuem abrangência local, ou seja, se a metodologia for aplicada em outra região os coeficientes de regressão, bem como suas previsões, devem ser recalculados. No entanto, pesquisas anteriores (WATASE et al. 2015) realizadas em outro país e hemisfério mostraram resultados convergentes de modelos

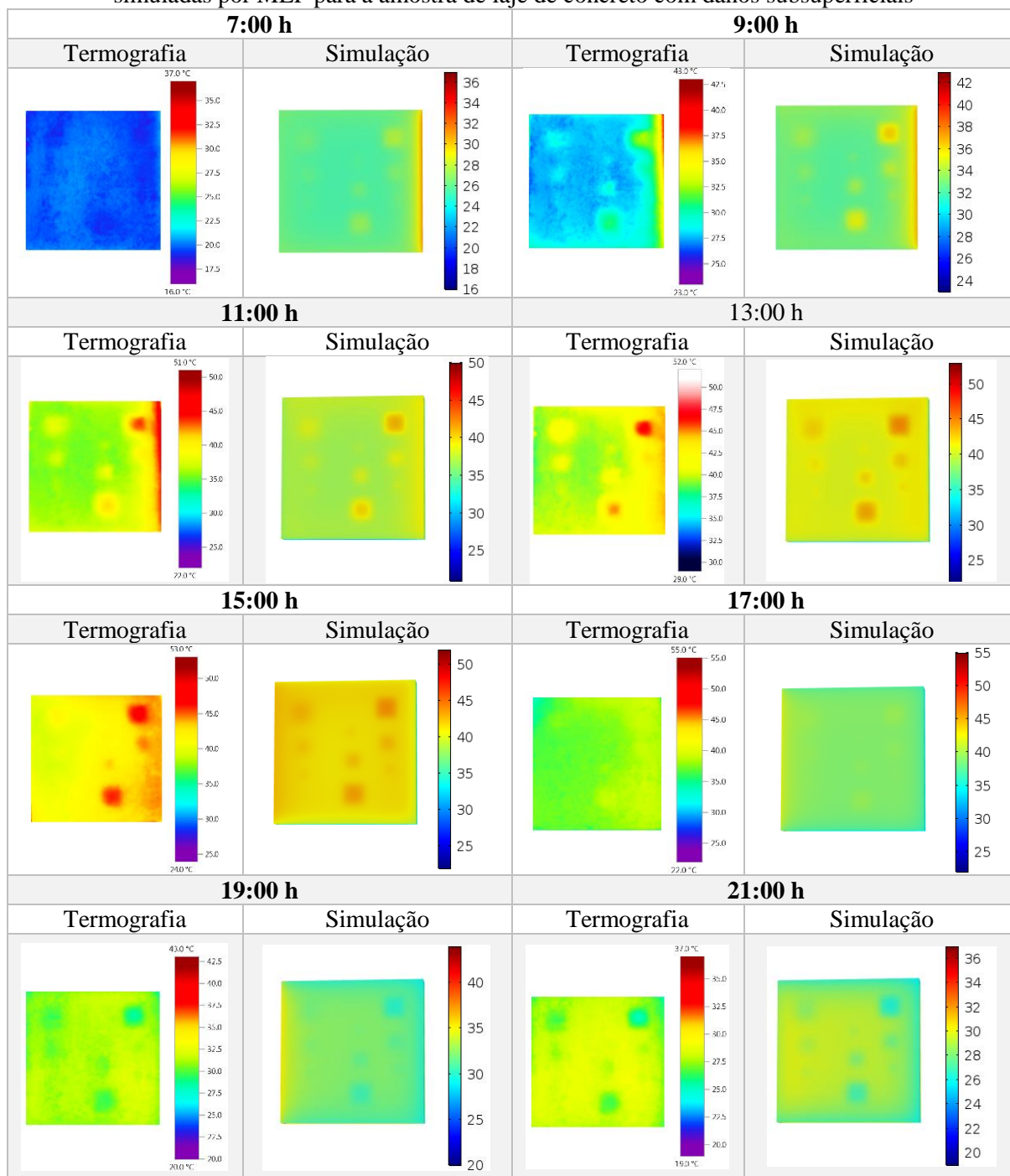
de regressão e outras pesquisas (WASHER et al. 2009, TRAN et al. 2017, ROCHA; POVOAS; SANTOS, 2018, HIASA et al. 2017b, HIASA et al. 2018, WASHER et al. 2010b) apontaram que o horário de inspeção, temperatura do ar, umidade relativa, carga solar e pressão atmosférica foram os principais responsáveis pela variabilidade do contraste térmico nas estruturas de concreto com danos subsuperficiais, mostrando que, apesar das diferenças devido à condição ambiental local, há uma tendência de realizar a inspeção termográficas nas condições favoráveis aqui apresentadas.

Apesar de apresentar grandes contribuições ao entendimento e à prática utilização, os estudos passados não reportaram análises que visassem, ao mesmo tempo, explicar como os fatores ambientais e de inspeção afetam a temperatura superficial do concreto de maneira relevante à inspeção termográfica, ao mesmo tempo que gerassem modelos de previsão considerando todos esses importantes fatores. Conforme observado nas Tabelas 10-13, utilizar modelos de previsão para estimar janelas de oportunidade favoráveis para inspeção pode representar uma boa alternativa para evitar inspeções onerosas em condições que não valorizam o desempenho da técnica aqui estudada, visto que os resultados dos modelos permaneceram próximos e convergentes aqueles observados no levantamento realizado na prática.

4.7 Modelagem numérica por elementos finitos

O Quadro 6 mostra os resultados da simulação da inspeção termográfica realizada por meio de modelo de elementos finitos para o mês de fevereiro, a cada duas horas, com duração equivalente ao programa experimental. O procedimento de modelagem seguiu a metodologia apresentada no item 3.2.3. A faixa de temperatura dos termogramas resultantes foi unificada, para melhorar a comparação. Observa-se que, similarmente aos resultados da inspeção termográfica, os horários das 7:00 horas da manhã e 5:00 horas da tarde revelaram temperaturas praticamente uniformes, onde é difícil notar qualquer um dos danos. Isso mostra que a ferramenta computacional obteve sucesso em simular os períodos de intercâmbio entre o aquecimento/resfriamento existentes na termografia passiva, com uso de radiação solar. Além disso é possível observar que o aquecimento/resfriamento das bordas acompanharam a orientação solar, assim como no estudo experimental.

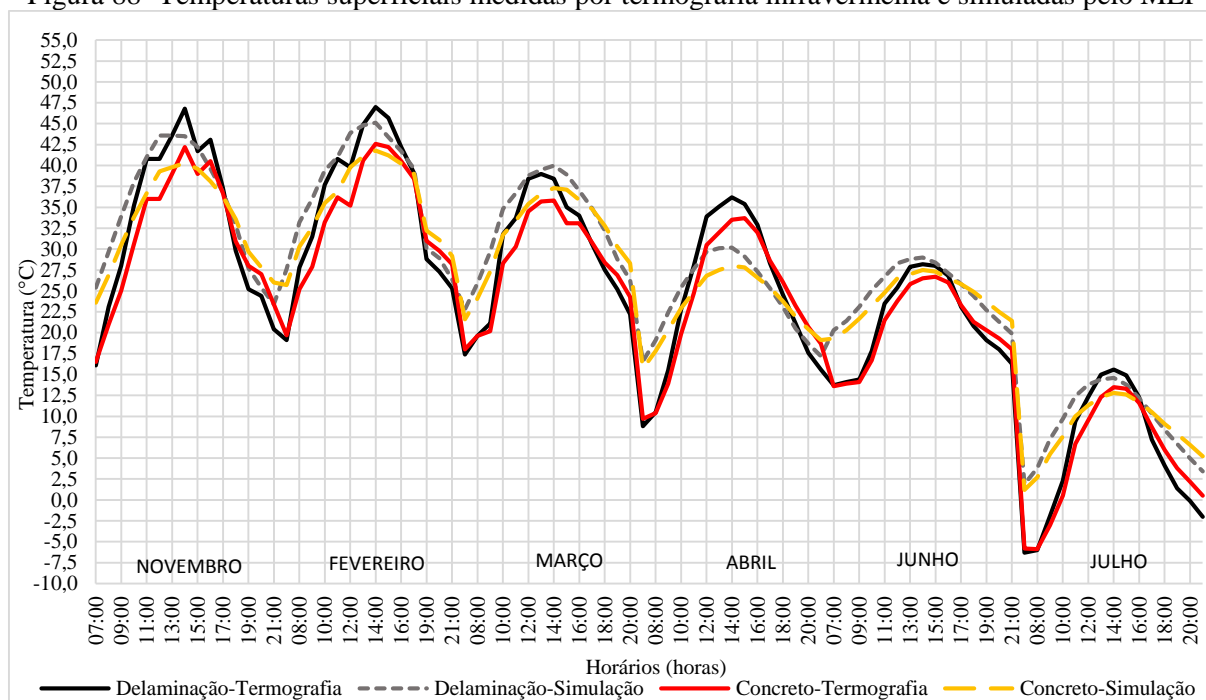
Quadro 6-Comparação entre temperaturas superficiais medidas por termografia infravermelha e simuladas por MEF para a amostra de laje de concreto com danos subsuperficiais



As figuras a seguir mostram o resultado quantitativo para os seis levantamentos realizados. As temperaturas foram contabilizadas com base em um ponto padronizado localizado sobre o defeito superior esquerdo da amostra L1, com 2 cm de profundidade (Figura 49a) e um ponto padrão sobre o concreto sem danos, próximo ao defeito considerado. A Figura 88 compara as temperaturas superficiais medidas com a câmera térmica e simuladas pelo método dos elementos finitos, tanto para a área sobre a presença de delaminação quanto para

superfície de concreto sem danos. As temperaturas obtidas na simulação mostraram comportamento convergente com as variações periódicas do estudo experimental. Algumas diferenças foram notadas, principalmente durante a manhã. Isso ocorre porque a simulação realizada neste trabalho por meio de radiação solar através dos elementos finitos foi simplificada e leva em conta os parâmetros de radiação solar, coeficiente de convecção constante e variação das temperaturas ao longo do dia no local do estudo. A simulação não considerou outros fatores comumente relacionados à transferência de calor, como umidade relativa do ar, pressão atmosférica, variabilidade local em correntes de convecção e elementos do entorno.

Figura 88- Temperaturas superficiais medidas por termografia infravermelha e simuladas pelo MEF

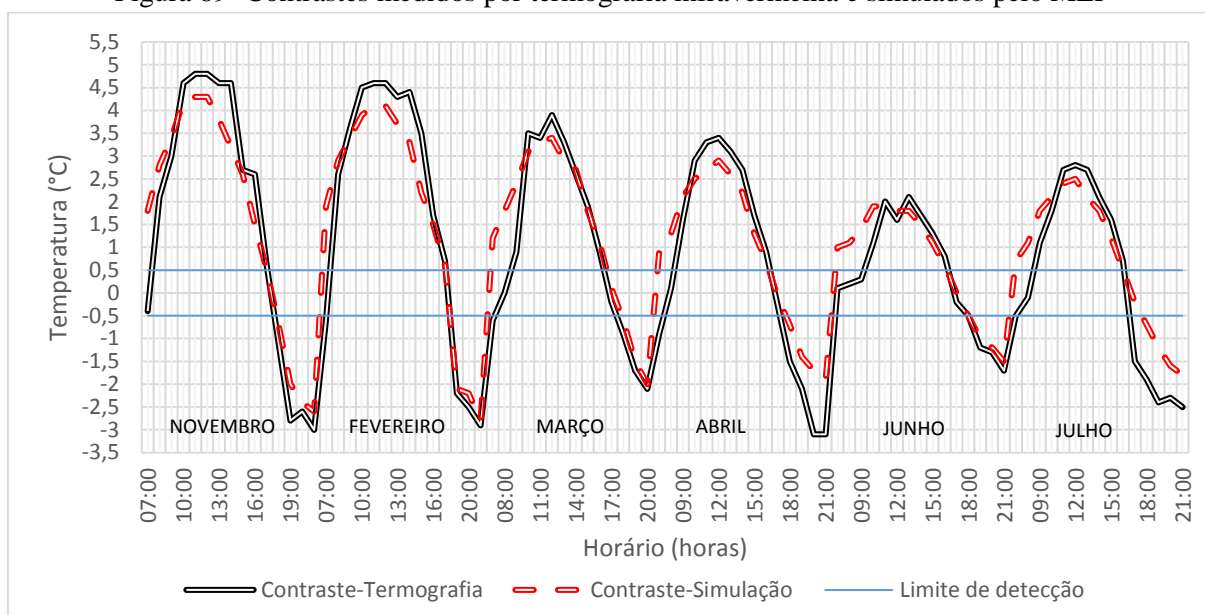


Além disso, a modelagem computacional supõe que o dia simulado possui céu claro, sem nuvens, sendo que no estudo experimental foi verificada a presença de nuvens e neblina pela manhã, fazendo com que as amostras de concreto ficassem sombreadas por um período maior do que aquele suposto pela simulação numérica. Outros fatores que podem ter contribuído para a diferença observada podem ter sido erros na acurácia da medição feita pela câmera termográfica e pelos equipamentos utilizados, diferenças de temperatura prevista pela equação utilizada para a temperatura ambiente (Equação 10) ou até nos valores de temperatura e radiação solar medidos pela estação meteorológica local. Porém, essa limitação não representa um obstáculo ao uso da técnica computacional, pois o conhecimento preciso da temperatura superficial exata não é um requerimento essencial para análise computacional da termografia

infravermelha para inspeção de estruturas de pontes de concreto armado. O principal intuito da análise numérica por elementos finitos é testar a possibilidade de verificar computacionalmente o alcance da técnica em detectar a existência do contraste térmico que defina a existência do dano ao longo do dia, de maneira convergente à aplicação prática. Além disso, verificar os resultados perante diferentes condições ambientais.

Para tanto, a Figura 89 mostra a diferença entre os valores de contrastes medidos e simulados durante todo o período do levantamento, principal parâmetro para detecção de danos em inspeções termográficas.

Figura 89- Contrastes medidos por termografia infravermelha e simulados pelo MEF



É possível observar que os valores de contraste obtidos pela simulação computacional foram próximos aos medidos pela câmera térmica, mesmo com as diferenças de temperatura vistas nas figuras anteriores. É possível notar que a amplitude dos contrastes acompanhou a variação periódica dos meses levantados no estudo experimental. A média da diferença entre contrastes medidos e simulados foi de apenas 0,2 °C. Diferenças pontuais de até 2,5 °C foram notadas nos primeiros horários da manhã, devido principalmente à presença de neblina, nuvens e alta umidade relativa do ar durante o levantamento termográfico, condições que não foram consideradas na simulação por elementos finitos, conforme discutido anteriormente.

Em comparação aos estudos de Hiasa et al. (2017b e 2018), a análise realizada apresentou resultados convergentes, principalmente em termos de capacidade de demonstrar o alcance do método dos elementos finitos na simulação de inspeções termográficas passivas. Ambos os

estudos também relataram as limitações do software utilizado quanto à exatidão dos resultados por consequências dos inúmeros fatores envolvidos, como ambiente do entorno e presença de umidade e nuvens. Hiasa et al. (2017b e 2018), obtiveram resultados mais precisos (com menor diferença) em seus trabalhos anteriores, porém a metodologia implementada nesta pesquisa propõe uma análise mais simplificada, com uso de uma equação que simula o ciclo diário da temperatura ambiente utilizada na modelagem de transferência de calor por radiação no software de elementos finitos.

Nesse sentido, pode ser inferido que a simulação por elementos finitos foi capaz de reproduzir inspeções termográficas com uso de aquecimento passivo, ou seja, através de radiação solar. O teste realizado nesta pesquisa mostra a possibilidade de identificar, através de modelagem computacional, danos subsuperficiais em lajes de pontes de concreto armado em diferentes horários e condições ambientais de temperatura e radiação solar, assim como realizado em estudo experimental.

Apesar de os resultados simulados não apresentarem valores exatamente iguais à inspeção experimental, o comportamento da variável analisada (contraste) ao longo de todo o período de estudo foi convergente. Isso infere que, em um campo prático de levantamento termográfico, havendo as informações geográficas do local (coordenadas e zona global), uma previsão meteorológica fiável de temperatura ambiente e radiação solar e as características de dano a ser inspecionado (profundidade e área), é possível que o profissional responsável pela inspeção simule satisfatoriamente a oscilação térmica diária no local através de modelos computacionais. Com isso, o inspetor pode usar esta ferramenta como auxílio para determinar qual o melhor período para realizar a inspeção de defeitos subsuperficiais em lajes de pontes de concreto armado.

Remetendo à investigação estatística anterior (item 4.6), a simulação numérica também pode ser utilizada para complementar as previsões quanto às melhores janelas de oportunidade para realizar a inspeção. É possível observar a oscilação de valores do contraste térmico vista no estudo numérico também é convergente com o estudo experimental e estatístico, onde os meses de verão (novembro e fevereiro) apresentam uma grande quantidade de observações abaixo/acima da faixa de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ estipulada pela ASTM D4788-03 (2013) para um gradiente térmico confiável, por estes meses possuírem maior amplitude térmica diária. Hiasa et al. (2017b) não encontraram diferença entre desempenho de detecção de danos subsuperficiais ao longo de diferentes estações do ano em sua pesquisa. Isso pode ser justificado pela localização do estudo, em Orlando, Flórida, Estados Unidos, onde as diferentes estações do ano não apresentam tanta discrepância entre amplitudes térmicas diárias durante meses quentes e frios.

No Brasil, meses de verão atingem temperaturas diárias altas, como é o exemplo do mês de fevereiro, quando durante deste estudo houve a máxima de 37.9°C. Durante a noite, a temperatura diminui para valores menores do que 20°C, gerando uma grande amplitude térmica, que facilita a detecção dos danos.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante do avanço do uso da termografia infravermelha como ensaio não destrutivo para inspeção de estruturas, esta pesquisa promoveu um estudo da técnica para identificação de danos subsuperficiais em pontes de concreto armado. Inspeções termográficas foram realizadas em amostras com simulação de danos de diferentes tamanhos e profundidades, ao longo de dias com predominância de temperaturas altas de verão, amenas do outono e baixas de inverno, durante o período diurno e no início da noite, a fim de avaliar o desempenho do ensaio frente a condições ambientais diversas. Além de lajes, foi simulada uma estrutura de pilar. Os resultados demonstraram que para os elementos verticais a orientação solar tem grande influência na detecção dos danos, sendo que os melhores períodos para inspeções termográficas foram períodos em que as faces estavam expostas a radiação solar direta.

Através da análise qualitativa foi possível identificar a existência de danos pela observação instantânea dos termogramas, onde os defeitos puderam ser apontados devido ao gradiente de temperatura detectado pela câmera térmica. Exceção deve ser feita a períodos de equilíbrio térmico entre o elemento e o ambiente, onde invertem-se os ciclos de aquecimento e resfriamento da estrutura e os danos, mesmo que existentes, não puderam ser detectados. Este fenômeno ocorreu normalmente ao amanhecer e ao final do dia, configurando um fator importante a ser considerado no uso prático da termografia infravermelha passiva. A análise quantitativa dos dados permitiu uma exploração mais ampla da sensibilidade da técnica perante às variáveis ambientais, de configuração de inspeção e de características dos danos. Identificou-se que grande parte das variáveis ambientais são correlacionadas entre si e com o horário do levantamento, explicando de maneira conjunta a variação na temperatura superficial do concreto. Dentre as características de dano estudadas, a área tem participação maior no aquecimento superficial do concreto, sendo que delaminações com maior área apresentaram contrastes mais significativos. Além disso, os meses de verão (novembro e fevereiro) apresentaram uma grande quantidade de observações com gradiente térmico robusto, por configurarem meses que possuem maior amplitude térmica diária.

O objetivo da análise estatística foi atendido, ao passo que permitiu identificar as principais variáveis que influenciaram na variação da temperatura superficial das amostras para inspeção ao mesmo tempo que gerou um modelo com capacidade de previsão satisfatória para o contraste entre as temperaturas superficiais entre áreas de concreto com e sem defeitos, parâmetro essencial para determinação da existência de danos por meio da termografia infravermelha. Em termos de resultados explicativos da análise de regressão, dentro do

horizonte de levantamento estudado, as variáveis de temperatura ambiente, horário de inspeção, radiação solar e pressão atmosférica foram os fatores com maior influência na variação das temperaturas superficiais do concreto que compõem o contraste térmico detectado pela câmera termográfica. Ressaltou-se também a importância de considerar os efeitos moderadores no modelo, visto que os níveis de influência das variáveis independentes possuem relação entre si.

Quanto à função de predição, a metodologia proposta mostrou-se relevante em identificar janelas de oportunidades para detecção confiável de danos subsuperficiais em inspeções termográficas de lajes de pontes de concreto. Ao relacionar os valores de contraste previsto com as variáveis mais importantes em sua detecção, os resultados previstos quanto à horários e condições ambientais ideais convergiram, em todos os casos, com os resultados observados na prática. Ou seja, dentro do horizonte deste estudo, períodos de tempo entre às 12:00 e as 4:00 horas da tarde, com presença de altas temperaturas, quantidade razoavelmente alta de radiação solar direta e baixos índices de pressão atmosférica configuraram um cenário ideal para inspeções termográficas com aquecimento passivo.

A análise numérica mostrou-se eficiente em seu propósito de reproduzir inspeções termográficas com uso de aquecimento passivo, ou seja, através de radiação solar. Os valores de contraste, mostraram-se convergentes com o estudo experimental e as janelas de tempo favoráveis vistas no estudo numérico e estatístico são convergentes àquelas previstas no estudo prático. Dessa forma, a ferramenta computacional mostrou que pode ser útil para simular o comportamento térmico de estruturas em diferentes localizações geográficas, a fim de diminuir o custo de pesquisa em amostras físicas e facilitar a escolha de melhores janelas de oportunidade para inspeções que utilizem termografia infravermelha passiva em lajes de pontes de concreto armado.

Em conclusão geral, a termografia infravermelha como método de inspeção mostrou desempenho satisfatório, sendo capaz de alcançar a maioria das configurações de danos no cenário proposto e mostrando grande sensibilidade as condições ambientais. A problemática aqui reportada buscou ampliar o entendimento da técnica termográfica como ensaio não destrutivo para inspeção de pontes de concreto armado e prever os cenários em que sua utilização é conduzida de maneira mais adequada, utilizando além do equipamento termográfico ferramentas computacionais, numéricas e estatísticas. Isso porque a caracterização dos fatores potencialmente interferentes e o uso de instrumentos que priorizam a automatização e a precisão na coleta e reconhecimento de dados permite prognósticos mais adequados para os programas de gestão, contribuindo para a segurança estrutural das estruturas da infraestrutura e, conseqüentemente, de toda a população que delas usufrui.

Quanto aos trabalhos futuros, sugere-se que seja atentado para os aspectos de incorporação de processamento de imagens à análise termográfica, com a evolução do uso de detecção automática de padrões e processos de tomada de decisão inteligente, juntamente com a simulação computacional. O âmbito tecnológico de automação de processos e construções inteligentes tem um futuro muito promissor no campo de inspeções e a correta aplicação conjunta destas ferramentas com a análise termográfica pode compor um auxílio iminente na área da gestão de estruturas da infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DABOUS, S. A.; YAGHI, S.; ALKASS, S.; & MOSELHI, O. Concrete bridge deck condition assessment using IR Thermography and Ground Penetrating Radar technologies. *Automation in construction*, v. 81, p.340-354, 2017.
- ADKINS, D. F.; MERKLEY G. P. Mathematical model of temperature changes in concrete pavements. *Journal of transportation engineering*, v. 116, n. 3, p.349-358, 1990.
- AHLBORN, T. M.; BROOKS, C. N. *Evaluation of Bridge Decks Using Non-Destructive Evaluation at Near Highway Speeds for Effective Asset Management*. Michigan Technological University: Houghton, MI, USA, 2015.
- ANDRADE FILHO, A. E. *Estudo comparativo da degradação de pontes de concreto armado e mistas nos estados do Ceará e Amazonas*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2008.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *Bridge Element Inspection Guide Manual*. Washington, D.C.: AASHTO, 178 p., 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D4788 – 03: Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 16292: Ensaio não destrutivo – Termografia – Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas*. Rio de Janeiro: ABNT, 5 p., 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 16485: Ensaio não destrutivo – Termografia – Medição e compensação da emissividade utilizando câmeras termográficas ou radiômetros*. Rio de Janeiro: ABNT, 4 p., 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 238 p., 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 9452: Vistorias de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 48 p., 2016.
- AROZTEGUI, José Miguel. *Parâmetros de conforto térmico em Porto Alegre*. Núcleo Orientado para Industrialização da Edificação, Departamento de Engenharia Civil Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 1977.
- BAGAVATHIAPPAN, S. et al. Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, v. 60, p.35-55, 2013.
- BARBOSA, E. M. *Teste de hipótese e aplicações*. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Estatística) - Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Estatística, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.

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

BRAIDO, J. D. *Avaliação da superestrutura de pontes através de parâmetros dinâmicos*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

BRIQUE, S. K. *Emprego da termografia infravermelha no diagnóstico de falhas de aderência de peças cerâmicas utilizadas em fachadas de edifícios*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

BORCHERS, W. H. *pracma: Practical Numerical Math Functions. R package version 2.2.5*. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=pracma>. Acesso em: 15 out. 2019.

CASTANEDO, C. I. et al. Solar loading thermography: time lapsed thermographic survey and advanced thermographic signal processing for the inspection of civil engineering and cultural heritage structures. *Infrared Physics & Technology*, v. 82, p.56-74, 2017.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. *Transferência de calor e massa: uma abordagem prática*. 4. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill Bookman, 904 p., 2012.

COELHO, N. A. *Métodos Analíticos e Numéricos para o Estudo dos Efeitos Termomecânicos no Concreto Massa Orientados às Barragens de Gravidade*. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

COMSOL. *Parasol and Solar Irradiation*. Criado em COMSOL Multiphysics 5.3a. Disponível em: <https://www.comsol.com/model/sun-s-radiation-effect-on-two-coolers-placed-under-a-parasol-12825>. Acesso em: 15 Out. 2019.

COTIČ, P. et al. Determination of the applicability and limits of void and delamination detection in concrete structures using infrared thermography. *NDT&E International*, v. 74, p.87-93, 2015.

CUNHA, L. S. *Avaliação de Edificações com a utilização da Termografia como ensaio não destrutivo – Estudo de caso*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2016.

CUNHA, M. M. F. *Vãos Envidraçados: Geometria de insolação – Optimização do dimensionamento de elementos de protecção solar*. 2005. Trabalho (Mestrado em Construção de Edifícios) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2005.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGENS. *Cadastro de Obras de Arte Especiais do RS*. DAER-RS, 2018. Disponível em: <https://www.daer.rs.gov.br/upload/arquivos/201806/12174105-oae-rs-052018.xls>. Acesso em: 08 set. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. *NORMA 010/2004 - PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – procedimento*. Rio de Janeiro: Diretoria de Planejamento e Pesquisa/Instituto de Pesquisas Rodoviárias, DNIT, 18 p., 2004.

DORAFSHAN, S.; MAGUIRE, M. Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 8, n. 3, p.443-476, 2018.

EHLERS, R. S. *CE-210 Inferência estatística: Testes de Hipóteses*. 2003. Disponível em: <http://www.leg.ufpr.br/~paulojus/CE210/ce210/node3.html>. Acesso em: 13 nov. 2018.

ESMAN, A. K. et al. Simulation of tandem thin film solar cell on the basis of CuInSe₂. *Energetika Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. v. 61, n. 5, p.385–395, 2018.

FARRAG, S.; YEHA, S.; QADDOUMI, N. Investigation of mix-variation effect on defect-detection ability using infrared thermography as a nondestructive evaluation technique. *Journal of Bridge Engineering*, v. 21, n. 3, p.1-15, 2016.

FERREIRA, J. V. S. *Inspeção e monitoramento de obras de arte especiais com vista a manutenção preditiva*. 2018. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

FRANDOLOSO, M. A. L. *La inserción de la eficiencia energética en los edificios universitarios brasileños: Las políticas y los procesos de toma de decisiones*. 2017. Tese (Doutorado em Arquitetura, Energia e Meio Ambiente), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2017.

GARRIDO, I.; LAGÜELA, S.; ARIAS, P. Infrared Thermography's Application to Infrastructure Inspections. *Infrastructures*, v. 3, n. 35, 19 p., 2018.

GHEITASI, A.; HARRIS, D. K. Performance assessment of steel–concrete composite bridges with subsurface deck deterioration. *Structures*, v. 2, p.8-20, 2015.

GOTHÄLL, H. How to Inspect Your Mesh in COMSOL Multiphysics®. *COMSOL Blog*. Disponível em: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-inspect-your-mesh-in-comsol-multiphysics/>. Acesso em: 21 Nov. 2019.

GRAY, A.; THOMSON P. Design of Moving Average Trend Filters using Fidelity, Smoothness and Minimum Revisions Criteria. In: *Athens Conference on Applied Probability and Time Series Analysis*. New York, p.205-219, 1996.

GUIMARÃES, P.R. Análise de Regressão. *Universidade Federal do Paraná - Servidor de pastas da UFPR*. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~jomarc/regressao.pdf>. Acesso em: 27 out. 2018.

- GÜRAY, E.; BIRGÜL, R. Determination of Favorable Time Window for Infrared Inspection by Numerical Simulation of Heat Propagation in Concrete. *Lecture Notes in Civil Engineering*, p.577-591, 2018.
- HAIR JR., Joseph F. et al. *Análise multivariada de dados*. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 688 p., 2009.
- HIASA, S.; BIRGUL, R.; CATBAS, F. N. Infrared thermography for civil structural assessment: demonstrations with laboratory and field studies. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 6, n. 3, p.619-636, 2016.
- HIASA, S.; BIRGUL, R.; CATBAS, F. N. A data processing methodology for infrared thermography images of concrete bridges. *Computers & Structures*, v. 190, p.205-218, 2017a.
- HIASA, S.; BIRGUL, R.; CATBAS, F. N. Investigation of effective utilization of infrared thermography (IRT) through advanced finite element modeling. *Construction and Building Materials*, v. 150, p.295-309, 2017b.
- HIASA, S.; BIRGUL, R.; CATBAS, F. N. Effect of defect size on subsurface defect detectability and defect depth estimation for concrete structures by infrared thermography. *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 36, n. 3, p.36-57, 2017c.
- HIASA, S.; BIRGUL, R.; MATSUMOTO, M.; CATBAS, F. N. Experimental and numerical studies for suitable infrared thermography implementation on concrete bridge decks. *Measurement*, v. 121, p.144-159, 2018.
- HOFFMANN, R. *Análise de regressão: Uma introdução à econometria*. 5. ed. Piracicaba, SP: O Autor, 393 p., 2016.
- HUH, J. et al. Experimental study on detection of deterioration in concrete using infrared thermography technique. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2016, p.1-12, 2016.
- IGNÁCIO, S. A. Importância da estatística para o processo de conhecimento e tomada de decisão. *Revista Paranaense de Desenvolvimento*, v. 118, p.175-192, 2010.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Estação meteorológica de observação de superfície automática*. INMET, 2018 e 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>. Acesso em: 09 jun. 2019.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Vienna: Training Courses Series, v. 17, IAEA, 231 p., 2002.
- ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: Ciência e tecnologia*. 1 ed., São Paulo: IBRACON, 2011.
- JANKŮ, M.; BĚZINA, I.; GROLEK, J. Use of infrared thermography to detect defects on concrete bridges. *Procedia Engineering*, v. 190, p.62-69, 2017.

KARUNARATHNE, A.; MAMPEARACHCHI, W.; NANAYAKKARA, A. Modelling of thermal effects due to solar radiation on concrete pavements. *Sri Lanka: University of Moratuwa*, 11 p., 2010.

KERSUL, G. M. *Uso da termografia para inspeções e manutenção predial– estudo de caso*. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2014.

KHAN, F.; BARTOLI, I. Detection of delamination in concrete slabs combining infrared thermography and impact echo techniques: a comparative experimental study. In: *Structural Health Monitoring and Inspection of Advanced Materials, Aerospace, And Civil Infrastructure 2015*, v. 9437, 11 p., 2015.

KHODAYAR, F.; SOJASI, S.; MALDAGUE, X. IRT for NDT: 2050 Horizon. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, v. 13, n. 3, p.210-231, 2016.

KUMAR, S.; MULLICK, S. C. Wind heat transfer coefficient in solar collectors in outdoor conditions. *Solar Energy*. v. 84, n. 6, p.956–963, 2010.

LabEEE Analysis SOL-AR, versão 6.2: programa de software. Florianópolis. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações/Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. Download em: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/software/analysis-sol-ar>. Acesso em: 10 abr. 2019.

LAMBERTS R., et al. *Eficiência Energética na Arquitetura*. 3 ed., Rio de Janeiro, 2014.

LOTTERMANN, A. F. *Patologias em estruturas de concreto: estudo de caso*. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.

MALDAGUE, X. *Theory and Practice of Infrared Technology for Non Destructive Testing*, Wiley: New York, 2001.

MAECHLER, M. et al. Cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. *R package version 2.1.0*. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=cluster>. Acesso em: 15 out. 2019.

MARINETTI, S.; CESARATTO, P.G. Emissivity estimation for accurate quantitative thermography. *Ndt & e International*, v. 51, p.127-134, 2012.

MENDONÇA, L. V. Termografia por Infravermelhos: Inspeção de Betão. *Engenharia e Vida*, v. 1, n. 16, p.53-57, 2005.

MILANEZ, M. O. *Influência do vento na detecção de defeitos em estruturas de concreto utilizando termografia infravermelha*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

MILANI, C. J. *Subsídios para o diagnóstico das pontes do sistema viário do município de Pato Branco – Paraná*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

MORAES, S. O.; VAN LIER, Q. J. *Aula Prática: Radiação do Corpo Negro, Cor e Temperatura de Superfícies*. USP, [entre 2005 e 2018]. 5 p. Disponível em: http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce5702/Radiacao_corpo_negro_cor_temp_superfície.doc. Acesso em: 24 out. 2018.

MOREIRA, J. R. S. (Org.). *Notas de aula de PME 3361 – Processos de Transferência de Calor e Massa: Aula 22-Propriedades da Radiação Térmica*. Universidade de São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2016/11/Aula-21-Radiação-Térmica-Introdução.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2018.

OMAR, T.; NEHDI, M. L.; ZAYED, T. Integrated condition rating model for reinforced concrete bridge decks. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 31, n. 5, 14 p., 2017.

OMAR, T.; NEHDI, M. L.; ZAYED, T. Infrared thermography model for automated detection of delamination in RC bridge decks. *Construction and Building Materials*, v. 168, p.313-327, 2018.

PINHO, F. O.; BELLEI, I. H. *Pontes e viadutos em vigas mistas*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia/Centro Brasileiro de Construção em Aço, 2007.

R CORE TEAM (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>

RSTUDIO TEAM (2019). *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, Inc., Boston, MA. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>

RAIKAR, C. Non Destructive testing (NDT) on bridges – state of the art. 2017. *The Master builder*. Disponível em: <https://www.masterbuilder.co.in/non-destructive-testing-ndt-bridges-state-art/>. Acesso em: 06 out. 2018.

RAPOSO, N. M. R. *Diagnóstico de patologias na construção apoiada na análise termográfica*. 2017. Trabalho de Relatório de Estágio (Mestrado em Engenharia Civil) – Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2017.

RATHOD, H.; GUPTA, R. Sub-surface simulated damage detection using Non-Destructive Testing Techniques in reinforced-concrete slabs. *Construction and Building Materials*, v. 215, p.754-764, 2019.

RAUBER, E. R. et al. Análise bibliográfica sobre as potencialidades da aquisição de imagens multi e hiperespectrais por VANTs no auxílio à inspeção de obras de arte especiais. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 6, n. 1, p.44-61, 2018.

REYNOLDS et al. The Application of K-Medoids and PAM to the Clustering of Rules. In: *International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning*. p.173-178, Berlin, 2004.

ROCHA, J. H. A.; PÓVOAS, Y. V. A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte. *Revista Alconpat*, v. 7, n. 3, p.200-214, 2017.

ROCHA, J. H. A.; PÓVOAS, Y. V.; SANTOS, C. F. Detection of Delaminations in Sunlight-Unexposed Concrete Elements of Bridges Using Infrared Thermography. *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 38, n. 1, 12 p., 2018.

RÓŜAńSKI, I.; ZIOPAJA, K. Assessment of the technical condition of concrete bridges by means of infrared thermography. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1065, 5 p., 2018.

SANTOS, L. *Classificação e modelagem de fatores de influência sobre inspeções termográficas em ambientes desabrigados*. 2012. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

SHARPLES, S.D.; CHARLESWORTH, P.S. Full-scale measurements of wind-induced convective heat transfer from a roof-mounted flat plate solar collector. *Solar Energy*, v.62, n.2, p.69-77, 1998.

SILVA, B. P. A. *Metodologia para a determinação de temperatura em painéis fotovoltaicos por meio de termografia quantitativa*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SILVA, R. Análise térmica pelo método dos elementos finitos. *Engineering simulation and scientific software*. 2017. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/analise-termica-pelo-metodo-de-elementos-finitos/>. Acesso em 04 jan. 2019.

SOUZA, R. M. *O Método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor*. Belém, PA: UFPR, 39 p., 2003. Disponível em: <https://slidex.tips/download/o-metodo-dos-elementos-finitos-aplicado-ao-problema-de-conducao-de-calor> Acesso em: 26 out. 2018.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. São Paulo: PINI, 255 p., 1998.

SPEAKMAN, J. R.; WARD S. G. Infrared thermography: principles and applications. *Zoology*, v. 101, p.224-232, 1998.

TESTO. *Guia de Bolso Testo para Termografia*. 2009. Disponível em: <ftp://ftp.sm.ifes.edu.br/professores/ViniciusErler/Manutencao%20Industrial/Termografia/Guia%20Termografia.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2019.

TESTO. *Testo 881 · Thermal imager: Instruction manual*. 2018. Disponível em: <http://www.testo350.com/downloads/881/testo%20881%20Instruction%20Manual.pdf>. Acesso em: 10 set. 2018.

THAJEEL, H. A. *Numerical modeling of infrared thermography techniques via ANSYS*. 2014. Thesis (Master of Science in Mechanical Engineering), Faculty of the Graduate School, Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO, 2014.

TOZETTO, R. S. *Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de vibrações em estruturas de baixa frequência natural*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

TRAN, Q. H. et al. Effects of ambient temperature and relative humidity on subsurface defect detection in concrete structures by active thermal imaging. *Sensors*, v. 17, 8 p., 2017.

TRIMIS. *BRIME Bridge Management in Europe: outline*. Disponível em: <https://trimis.ec.europa.eu/project/bridge-management-europe>. Acesso em: 26 set. 2018.

USAMENTIAGA, R. et al. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Sensors*, v. 14, n. 7, p.12305-12348, 2014.

VERAS, R. M. *Métodos numéricos em condução de calor: resumo*. 2010. Trabalho disciplinar - disciplina de Transferência de Calor (Graduação em Engenharia Mecânica), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2010.

VITÓRIO, J. P. *Pontes rodoviárias: fundamentos, conservação e gestão*. 1 ed. Recife: Conselho Regional de Engenharia Arquitetura e Agronomia de Pernambuco – CREA-PE, 140 p., 2002.

VITÓRIO, J. A. P. Uma Contribuição ao Estudo da Avaliação da Segurança de Pontes Existentes. *Engenharia Estudo e Pesquisa*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p.3-13, 2015.

VOLLMER, M.; MOLLMANN, K. P. *Infrared Thermal Imaging Fundamentals Research and Applications*. Weinheim, Germany: WILEY-VCH, 611 p., 2010.

WAJDOWICZ, C. C. et al. Literature Review of conditions and methods of repairing concrete bridges. In: BITTENCOURT, T. N.; FRANGOPOL, D. M.; BECK, A. (Eds.). *Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks*. Londres: Taylor e Francis, 2016.

WASHER, G. et al. Effects of Environmental Variables on Infrared Imaging of Subsurface Features of Concrete Bridges. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2108, p.107-114, 2009.

WASHER, G.; BOLLENI, N.; FENWICK, R. Thermographic Imaging of Subsurface Deterioration in Concrete Bridges. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2201, p.27-33, 2010a.

WASHER, G.; FENWICK, R.; BOLLENI, N. Effects of Solar Loading on Infrared Imaging of Subsurface Features in Concrete. *Journal of Bridge Engineering*, v. 15, n. 4, p.384-390, 2010b.

WASHER, G. et al. Guidelines for Thermographic Inspection of Concrete Bridge Components in Shaded Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2360, p.13-20, 2013.

WATASE, A. et al. Practical identification of favorable time windows for infrared thermography for concrete bridge evaluation. *Construction and Building Materials*, v. 101, p.1016-1030, 2015.

WEIL, G. J.; HAEFNER, L.E. Toward an integrated nondestructive pavement testing management information system using infrared thermography. *Transportation Research Record*, v. 1215, p.124-131, 1989.

YEHIA, S. et al. Detection of Common Defects in Concrete Bridge Decks Using Nondestructive Evaluation Techniques. *Journal of Bridge Engineering*, v. 12, n. 2, p.215-225, 2007.

APÊNDICE 1 – Especificações técnicas da câmera termográfica TESTO 881-1

Características	TESTO 881-1
Tipo de Detector	FPA 160 x 120 pixels
Sensibilidade térmica (NETD)	< 50 Mk a 30°C
Campo de visão/distância mínima de foco	32° x 23°/0.1 m (lente padrão) 9° x 7°/0.5 m (lente teleobjetiva)
Resolução geométrica (IFOV)	3,3 mrad (lente padrão) 1,0 mrad (lente teleobjetiva)
Super resolução (pixel/IFOV)	320x240 pixels / 2,1 mrad (lente padrão) 0,6 mrad (lente teleobjetiva)
Taxa de atualização de imagem	33 Hz*
Focos	manual
Faixa espectral	8 a 14µm
Tamanho as Imagem	
Exibição da imagem 3	3.5” LCD com 320x240 pixels
Opções de exibição	Somente imagem IR/ real / imagem IR e real
Saída de vídeo	USB 2.0
Cores nas paletas	9 (ferro, arco-íris, frio-quente, azul-vermelho, zinza, cinza invertido, sépia, TEXTO, ferro HT)
Faixa de temperatura	-20°C a 100°C / 0°C a 350 °C (comutável)
Exatidão	±2°C, ±2% do vm. ±3% do vm. (+350°C a +550°C)
Emissividade, temperatura refletida	0.01 A 1 / manual
Função de análise	Até 2 pontos de medição, reconhecimento de ponto quente/frio, transferência automática de valores de medição em tempo real
Câmera Digital	Possui
Lente Padrão	32° x 23°
Vídeo Contínuo (Via USB)	Possui
Formato de arquivo	Nas opções .bmt; .bmp; .jpg; .png; .csv; .xls
Dispositivo de armazenagem	Cartão SD 2 GB (aprox. 2000 imagens)
Tempo de operação	4 horas – Carga rápida
Temperatura de operação	-15°C a 40°C
Temperatura de armazenagem	-30°C a 60°C
Umidade do ar	20% a 80% sem condensação
Classe de Proteção (IEC 60529)	IP54
Vibração (IEC 60068-2-6)	2G
Peso	Aprox. 900 g
Dimensões (L x W x H) em mm	152 x 108 x 262
Montagem do tripé	M6
Carcaça	ABS
Software – Requisitos do Sistema	Windows XP (Service Pack 3) Windows Vista, Windows 7, Interface USB 2.0

APÊNDICE 2 – Dados das condições ambientais em cada levantamento

Horário	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
NOVEMBRO															
Temperatura Ambiente (C°)	16,80	18.60	22.00	24.00	26.20	27.90	29.30	29.60	29.80	30.50	30.00	29.40	27.50	25.90	25.10
Umidade Relativa do ar(%)	70.00	67.00	60.00	53.00	49.00	49.00	44.00	41.00	38.00	37.00	37.00	39.00	45.00	50.00	56.00
Velocidade do Vento(m/s)	4.10	4.00	4.00	5.40	5.60	4.80	3.00	2.40	2.30	1.10	0.80	1.20	1.80	2.30	3.30
Radiação Solar(KJ/m²)	-3.54	-2.98	231.70	955.20	1821.00	2577.00	3120.00	3430.00	3908.00	2590.00	1636.00	2828.00	2580.00	1893.00	1064.00
Pressão Atmosférica (hPa)	935.80	936.40	937.30	938.00	937.90	937.70	937.30	936.80	935.90	935.20	934.60	933.30	932.70	932.00	931.70
FEVEREIRO															
Temperatura Ambiente (C°)	24.20	26.20	27.60	28.80	31.40	32.20	34.50	37.90	35.60	34.80	31.00	29.80	24.50	24.20	22.50
Umidade Relativa do ar(%)	89.00	92.00	92.00	90.00	85.00	79.00	75.00	68.00	60.00	57.00	55.00	49.00	51.00	53.00	62.00
Velocidade do Vento(m/s)	0.30	0.10	0.20	0.20	0.20	0.50	0.30	0.70	0.50	0.60	0.20	0.10	0.10	0.10	0.20
Radiação Solar(KJ/m²)	-3.54	-3.54	-3.54	144.70	833.80	1728.00	2472.00	2853.00	2376.00	3123.00	3157.00	2721.00	2285.00	1274.00	982.40
Pressão Atmosférica (hPa)	934.10	933.70	934.10	934.60	935.20	935.70	936.00	935.60	934.90	934.20	933.60	932.80	932.00	931.80	931.60
MARÇO															
Temperatura Ambiente (C°)	20.40	20.80	26.00	30.10	35,50	33,60	33,10	31,40	30,60	31,20	28,90	25,40	22,90	22,10	21,20
Umidade Relativa do ar(%)	80.00	76.00	74.00	61.00	52,00	50,00	48,00	49,00	50,00	52,00	57,00	71,00	79,00	81,00	82,00
Velocidade do Vento(m/s)	1.20	1.50	1.30	1.20	1.10	1.90	3.60	5.50	5.60	5.80	8.20	7.20	0.10	5.40	4.70
Radiação Solar(KJ/m²)	-3.53	-3.48	-3.14	16.14	252.70	630.70	1710.00	2135.00	2579.00	2704.00	2228.00	913.80	854.70	593.70	345.00
Pressão Atmosférica (hPa)	935.90	936.00	936.00	936.50	937.00	937.10	936.80	936.50	935.70	934.80	933.90	933.50	933.00	932.60	932.20
ABRIL															
Temperatura Ambiente (C°)	11.80	13.10	14.40	16.80	19.20	20.60	21.00	22.60	23.40	22.70	21.70	19.20	18.40	18.30	17.50
Umidade Relativa do ar(%)	88.00	85.00	80.00	77.00	53.00	52.00	50.00	46.00	54.00	55.00	58.00	63.00	76.00	72.00	72.00
Velocidade do Vento(m/s)	3.70	1.80	1.90	1.00	0.80	1.20	1.00	1.30	1.10	1.00	0.30	0.10	1.30	1.10	1.80
Radiação Solar(KJ/m²)	-3.54	-3.54	-3.54	10.73	403.3	1279.00	2025.00	2571.00	2811.00	2871.00	2741.00	2139.00	1794.00	1106.00	296.80
Pressão Atmosférica (hPa)	935.50	936.00	936.50	937.10	937.60	938.00	938.10	937.80	937.30	936.30	935.60	935.20	935.10	935.10	935.10

APÊNDICE 2 - Dados das condições ambientais em cada levantamento

(cont.)

Horário	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
JUNHO															
Temperatura Ambiente (C°)	14.90	16.00	18.10	20.30	22.50	22.80	25.20	26.10	25.70	25.7	24.10	22.10	21.10	20.30	19.60
Umidade Relativa do ar(%)	89.00	87.00	82.00	77.00	68.00	70.00	64.00	57.00	64.00	56.00	60.00	67.00	70.00	72.00	76.00
Velocidade do Vento(m/s)	7.70	8.50	4.10	3.90	4.60	1.40	2.20	2.40	2.50	1.70	0.20	0.30	0.20	0.10	0.80
Radiação Solar(KJ/m²)	-3.54	-3.54	-3.54	-3.54	93.97	372.40	559.50	1414.00	1645.00	1876.00	1691.00	1510.00	1155.00	550.60	78.53
Pressão Atmosférica (hPa)	940.60	940.50	940.50	941.20	942.00	942.50	942.90	942.70	942.20	941.40	940.70	940.40	940.20	940.10	940.30
JULHO															
Temperatura Ambiente (C°)	-2.80	-1.90	3.20	5.20	6.50	8.90	9.90	9.20	9.00	8.70	7.50	6.20	5.20	4.50	3.10
Umidade Relativa do ar(%)	88.00	81.00	72.00	58.00	59.00	59.00	54.00	49.00	47.00	49.00	51.00	55.00	60.00	64.00	68.00
Velocidade do Vento(m/s)	0.10	0.10	0.30	0.80	1.20	2.10	1.10	1.60	1.20	1.50	2.10	0.10	1.20	0.90	0.40
Radiação Solar(KJ/m²)	-3.54	-3.54	-3.49	-3.54	162.60	1071.00	1463.00	1997.00	2262.00	2431.00	2361.00	2025.00	1457.00	799.20	145.90
Pressão Atmosférica (hPa)	946.40	946.30	946.40	946.50	947.20	947.90	948.60	948.80	948.70	947.30	947.50	947.30	947.30	947.40	947.50



UPF
UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br