

INSTITUTO FEDERAL

Goiás

Câmpus Formosa

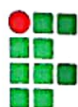
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

GLEISSIELLE DE OLIVEIRA COSTA

**USO DA TERMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL
DO CONCRETO**

FORMOSA- GOIÁS

2023



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Gleissielle de Oliveira Costa

Matrícula: 20181070080218

Título do Trabalho: Uso da termografia para avaliação da temperatura superficial do concreto

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ () O documento está sujeito a registro de patente.
☐ () O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ () Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Formosa, 15/02/23.
Local Data

Gleissielle de Oliveira Costa

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

GLEISSIELLE DE OLIVEIRA COSTA

**USO DA TERMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL
DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de curso
apresentado à coordenação do curso de
Bacharelado em Engenharia Civil do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás, Câmpus Formosa,
como requisito para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Alécio Junior
Mattana.

Coorientador: Prof. Dr. Agno Alves Vieira

FORMOSA- GOIÁS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

C837u

Costa, Gleissielle de Oliveira

Uso da termografia para avaliação da temperatura superficial do concreto. / Gleissielle de Oliveira Costa — Formosa, 2023.

79 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Me. Alécio Junior Mattana

Coorientador: Prof. Dr. Agno Alves Vieira.

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC (Graduação) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Formosa, Bacharelado em Engenharia Civil.

1.Termografia. 2.Concreto. 3. Fissura. I. Mattana, Alécio Junior. II. Vieira, Agno Alves. III. Título. IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Formosa.

CDD: 624

Bibliotecária: Charlene Cardoso Cruz CRB1-DF nº 2909



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS FORMOSA

ATA Nº 11/ 2023

Engenharia Civil / Câmpus Formosa

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Aos dezanove dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e três, às 18:00 horas, foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso II da Graduanda **Gleissielle de Oliveira Costa** (matrícula 20181070080218) do curso de Engenharia Civil, no segundo semestre letivo do ano de dois mil e vinte dois. A defesa ocorreu via web Conferência pelo Google Meet. A banca foi composta pelos seguintes membros:

- Alécio Júnior Mattana (Orientador)
- Agno Alves Vieira (Co-orientador)
- Divino Gabriel Lima Pinheiro (Avaliador Interno)
- Paulo Henrique Borba Rolim (Avaliador Externo)

Sob a presidência do primeiro. O trabalho de conclusão de curso tem como título "**Uso da termografia para avaliação da temperatura superficial do concreto**" sob orientação do Prof. Alécio Júnior Mattana. Após a apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso II, tendo sido a autora arguida pela Banca Examinadora, a nota obtida foi **9,0**. A sessão foi encerrada às 19:30 horas. Eu, Prof. André Augusto Nóbrega Dantas, dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da Banca.

Prof. André Augusto Nóbrega Dantas

(Assinado eletronicamente)

Prof. Alécio Júnior Mattana

(Assinado eletronicamente)

Prof. Agno Alves Vieira

(Assinado eletronicamente)

Prof. Divino Gabriel Lima Pinheiro

(Assinado eletronicamente)

Prof. Paulo Henrique Borba Rolim

(Assinado eletronicamente)

Prof. Fabiano Campos Macêdo

Coordenador do Curso Bacharelado em Engenharia Civil/ Câmpus Formosa
(Assinado eletronicamente)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fabiano Campos Macedo**, COORDENADOR DE CURSO - FUC1 - FOR-CCBENG, em 08/02/2023 15:01:26.
- **Agno Alves Vieira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/02/2023 09:09:08.
- **Paulo Henrique Borba Rolim**, Paulo Henrique Borba Rolim - Professor Efetivo EBT - Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Paraná (10652179000891), em 25/01/2023 11:56:55.
- **Alecio Junior Mattana**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 25/01/2023 11:20:19.
- **Divino Gabriel Lima Pinheiro**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 23/01/2023 18:30:54.
- **Andre Augusto Nobrega Dantas**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 23/01/2023 15:22:26.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 23/01/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 367015

Código de Autenticação: 5a1498380e



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua 64 esquina com Rua 11, S/Nº, Expansão Parque Lago, Formosa / GO, CEP 73813-816
(61) 3642-9491 (ramal: 9491), (61) 3642-9493 (ramal: 9493)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado e me dado forças durante toda minha trajetória, me proporcionando essa tão sonhada conquista.

Aos meus pais, Detinho e Luzia, meu irmão Gleisson, pelo companheirismo, carinho, amor, compreensão, por sempre me encorajarem, acreditarem em mim e não me deixar desistir.

Ao meu melhor amigo Luiz Fernando, por me apoiar, acreditar em mim, me incentivar e sempre proferir palavras de conforto para que eu não desistisse.

As minhas amigas Milena, Juliana, Vanessa, Mariana e Netoli, pelo apoio, paciência, muito incentivo e conselhos para que eu não desistisse.

As minhas companheiras Anna Julia, Ana Carolina e Wélida que foram fundamentais durante a minha trajetória.

Ao meu chefe Luiz Otávio e meu supervisor Sebastião, pela oportunidade, apoio, disponibilidade, compreensão e por compartilhar seus conhecimentos comigo.

Ao meu orientador Alécio Mattana e coorientador Agno Alves, que foram peças fundamentais para realização deste trabalho, agradeço a atenção, compreensão, conselhos, motivação, paciência, disponibilidade, conhecimento repassado e por cuidar de todos os detalhes.

Enfim, a todos amigos, professores e familiares que de forma direta ou indiretamente contribuíram em minha caminhada.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para
todo o propósito debaixo do céu”.

(Eclesiastes 3:1)

RESUMO

Os ensaios não destrutíveis, como a termografia, são importantes para análise e determinação das características de elementos estruturais de concreto, durante a fase inicial de fabricação ou em estruturas existentes que necessitem de alguma inspeção. A temperatura superficial do concreto pode ser influenciada pelo calor de hidratação e por fatores climáticos. A mesma quando muito elevada pode acelerar a evaporação da água que pode provocar o surgimento de manifestações patológicas. O monitoramento da temperatura superficial durante o processo de endurecimento do concreto pode auxiliar no procedimento de cura do elemento estrutural a fim de evitar o surgimento das fissuras. Assim, o objetivo desse trabalho foi realizar um estudo sobre a variação da temperatura superficial do concreto durante o processo de endurecimento, com o auxílio de uma câmera termográfica. Os testes foram realizados em laboratório e campo, os mesmos consistiram na fabricação de protótipos e análise de laje recém concretada, respectivamente. As análises foram baseadas em entender os parâmetros de ensaio como as influências do calor de hidratação e fatores climáticos na temperatura superficial do concreto, além disso analisar a sensibilidade e as limitações do procedimento e do equipamento utilizado. Os resultados indicaram que a utilização da câmera térmica para avaliação de materiais cimentícios se apresenta viável quanto a leitura da temperatura, os termogramas não foram possíveis de serem utilizados devido a auto calibração de cores da câmera. Foi verificado que o principal fator que impacta a temperatura superficial do concreto é a temperatura ambiente.

Palavras chave: Termografia, concreto, endurecimento, fissuras, cura.

ABSTRACT

Non-destructible tests, such as thermography, are important for analyzing and determining the characteristics of concrete structural elements, during the initial manufacturing phase or in existing structures that require some inspection. The surface temperature of concrete can be influenced by the heat of hydration and by climatic factors. The temperature when very high can accelerate the evaporation of water that can cause the appearance of pathological manifestations. Monitoring the surface temperature during the concrete hardening process can help in the curing procedure of the structural element in order to avoid the appearance of cracks. Thus, the objective of this work was to carry out a study on the surface temperature variation of concrete during the hardening process, with the aid of a thermographic camera. The tests were carried out in the laboratory and in the field, they consisted in the manufacture of prototypes and analysis of a newly concreted slab, respectively. The analyzes were based on understanding the test parameters such as the influences of the heat of hydration and climatic factors on the surface temperature of the concrete, in addition to analyzing the sensitivity and limitations of the procedure and the equipment used. The results indicated that the use of the thermal camera to evaluate cementitious materials is feasible in terms of temperature reading, the thermograms were not possible to be used due to the camera's self-calibration of colors. It was found that the main factor that impacts the surface temperature of concrete is the ambient temperature.

Keywords: thermography, concrete, hardening, fissures, cure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento térmico durante o processo de hidratação	23
Figura 2 - Fissuras devido a retração do concreto	28
Figura 3 - Representação do ensaio de William Herschel.....	33
Figura 4 - Espectro eletromagnético	34
Figura 5 - Imagens registradas em uma laje que estava sendo concretada	35
Figura 6 - (a) Termografia passiva (b) termografia ativa	36
Figura 7 - Transferência de calor por condução.....	37
Figura 8 - Transferência de calor por radiação.....	37
Figura 9 - Transferência de calor por convecção	38
Figura 10 - Ângulo de posicionamento da câmera	40
Figura 11 – Fluxograma dos testes realizados.....	46
Figura 12 - Câmera termográfica FLIR TG165 – X	47
Figura 13 - Termômetro tipo espeto	47
Figura 14 – Termo-higrômetro.....	48
Figura 15 – (a) Câmera térmica posicionada na laje (b) termograma obtido	49
Figura 16 - Protótipos em formas de argamassa	50
Figura 17 - Posicionamento dos equipamentos	50
Figura 18 - Concretagem de laje maciça.....	51
Figura 19 - (a) posicionamento da câmera térmica e higrômetro (b) Posição do termômetro	52
Figura 20 - Protótipos de concreto	53

Figura 21 - Posicionamento da câmera térmica no laboratório	54
Figura 22 - Posicionamento câmera térmica em campo	54
Figura 23 - Protótipos P1 e P2	55
Figura 24 - Imagens termográficas do ensaio	56
Figura 25 - temperatura superficial e interna da argamassa, temperatura ambiente e umidade relativa do ar	58
Figura 26 – (a) Termograma 1 (b) Termograma 2.....	60
Figura 27 - Temperatura superficial, interna, ambiente e umidade relativa do ar obtidos em campo.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estágios do processo de hidratação do cimento.....	24
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados obtidos da análise de protótipos de argamassa em laboratório....	57
Tabela 2 - Dados obtidos da análise de laje em campo.....	60
Tabela 3 - Dados obtidos da análise de protótipos com maiores dimensões, em laboratório	62
Tabela 4 - Dados obtidos da análise de protótipos com maiores dimensões, em campo	64

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

°C	Graus celsius
°F	Grau Fahrenheit
Fck	Feature Compression Know (Resistência Característica do Concreto à Compressão)
µm	Micrometro
A/C	Relação água-cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
ACI	American Concrete Institute
Al ₂ O ₃	Alumina
CaO	Óxido de cálcio
cm	Centímetro
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
K ₂ O	Óxido de Potássio
kg	Quilograma
m	Metro
m ³	Metro cúbico
MgO	Magnésia
mm	Milímetro
mK	Milikelvin

Mpa	Mega Pascal
Na ₂ O	Óxido de Sódio
NBR	Norma Brasileira
PVA	Acetato de Polivinila
SiO ₂	Sílica
TiO ₂	Titânio
V	Volt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVO GERAL	17
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	CONCRETO	18
2.1.1	Componentes básicos do concreto	19
2.1.1.1	Cimento	19
2.1.1.2	Agregados	20
2.1.1.3	Água	21
2.1.1.4	Aditivos	21
2.1.2	Hidratação do concreto.....	22
2.1.3	Cura do concreto	25
2.1.4	Retração do concreto.....	27
2.2	FATORES QUE INFLUENCIAM NO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO CONCRETO.....	29
2.2.1	Condutividade térmica do concreto.....	30
2.2.2	Gradiente térmico	30
2.2.3	Condições climáticas	31
2.3	PROCESSO FÍSICO DE EVAPORAÇÃO DA ÁGUA	32
2.4	TERMOGRAFIA	33

2.4.1	Princípios fundamentais da termografia infravermelha.....	36
2.4.2	Câmera infravermelha	39
2.4.3	Fatores que influenciam na captação de imagens infravermelhas.....	39
2.4.4	Termografia na construção civil.....	42
3	METODOLOGIA.....	45
3.1	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	45
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	46
3.3	EXECUÇÃO DOS TESTES	48
3.3.1	1º teste - Avaliação do funcionamento da câmera	48
3.3.2	2º teste – Protótipos de argamassa	49
3.3.3	3º teste - Concretagem de laje.....	51
3.3.4	4º teste – Protótipos de concreto com maiores dimensões	52
3.3.5	5º teste – Protótipos de concreto no canteiro de obras.....	54
4	RESULTADOS	56
4.1	1º TESTE – TESTE DO FUNCIONAMENTO DA CÂMERA	56
4.2	2º TESTE - PROTÓTIPO DE ARGAMASSA.....	57
4.3	3º TESTE – CONCRETAGEM DE LAJE	60
4.4	4º TESTE - PROTÓTIPO DE CONCRETO EM LABORATÓRIO	62
4.5	5º TESTE - PROTÓTIPO DE CONCRETO NO CAMPO	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	69
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

O concreto composto por aglomerantes, agregados, aditivos e água, é caracterizado por sofrer mudanças nas propriedades mecânicas e térmicas conforme a variação de temperatura (VIEIRA, 2018). Os efeitos da temperatura no concreto podem se originar a partir de influências das condições climáticas ou das reações químicas responsáveis pelo endurecimento e ganho de resistência do concreto que são exotérmicas (SANTOS, BITTENCOURT E GRAÇA, 2011; SARAIVA, 2018).

O calor gerado pela hidratação do cimento na peça de concreto é transferido por condução do núcleo para a superfície e desta para o meio ambiente. Esta transferência de calor, leva ao surgimento de gradientes de temperatura, que dependendo as dimensões da peça, introduzem tensões de tração e compressão no concreto, tensões estas que podem causar fissuras de origem térmica (ARAÚJO, 2013).

Além disso, o processo de hidratação, gera movimentação e evaporação prematura da água da mistura, podendo levar ao surgimento de fissuras. Esse fenômeno é conhecido como retração (MILAGRES, 2019).

A evaporação da água, condutividade térmica e temperatura do concreto são influenciados por fatores climáticos como, a alta temperatura ambiente, a baixa umidade relativa do ar, incidência solar e a velocidade do vento que incide sobre a peça recém concretada, sendo estes fatores responsáveis por intensificar ou agravar problemas no concreto (TELES, 2017).

Diante disso, com o passar do tempo, os requisitos no padrão de qualidade estrutural, levou ao desenvolvimento de novas pesquisas com o intuito de desenvolver métodos, procedimentos ou tecnologias que gerem melhorias na durabilidade e nas propriedades do concreto (MARQUES, 2018).

Dentre os avanços tecnológicos na construção civil, os ensaios não destrutivos têm cada vez mais se destacado. Estes métodos foram desenvolvidos com o intuito de monitorar, avaliar e viabilizar do estado de conservação da estrutura, sem precisar danificá-la (OLIVEIRA et al., 2019).

A termografia infravermelha é um dos métodos de ensaios não destrutivos. Este ensaio quando utilizado para avaliar estruturas de concreto é capaz de determinar a distribuição de temperatura da superfície, através da radiação infravermelha emitida por ela. O uso da termografia vem cada vez mais sofrendo avanços na construção civil quanto a inspeção de edificações, pois além da determinação de temperatura, é utilizado em busca de anomalias, como fissuras, infiltrações, mal aderência de revestimentos, entre outros (MILANEZ, 2017).

Neste trabalho, a termografia infravermelha será utilizada no monitoramento da temperatura superficial do concreto durante o processo de endurecimento. Visando entender o comportamento da temperatura do concreto, bem como as aplicabilidades, limitações e sensibilidade do equipamento para este fim.

1.1 JUSTIFICATIVA

Quando as estruturas de concreto são volumosas, se utiliza o concreto massa e uma grande preocupação, é a diferença entre as temperaturas internas e superficiais, ou seja, o gradiente de temperatura, que provoca deformações no concreto ocasionando as fissuras (COELHO et al., 2013). Em peças de concreto com menor espessura, o gradiente de temperatura pouco influencia (DUARTE, 2018).

Apesar do gradiente de temperatura não influenciar significativamente estruturas com menor volume de concreto, o surgimento de fissuras nesse tipo de peça geralmente é devido a retração do concreto que está associado a diminuição de volume causada pela saída de água através da superfície em contato com o ambiente (exsudação). A evaporação dessa água exsudada pode ser impactada pelas condições climáticas. A leitura da temperatura superficial durante o processo de endurecimento pode contribuir para entender esse fenômeno.

Diante de maiores exigências da qualidade de estruturas de concreto é muito importante o desenvolvimento de alternativas que permitam avaliar de forma eficaz e econômica a qualidade destas (LORENZI et al., 2019). A aplicação de ensaios não destrutivos, como a termografia, é de grande importância na determinação das propriedades de estruturas de concreto, seja em seus estágios iniciais ou em estruturas existentes que necessitem de avaliação (SOARES et al., 2021).

O conhecimento da temperatura superficial do concreto, bem como sua origem durante o processo de endurecimento é importante na hora de definir a necessidade de cura, procedimento este realizado para evitar a evaporação da água da mistura, controlar a temperatura e diminuir a possibilidade do surgimento de fissuras no concreto.

1.2 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo sobre a variação da temperatura superficial do concreto durante o processo de endurecimento, com o auxílio de uma câmera termográfica.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar através da pesquisa bibliográfica o processo de utilização de equipamento termográfico aplicado a superfície de materiais cimentícios;
- Identificar as variáveis relativas a materiais e meio ambiente que podem impactar na temperatura superficial do concreto;
- Analisar a sensibilidade e limitações do equipamento por meio de comparações entre o ensaio em laboratório e campo;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste item serão abordados os temas mais relevantes do levantamento bibliográfico realizado. Primeiramente, apresentam-se os conceitos referentes ao concreto, seus componentes e propriedades. Em seguida, a termografia como ensaio não destrutivo aplicado na construção civil, dando ênfase na utilização do mesmo para investigação da temperatura superficial do concreto.

2.1 CONCRETO

O concreto é um dos materiais mais utilizado na construção civil, por ser um material versátil, fácil de produzir, durável, econômico, resistente à água, entre outros (SIQUEIRA et al., 2018). É um material obtido a partir da mistura de cimento, água, agregados e aditivos/adições, seguindo uma proporção conhecida como dosagem (SALES, 2008).

O cimento é considerado um dos principais materiais do concreto, por si só não é capaz de aglomerar os agregados, por isso é necessário a ocorrência de reações entre seus componentes, que ocorrem a partir do momento em que é adicionado água à mistura (MATTOS et al., 2015).

Quando em contato com a água o cimento gera uma reação exotérmica, ou seja, ocorre liberação de energia na forma de calor, conhecido como calor de hidratação, que pode durar dias (SOUZA, SILVA e CASTRO, 2014).

Em peças estruturais de menor espessura, o calor se dissipa com maior facilidade para o ambiente devido ao menor caminho a percorrer, principalmente por condução na peça, já em elementos de grandes volumes o mesmo não ocorre. Logo, toda essa energia que é liberada em forma de calor, pode resultar no aumento da temperatura do concreto (DUARTE, 2018).

A diferença entre a temperatura interna e externa do concreto, ou seja, o gradiente de temperatura, provoca deformações no concreto que consequentemente produz fissuras. Quanto maior o gradiente de temperatura, maior a probabilidade do

surgimento de trincas e maior a abertura dessas trincas devido ao aumento da tensão (COELHO, et. al 2013).

Além disso, um dos problemas que mais ocorrem é a fissuração por retração, que geralmente acontece devido a movimentação e evaporação prematura da água durante o processo de hidratação. O fenômeno de retração pode ser do tipo plástica, hidráulica, térmica, autógena e química (MILAGRES, 2019). Nos tópicos seguintes será abordado e explicados cada tipo de retração.

Desse modo, faz-se necessário a realização da cura do concreto, procedimento que contribui para evitar a perda de água da mistura e realizar o controle da temperatura do concreto ao longo do processo de endurecimento (SILVA et al., 2011 e COUTO et al., 2013).

2.1.1 Componentes básicos do concreto

A seguir serão apresentados os materiais básicos para confecção do concreto, dentre eles o cimento, agregados, água e aditivos e algumas considerações relacionadas com a influência destes na temperatura do concreto.

2.1.1.1 Cimento

O cimento Portland é definido como um pó fino com propriedades aglomerantes e de endurecimento sob a ação da água. É composto principalmente por clínquer, componente básico presente em todos os tipos de Cimento Portland, e adições, que variam de acordo com o tipo de cimento. O clínquer possui como matéria prima o calcário e argila (TRINTA, 2019).

O cimento Portland anidro é composto por óxido de Cálcio (CaO), Sílica (SiO_2), Alumina (Al_2O_3), Óxido de Ferro (Fe_2O_3), certa proporção de Magnésia (MgO) e uma porcentagem pequena de gesso, que é adicionado posteriormente a calcinação com o intuito de retardar o tempo de pega do produto. Ainda como constituintes menores, possui impurezas, como Óxido de Sódio (Na_2O), Óxido de Potássio (K_2O), Óxido de Titânio (TiO_2) e outras substâncias de menor importância. Os Óxidos de Potássio e Sódio constituem os denominados álcalis do cimento (BAUER, 2019).

Quando os compostos do cimento anidro entram em contato com a água e são dissolvidos, inicia-se o processo de hidratação cimento. A hidratação ocorre de forma exotérmica, ou seja, há liberação de calor (NEVILLE, 2016). A quantidade total de calor liberado depende da quantidade de cimento da mistura, sendo que, quanto maior o consumo de cimento maior a quantidade de calor. A velocidade das reações de hidratação depende da temperatura que ocorre a hidratação e da finura do cimento, logo quanto mais fino o cimento mais rápido serão as reações (SANTOS, BITTENCOURT e GRAÇA, 2011).

Segundo Alves (2002), a taxa de liberação de calor por volume de concreto depende do tipo de cimento, bem como do seu consumo no traço, e a velocidade com que esse calor é gerado depende da temperatura inicial do concreto, temperatura ambiente e das características dos agregados.

2.1.1.2 Agregados

Por definição, o agregado é um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto (ABNT, 2011). A qualidade dos agregados (areia e pedras britadas) no volume de concreto é bastante importante nas estruturas. Além de serem materiais que predominam, por representarem cerca de 75% do volume do concreto, também podem afetar sua resistência e economia, quando não apresentam uma boa qualidade (SALES, 2008).

Os agregados devem ser compostos por partículas minerais duras, densas, estáveis, duráveis e limpas e não devem conter partículas que afetem a hidratação e endurecimento do concreto, a proteção contra a corrosão das armaduras, a durabilidade ou, aparência visual externa do concreto (ABNT, 2009).

A forma das partículas, a textura superficial e a granulometria impactam diretamente as propriedades do concreto no estado fresco, principalmente no consumo de cimento na pasta, quanto maior a proporção, mais angulosa e áspera forem as partículas, maior o consumo (LODI, 2006).

Diante disso, o fato de o consumo de cimento ser afetado, conseqüente é gerado um impacto na reação de hidratação que ocorre a partir do momento em que a água é adicionada na mistura.

2.1.1.3 Água

É fundamental a utilização da água no concreto visto que, a mesma possibilita as reações químicas do cimento, mais conhecidas como reações de hidratação, que garantem a resistência e durabilidade. Além disso, a água possui o papel de lubrificar as partículas, proporcionando o manuseio do material (MILAGRES, 2019).

Segundo Campos Neto (2015), o consumo de água no concreto aumenta em condições de elevada temperatura, pois a alta temperatura do concreto faz com que haja perda de consistência da massa que é incorretamente compensada pela adição de água. Adicionar água sem adicionar cimento resulta em uma maior relação a/c que conseqüentemente reduz a resistência mecânica do concreto. Muitas vezes a adição de cimento para compensar a adição extra de água pode não ser suficiente para atingir as propriedades esperadas do concreto, pois a adição de mais cimento faz com que haja aumento na temperatura do concreto e na demanda de água.

A relação a/c impacta nos valores finais do calor de hidratação do cimento e, segundo estudos, para menores valores de a/c resulta-se em um aumento do calor de hidratação devido ao aumento do consumo de água por m³ de concreto (ALVES, 2002).

Assim, a água é fundamental para reação de hidratação e trabalhabilidade do concreto. Para garantir a trabalhabilidade muitas vezes a relação a/c é alta, mas isso tem mudado com a utilização de aditivos, que proporcionam uma maior fluidez do concreto sem acréscimo de água.

2.1.1.4 Aditivos

O aditivo é definido como produtos químicos utilizados antes ou durante a mistura da massa de concreto na betoneira, com o objetivo de alterar as

características do concreto tanto no estado fresco quanto no endurecido (HARTMANN et al., 2011).

A (ABNT, 2019) acrescenta que a quantidade utilizada é limitada a 5% da massa cimentícia, sendo consideradas como adições quando o valor ultrapassa os 5%. Atualmente, devido ao avanço tecnológico químico dos aditivos, é utilizado no máximo 1% da massa cimentícia.

Geralmente os aditivos mais utilizados nas usinas de concreto são os plastificantes, que fazem com que a mistura fique mais plástica (fluída) e permitem a diminuição da quantidade de água utilizada na fabricação do concreto, juntamente com os retardadores de pega, que visam prolongar o tempo de transporte, lançamento e adensamento do concreto no estado fresco (OLIVEIRA VALIN JR e CHIQUITO, 2020).

Desse modo, os aditivos preservam e melhoram a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, para a mesma relação água/cimento. Com a redução da água, é possível diminuir a quantidade de cimento e consequentemente, impactar na quantidade de calor gerada nas reações de hidratação (GAMBALE, 2017).

2.1.2 Hidratação do concreto

Segundo Gambale (2017), o endurecimento e ganho de resistência do cimento ocorre através da hidratação dos compostos quando em contato com a água. Este processo de hidratação é basicamente dividido em hidratação dos aluminatos e dos silicatos. Essas reações ocorrem simultaneamente, mas em velocidades diferentes, resultando em compostos resistentes e estáveis (DUARTE, 2018).

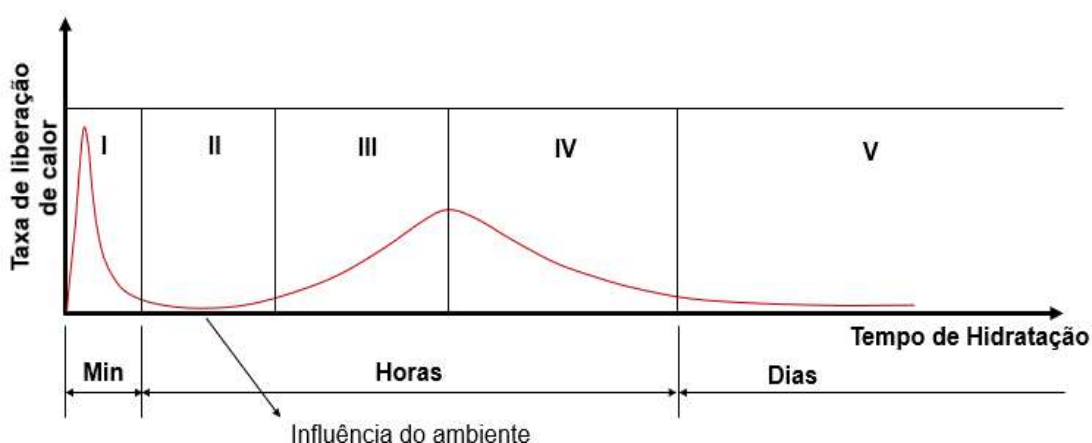
Para Mehta e Monteiro (2014), o cimento possui dois mecanismos de hidratação, sendo a hidratação através da solução, na qual envolve a dissolução de compostos anidros em seus constituintes iônicos, a formação de hidratos na solução e eventual precipitação, formando um sólido e a hidratação no estado sólido, que ocorre diretamente na superfície dos compostos de cimento anidro sem que os compostos entrem em solução.

Uma vez que os compostos do cimento entram em contato com a água, ocorre uma reação exotérmica, ou seja, a energia é liberada na forma de calor para o ambiente, fenômeno conhecido como calor de hidratação, que resulta no aumento da temperatura concreto. Como mencionado anteriormente, em elementos estruturais de menor espessura, o calor é mais facilmente dissipado para o ambiente, porém o mesmo não ocorre em peças volumosas. (DUARTE, 2018).

Azenha (2011) e Aurich (2008) consideram a reação exotérmica como a propriedade mais importante que deve ser considerada durante a hidratação do cimento. Devido ao calor liberado durante o processo de hidratação, o aumento da temperatura no interior de grandes massas de cimento pode levar a fissuras de origem térmicas: enquanto o núcleo do material de cimento ainda está em processo de expansão devido à grande quantidade de calor, a camada mais externa começa a esfriar e retrair, resultando em tensões internas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Ge (2005) e Horta, de Paula e Calixto (2022), o processo de hidratação da pasta de cimento, é representado por 5 estágios, como mostrado na Figura 1 e descritos no Quadro 1:

Figura 1 - Comportamento térmico durante o processo de hidratação



Fonte: Agostinho et al., (2020)

Quadro 1 - Estágios do processo de hidratação do cimento

Estágio	Comportamento
I	Indica uma alta taxa de evolução de calor inicial em um curto intervalo de tempo (15 a 20 minutos), onde ocorre a dissolução de fases anidras e uma rápida precipitação de etringita.
II	Após essa rápida evolução do calor inicial, o período de 2 a 4 horas seguintes são considerados “período dormiente”, onde a evolução de calor é lenta, esta etapa também é chamada de período de indução. Nesta etapa, apesar da taxa de reação ser baixa, a etringita continua em formação a partir dos íons sulfato.
III	No período de 4 a 8 horas, ocorre o início da pega e a temperatura aumenta gradualmente até o pico, onde ocorre a cristalização dos silicatos de cálcio hidratados formados pelo aumento na permeabilidade da camada previamente formada pela etringita.
IV	A pega chega ao final e o endurecimento se inicia. Além disso, ocorre uma desaceleração na taxa de liberação de calor, diminuindo gradualmente a temperatura.
V	Último estágio, onde ocorre uma perda rápida de energia térmica, significa que toda água presente na mistura agora foi substituída pelas formas hidratadas de íons presentes no material.

Fonte: do autor

As reações de hidratação do cimento levam ao aumento de temperatura nos primeiros dias. Quando o pico máximo de temperatura é alcançado, o concreto tende a se estabilizar com a temperatura ambiente, gerando tensões térmicas de tração que resultam na fissuração e, eventualmente, na perda de monoliticidade da estrutura (SOUSA, SILVA e CASTRO, 2014).

Segundo Bauer (2019), há bastante interesse em entender o comportamento do aumento da temperatura resultante, principalmente, nas obras volumosas, a qual leva ao aparecimento de trincas de contração ao fim do resfriamento da massa. Portanto é imprescindível entender o fenômeno de retração e os procedimentos que podem amenizar o mesmo, como a realização da cura do concreto.

2.1.3 Cura do concreto

A cura do concreto é definida como um conjunto de medidas destinadas a evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento, que é responsável pela pega e endurecimento do concreto (BARDELLA, BARBOSA e CAMARINI, 2005). O principal objetivo da cura é manter a superfície do concreto saturada, ou o mais próximo possível desse estado, para que os espaços inicialmente preenchidos com a água da preparação da pasta de cimento, não sofram alteração (MEHTA e MONTEIRO, 2014; FERRARI, 2017).

Uma das demais funções desse procedimento é controlar a temperatura do concreto, pois as reações químicas que ocorrem no concreto liberam calor, e se não controladas podem causar manifestações patológicas na peça, como as fissuras (DINIZ, et al. 2016).

A cura realizada incorretamente gera a redução da resistência e durabilidade do concreto, além de fissuras por retração, devido a perda acentuada da umidade e aumento da temperatura (ISAIA, 2011).

Desse modo, a cura deve ser realizada imediatamente o início de pega do concreto, que depende do tipo do cimento, mas que em geral fica em torno de duas horas e trinta minutos. As reações de hidratação do cimento ocorrem apenas na presença de água, e sem cura ou controle adequado da hidratação do material cimentício, a água pode evaporar ou se perder e o concreto não terá as propriedades físicas e mecânicas desejadas (MARQUES, 2018).

O procedimento de cura envolve a combinação de condições que promovam a hidratação do cimento com o tempo, temperatura e umidade, consideradas logo após o lançamento do concreto nas formas (MEHTA e MONTEIRO, 2014)

Segundo Bauer (2008), quanto mais prolongada e bem executada a cura, conseqüentemente melhor serão as respostas do concreto às ações mecânicas as quais for submetido. O período mínimo de cura visando atender qualidade e economia, é de 7 a 10 dias.

A (ABNT, 2004), acrescenta que, enquanto a estrutura não atingir um endurecimento satisfatório, o concreto deve ser curado e protegido de qualquer dano. Para elementos estruturais como lajes, a norma enfatiza que a cura deve ser realizada até que o concreto atinja sua resistência característica a compressão igual ou superior a 15 MPa.

Bauer (2008) afirma que as temperaturas ideais para uma boa cura variam entre 15° e 35 °C. Neste intervalo, ocorre um aumento de resistência do concreto através da elevação da temperatura, se mantido saturado durante um longo período.

No entanto, a cura do concreto é um procedimento que proporciona um ambiente favorável, mantendo e/ou fornecendo umidade a uma temperatura desejada para promover o desenvolvimento de reações de hidratação. Alguns dos tipos mais comuns de cura empregados na construção civil são as curas úmida, química e térmica (MARQUES, 2018).

A cura úmida, geralmente mais utilizada no canteiro de obras, visa manter a superfície do concreto coberta com água ou completamente imersa para evitar que a água presente no interior do material cimentício evapore (ANDRADE, 2015). De acordo com a diminuição da umidade relativa do ar e o aumento da incidência de ventos, maiores cuidados devem ser tomados em relação a manutenção da umidade da estrutura (SOUZA NETO e ARAÚJO, 2019).

Segundo Yazigi (2017), na prática, os tipos de cura úmida normalmente aplicados, são:

- Realizar a molhagem das fôrmas, no caso de pilares;
- Irrigar periodicamente as superfícies;
- Recobrir a superfície com material (lona plástica, sacarias de estopa ou sacos vazios de cimento, camada de areia de aproximadamente 5 cm) para manter a estrutura sempre úmida;
- Submersão;

A cura química, consiste na aplicação de agentes de cura (base PVA ou parafina) na superfície do concreto, com o intuito de formar um filme sobre a superfície, a fim de evitar a perda de água de amassamento e o surgimento de fissuras

(JUNIOR, BETAZZA e RIBEIRO, 2018). Este é um método utilizado em grandes superfícies, como pisos de concreto, pistas e pátios de aeroportos, bem como superfícies verticais, como paredes de concreto, para manter a peça de concreto o mais saturada possível (SILVA et al., 2020).

A cura térmica surge como uma tecnologia que busca otimizar o processo construtivo, acelerando a reação de hidratação do concreto. Seu principal objetivo é obter uma resistência suficientemente alta para que o concreto seja manuseado em suas primeiras idades. Apresenta vantagens operacionais e econômicas, principalmente para fabricantes de peças pré-moldadas. Assim, pode-se resumir na possibilidade de rápida desforma e manuseio, com a redução do tempo de cura (FILHO 2001).

Os procedimentos de cura térmica podem ser feitos a seco, usando resistência elétrica nas formas metálicas ou peças, mantas para o aquecimento das placas ou via radiação infravermelha (NEVILLE, 2016).

Portanto, a cura deve ser realizada, a fim de impedir que água necessária para a reação de hidratação evapore. Além disso, a saída de água do concreto pode impactar na retração, já que determinado volume de água sai do concreto e se o mesmo ainda não possui resistência suficiente para absorver as tensões geradas por essa saída de água, pode fissurar.

2.1.4 Retração do concreto

O fenômeno da retração do concreto é definido como a diminuição do volume do concreto durante o processo de endurecimento, devido a movimentação de água em seu interior, a evaporação e da retração química, pois o volume de hidratos formados durante a hidratação é menor que o volume combinado de cimento e água para formá-los (RECENA, 2014; GONÇALVEZ, 2021).

Como o concreto no processo de endurecimento ainda não possui resistência para conter essa variação de volume, a consequência dessa retração como um todo são fissuras como as indicadas na figura 2, pois o concreto é impedido de se movimentar, produzindo tensões internas no elemento (LUNA, 2020).

Figura 2 - Fissuras devido a retração do concreto



Fonte: do autor

Milagres (2019) acrescenta que a retração é a redução de volume pela perda de umidade de um elemento de concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido. Esta perda de umidade ou evaporação gera o enfraquecimento do concreto, podendo ocasionar fissuras, deformação interna e externa de flexão.

Segundo Soares (2019) e Vargas (2021), existem inúmeros tipos de retração do concreto, sendo a retração plástica, hidráulica, autógena, térmica e química, descritos nos tópicos a seguir.

- Retração plástica: ocorre com o concreto ainda no estado fresco, através da perda rápida da água (evaporação) utilizada na mistura do aglomerante com os agregados, onde a água começa a ser eliminada por exsudação.
- Retração hidráulica ou por secagem: é um dos mais conhecidos e ocorre no concreto em seu estado endurecido. Quando o concreto está exposto ao ar, acontece a perda de água capilar ou livre ocasionando o surgimento de tensões (SILVA, 2018). Quando a água da superfície do concreto seca devido à evaporação, e a taxa de evaporação desta água é maior do que a taxa de

transporte da água livre para a superfície por exsudação, é formado um sistema de meniscos da água dos poros onde atua a pressão do ar (WITTMANN, 1976).

- Retração autógena: é definida como a redução macroscópica dos materiais cimentícios como consequência da reação de hidratação, onde a água utilizada na reação sai pelos poros capilares do concreto e a partir do momento em que não há mais água suficiente, tensões capilares são geradas e consequentemente há uma redução de volume provocando fissurações (DANTAS; SILVA, 2005 apud NASCIMENTO 2021).
- Retração térmica: ocorre nos primeiros dias, devido ao processo de cura do concreto. Durante o processo de endurecimento há uma liberação de calor que provoca o aumento do volume da pasta de cimento. Como esta geração calor diminui gradualmente, o concreto inicia o processo de resfriamento e, em seguida, ocorre a redução de seu volume (DOMONE, 2010).
- Retração química: ocorre durante a hidratação, devido os produtos ocuparem um volume menor em comparação com os reagentes. O volume absoluto da pasta de cimento reduz, porque o volume de hidratos formados durante a hidratação é menor que o volume combinado de cimento e água para formá-los (GONÇALVEZ, 2021).

A retração do concreto deve ser reduzida para que seus malefícios também sejam. Como não se tem controle sobre as condições climáticas deve-se saber trabalhar possibilidades para a minimização da retração, por exemplo alterar a geometria da peça (espaçamento das juntas, por exemplo) e o traço do concreto, alterar o horário da concretagem para períodos com temperaturas menores, com menos vento e incidência solar. Além disso, deve ser associado um adequado procedimento de cura para evitar a perda rápida de água da mistura (MILAGRES, 2019 e SARAIVA, 2018).

2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO CONCRETO

Os efeitos da temperatura no concreto podem se originar do exterior ou do interior do concreto. Externamente, as condições climáticas como calor e frio, baixa

umidade relativa do ar e ação do vento, são fatores que criam ou agravam problemas no concreto. Do ponto de vista interno, quando o concreto ainda no estado fresco, o calor liberado na reação de hidratação do cimento com a água é uma das principais fontes de variação de volume na estrutura, desde o estágio inicial de cura até em idades mais avançadas quando ocorre o equilíbrio térmico com o ambiente (SANTOS, BITTENCOURT E GRAÇA, 2011).

A temperatura máxima adquirida pelo concreto é resultado da temperatura na qual ele é lançado, que depende das temperaturas individuais de seus componentes, da temperatura do ambiente, do aumento da temperatura interna devido ao calor liberado pela reação de hidratação do cimento, sua capacidade de transferir calor e das dimensões e geometria do elemento estrutural (ANDRADE, 2017).

Diante disso, é necessário o entendimento da condutividade térmica, gradiente de temperatura e dos impactos que as condições climáticas geram no concreto.

2.2.1 Condutividade térmica do concreto

A condutividade térmica pode ser entendida como a capacidade do concreto conduzir calor, definida como a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura. De acordo com a segunda lei da termodinâmica: o calor sempre flui na direção de menor temperatura, ou seja do interior do concreto para as extremidades (JUNCKES, 2015). Coelho (2012) afirma que, quanto maior for a condutividade térmica, maior será a temperatura do concreto.

O calor é transferido por condução do núcleo para a superfície da peça e daí é dissipado para o ambiente. Devido a esta transferência de calor, surgem gradientes de temperatura, que introduzem tensões de tração e compressão no concreto, que podem levar ao surgimento de fissuras (ARAÚJO, 2013).

2.2.2 Gradiente térmico

O gradiente de temperatura é definido como a diferença entre a temperatura interna e superficial da massa de concreto. Esse gradiente faz com que o concreto se deforme, criando fissuras. Quanto maior o gradiente de temperatura, maior a

probabilidade do aparecimento de trincas e maior a abertura dessas trincas devido ao aumento das tensões (COELHO, 2012).

Segundo Neville (2016), para evitar a fissuração do concreto, é necessário reduzir a diferença de temperatura entre o centro da peça e a superfície, que perde o calor liberado pela hidratação do cimento a uma taxa muito elevada. Sendo que, gradientes de temperatura superiores a 20°C podem levar à fissuração do concreto (FITZGIBBON, 1977 apud GRAEFF, 2017)

Em seus estudos Coelho (2012), concluiu que as condições ambientais influenciam na temperatura máxima, sendo que, quanto mais próxima a temperatura de lançamento do concreto da temperatura ambiente, menor será o gradiente térmico e, conseqüentemente, menor os riscos de fissuração.

2.2.3 Condições climáticas

Segundo Terzian (2007), durante a execução de uma estrutura, é muito importante o conhecimento das condições climáticas, pois são estas condições que influenciam no processo de dosagem e cura do concreto, além disso, impactam no grau de evaporação da água existente no interior massa, estando relacionado diretamente com o surgimento de fissuras por retração plástica.

Em dias muito quentes, a altas temperaturas do ambiente, geralmente associadas à uma alta incidência solar, resultam em uma maior demanda de água pelo concreto e aumentam a temperatura do mesmo em seu estado fresco. Conseqüentemente o concreto perde abatimento mais rápido e provoca um aumento na velocidade da reação de hidratação, resultando em uma pega acelerada do concreto e menor resistência a longo prazo. Além disso, o aumento do grau de evaporação da água, pode levar ao surgimento de fissuras por retração plástica, reduz a efetividade de hidratação dos grãos e o resfriamento subsequente do concreto endurecido pode gerar tensão de tração (KRAAI 1985; NEVILLE, 2016).

Em locais de clima predominantemente frio, o processo da reação de hidratação é mais lento, fazendo com que o concreto atinja resistências iniciais menores e finais maiores. Além do retardamento, pode-se ocorrer a paralisação do

início de pega do cimento, ou seja, o concreto não reage e fica no estado fresco e consequentemente haverá impacto no tempo de desforma da peça (RIBEIRO JR, 2015).

A umidade relativa do ar também influencia na perda de água do concreto fresco, sendo que, quanto menor a umidade do ar, mais água é evaporada do concreto (RECENA e PEREIRA, 2011). Em seus estudos Ferrari (2017) concluiu que, para que o concreto não sofra perda de hidratação, gerando alterações na água presente na mistura e na resistência final, a umidade relativa do ambiente deve ser no mínimo 80%. Se a umidade relativa do ar for de 80%, não ocorrerá perda de água do concreto para o ambiente, não sendo necessário a realização de cura. No entanto, esta afirmação só é válida se não houver intervenção de nenhum outro fator como vento, diferença de temperatura e incidência solar.

O vento também é uma das variáveis que afeta a taxa de perda de água do concreto no estado fresco, sendo que quanto maior a velocidade do vento, maior será a evaporação da água do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014; BESERRA, 2005).

Em seus estudos, Terzian (2007) enfatiza sobre a importância de monitorar estas condições climáticas, medindo-se a variação de temperatura do local, velocidade e direção do vento, umidade relativa do ar e a temperatura do concreto em seu estado fresco.

Apesar de já estar em desuso cientificamente devido aos critérios adotados quanto a evaporação da água, a ACI sinaliza através de um ábaco sobre os impactos dos fatores climáticos no grau de evaporação da água do concreto, que influenciam de forma direta se uma superfície irá evaporar mais ou menos. Sendo eles: velocidade do vento, incidência de radiação solar, temperatura do ambiente, temperatura da superfície do concreto e umidade relativa do ar (ANDRADE, 2008).

2.3 PROCESSO FÍSICO DE EVAPORAÇÃO DA ÁGUA

A evaporação é o processo de conversão de um líquido em vapor ou gás. Isso ocorre quando a energia térmica é absorvida pelo líquido, por exemplo, devido à incidência de radiação solar ou quando a pressão de vapor acima da superfície do

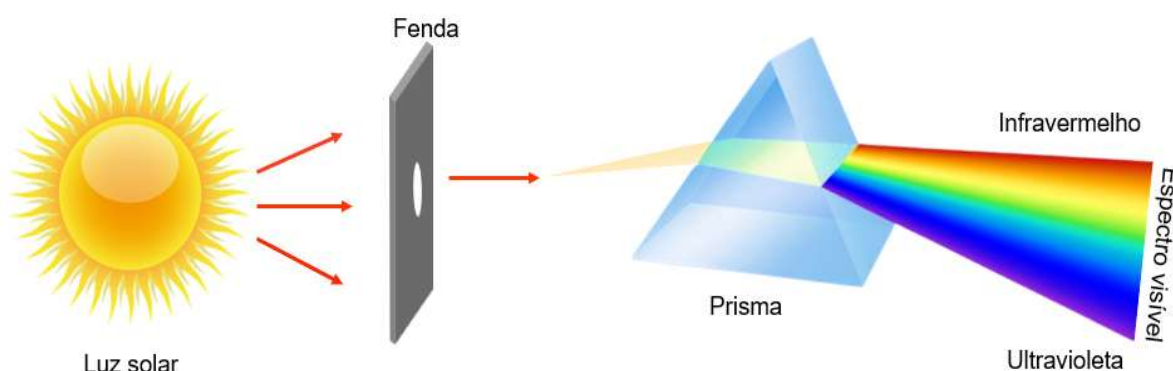
líquido é menor que a pressão de vapor do próprio líquido, fazendo com que as moléculas de água escapem do líquido como vapor (ANDRADE, 2008).

Muitos fatores interferem no grau de evaporação, principalmente a temperatura da superfície, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento. A variação da intensidade de energia solar recebida na superfície provoca variação da temperatura superficial, modificando a energia cinética das moléculas, que consequentemente aumenta a taxa de evaporação (PIMENTA, 2012).

2.4 TERMOGRAFIA

A termografia foi descoberta em 1800 pelo astrônomo inglês William Herschel (1738-1822) quando procurava quais cores no espectro eram responsáveis pelo aquecimento dos objetos. Em sua pesquisa utilizou um prisma para decompor a luz solar e pôde concluir que, à medida que a cor mudava de violeta para vermelho, a temperatura aumentava, mas as temperaturas maiores indicavam além do vermelho, de forma a ultrapassar o espectro visível como ilustrado na figura 3 (ALMEIDA, 2017).

Figura 3 - Representação do ensaio de William Herschel



Fonte: do autor

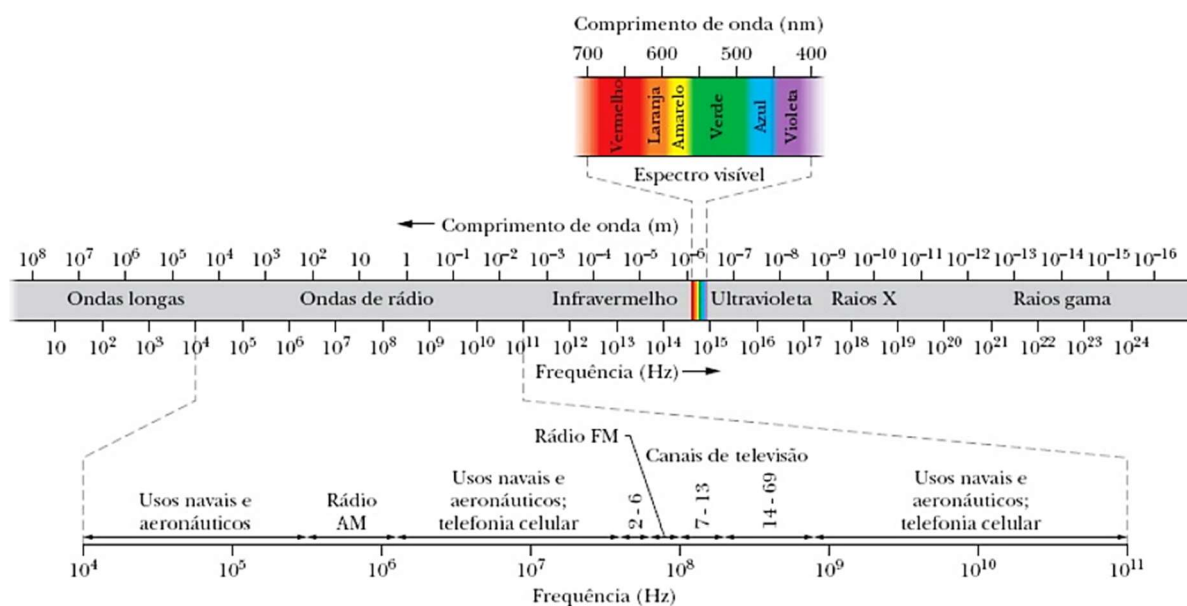
A termografia infravermelha é definida como uma técnica de ensaio não destrutiva, na qual as imagens térmicas, conhecidas como termogramas, são capturadas por uma câmera termográfica. Em geral, a radiação emitida ou refletida por um determinado objeto é convertida em um gradiente de temperaturas superficiais

do mesmo objeto. Assim, é possível ver além da capacidade natural do olho humano, sendo assim uma ferramenta amplamente aplicável em diferentes campos da ciência (CERVEIRA, 2020).

Essa técnica é baseada no princípio de que cada objeto é composto por moléculas que emitem radiação devido à agitação, que pode ser medida por câmeras termográficas. Esta radiação é capturada e convertida de comprimentos de onda infravermelhos para àqueles visíveis ao olho humano (CUNHA, 2016).

O espectro eletromagnético contém uma ampla gama de comprimentos de onda. A olho nu é possível observar ondas entre 0,35 e 0,75 μm , como demonstrado na Figura 44, com a termografia é possível detectar radiações no espectro infravermelho entre 0,9 e 14 μm (BIAGIOTTI, 2021).

Figura 4 - Espectro eletromagnético

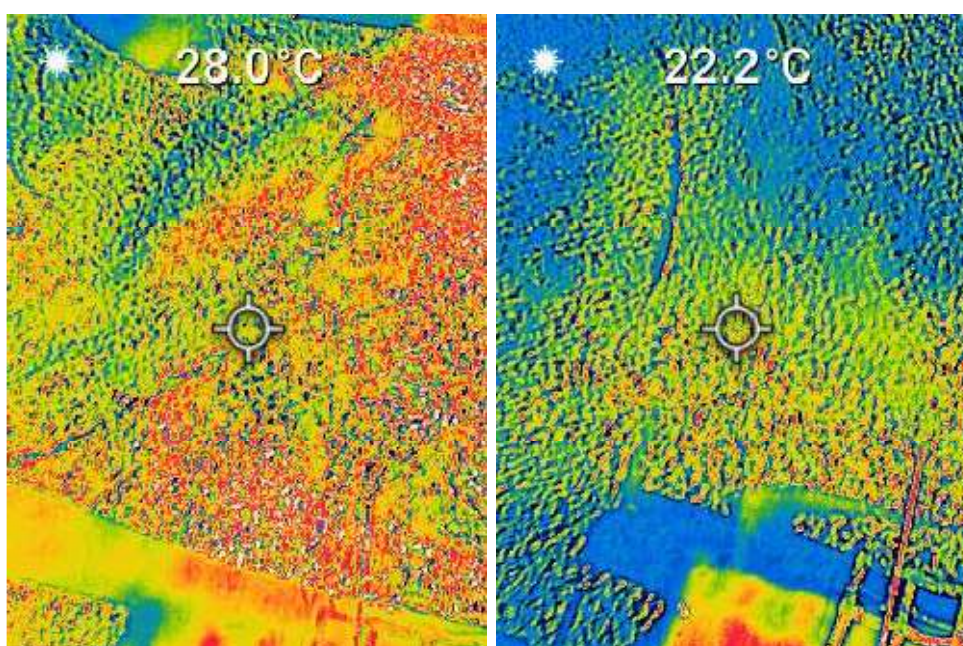


Resnick; Halliday; Walker (2016)

Os detectores infravermelhos identificam a radiação e a convertem em sinais elétricos, que são responsáveis por gerar imagens térmicas coloridas que representam a distribuição de temperatura na superfície do corpo, sendo cada cor correspondente a uma determinada faixa de temperatura (SILVA, 2012).

Os sistemas de imagens térmicas infravermelhas capturam a radiação térmica expressa no espectro eletromagnético pelo fato de todos os corpos estarem a uma temperatura acima do zero absoluto emitindo radiação. As imagens térmicas, também chamadas de termogramas, são apresentadas em escalas policromáticas (cores) ou monocromáticas (cinza). No termograma, são indicadas as temperaturas visualizadas e a distribuição da temperatura superficial do objeto, em tempo real, conforme observável na Figura 5 (SILVA et al., 2021).

Figura 5 - Imagens registradas em uma laje que estava sendo concretada



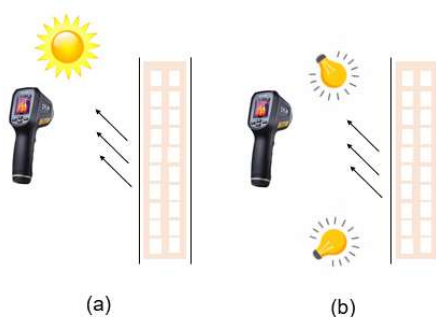
Fonte: do autor

A avaliação das imagens obtidas pode ser realizada através de análises qualitativas e quantitativas. Na análise qualitativa, o termograma é interpretado visualmente e depende do conhecimento do analista sobre o comportamento do objeto alvo, onde a superfície integrada é comparada com uma superfície que apresenta algumas anomalias. A análise quantitativa, o foco é dado na medição da temperatura, levando em consideração os parâmetros que devem ser inseridos para garantia da precisão da medição (ANDRADE et al., 2019).

Ademais, para a realização do ensaio termográfico, existem dois modos de excitação térmica do corpo, a termografia passiva ilustrada na figura 6 (a), que basicamente abrange situações em que o material contém armazenamento interno de

energia térmica, ou é estimulado por fontes naturais de calor, e a termografia ativa demonstrada na figura 6 (b) que envolve o aquecimento artificial dos materiais (MILANEZ, 2017).

Figura 6 - (a) Termografia passiva (b) termografia ativa



Fonte: Cortizo (2007), adaptado.

Em estruturas de concreto, esse ensaio possibilita estimar a temperatura superficial de uma determinada região da estrutura. Essa temperatura é dependente de alguns fatores e princípios, como a transferência de calor, emissividade, condições ambientais, entre outros (MILANEZ, 2017).

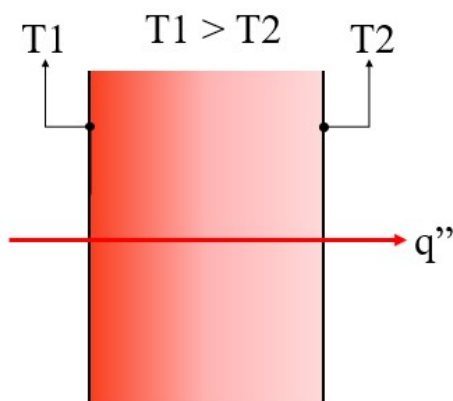
2.4.1 Princípios fundamentais da termografia infravermelha

A termografia infravermelha analisa a distribuição de calor e mede a temperatura da superfície de um objeto por meio da radiação infravermelha. Portanto, para melhor compreendê-la, é necessário introduzir detalhadamente os conceitos relacionados à transferência de calor (CALDEIRA, 2016).

Silva (2019) afirma que a transferência de calor sempre ocorre quando há diferença de temperatura em um sistema, sendo que o calor flui do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. Segundo Cerveira (2020) e Marcelino (2020), esse fenômeno ocorre em três formas: condução, radiação e convecção.

A condução ocorre pelo contato entre superfícies em diferentes temperaturas, onde a energia é transferida da maior temperatura para a menor temperatura, sem trocas radiativas ou convectivas conforme observado na Figura 77.

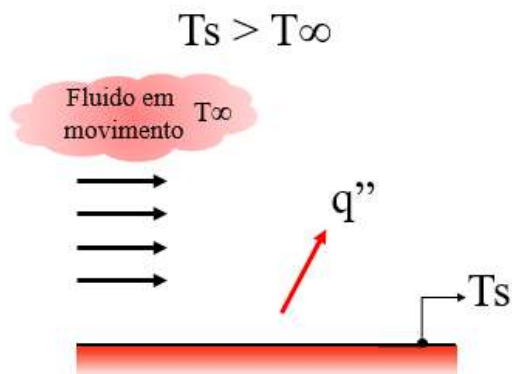
Figura 7 - Transferência de calor por condução



Fonte: adaptado de DeWitt et al., (2011)

A radiação ocorre em qualquer objeto com temperatura acima do zero absoluto. Esta liberação de energia é devido à mudança na configuração eletrônica dos átomos e moléculas que compõem cada material, sendo a energia transmitida na forma de ondas eletromagnéticas, que podem ocorrer no vácuo ilustrado na Figura 88.

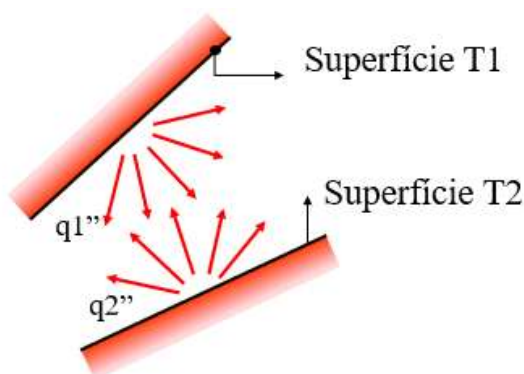
Figura 8 - Transferência de calor por radiação



Fonte: Adaptado de DeWitt et al., (2011)

A convecção ocorre em líquidos e gases, ou entre sólidos e líquidos ou gases confinantes movendo-se em diferentes temperaturas. A transferência é feita por correntes de convecção circulares formadas devido a diferenças de densidade entre fluidos na medida em que a densidade muda de acordo com a temperatura, como demonstrado na figura 9.

Figura 9 - Transferência de calor por convecção



Fonte: adaptado de DeWitt et al., (2011)

Além da transferência de calor tem-se a emissividade, um termo que se refere à capacidade de qualquer objeto emitir radiação eletromagnética em comparação a um corpo negro de mesma temperatura (GARCIA, 2014). Está relacionado aos seguintes fatores: temperatura, ângulo de emissão e comprimento de onda. Assim como as características das superfícies dos materiais, como geometria e composição química (MILANEZ, 2017).

Um corpo negro perfeito possui valor de emissividade igual a 1 e é considerado um emissor perfeito, porém, para outras superfícies, o valor é menor que 1. No caso do concreto, a emissividade é relativamente alta, entre 0,9 e 1,0 (WASHER, FENWICK e BOLLENI, 2010).

Desta forma, a grande maioria dos objetos não são corpos negros perfeitos nem corpos cinzas perfeitos, porque a emissividade varia com o comprimento de onda. Como as câmeras termográficas funcionam apenas dentro de um comprimento espectral limitado, o objeto de análise pode ser visto como um corpo cinza com emissividade constante (FLIR, 2022).

Como já citado anteriormente, a emissividade depende de alguns fatores. Sobre o efeito da temperatura, para que não haja alterações nas medições, a temperatura ambiente deve ser a mais constante possível. Em relação à influência do tipo de superfície do corpo, por norma, em um corpo de superfície mais áspera ou rugosa, sua emissividade será maior do que em uma superfície lisa, polida, brilhante ou refletiva. A geometria do corpo também é importante. Por um lado, as formas

convexas resultam em valores de emissividade mais baixos, enquanto formas côncavas possuem valores mais altos (CERVEIRA, 2020).

Desse modo, a emissividade é um parâmetro que afeta os resultados obtidos pela termografia infravermelha, porém, na análise qualitativa, o valor da emissividade não é muito importante, pois analisa apenas a diferença de temperatura entre as áreas analisadas (BARREIRA e FREITAS, 2007).

2.4.2 Câmera infravermelha

Existem diversos sistemas de medição de temperatura, sendo o mais comum as câmeras termográficas, que captam a energia infravermelha emitida pelo objeto observado e convertem essa energia em sinal eletrônico, através de uma lente que concentra toda a energia captada no detector infravermelho. Este sinal é processado e exibido em um display, ou monitor de vídeo, na forma de uma imagem térmica (termogramas), onde são calculadas as temperaturas de cada pixel (CUNHA, 2016).

A relação entre cor e temperatura é dada pelos parâmetros de cores quentes e frias, ou seja, na escala de cores, sendo que do amarelo ao vermelho representam cores quentes e do verde ao roxo representam cores frias. Desta forma, é possível caracterizar as cores apresentadas na imagem térmica (SARMENTO, 2019).

A câmera infravermelha possui dois tipos de sistema de detecção, sendo o sistema de detecção por varredura (*scanning system*), que possibilita realizar uma varredura de uma área através de um conjunto eletromecânico de espelhos e/ou prismas rotativos ou o sistema fixo de detecção (*staring system*), composto por detectores posicionados em forma de uma matriz bidimensional que capta diretamente a radiação incidente (CALDEIRA, 2016).

2.4.3 Fatores que influenciam na captação de imagens infravermelhas

Geralmente os ensaios que se utilizam da termografia são realizados em locais abertos. Portanto, a obtenção de resultados confiáveis depende do conhecimento das influências externas, impostas em todas as etapas do procedimento realizado. Esses efeitos podem estar relacionados às qualificações do inspetor, tipos de equipamentos

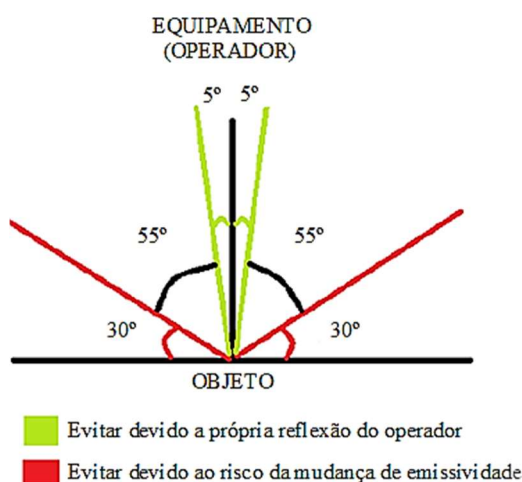
utilizados, características da superfície em estudo e condições do meio em que está sendo realizado a inspeção (MILANEZ, 2017).

Em relação ao termografista, para que as imagens obtidas possuam uma maior precisão é necessário que o mesmo seja qualificado, deve ter aptidão visual, natural ou corrigida, e ainda conhecer claramente as características e manuseio da câmera, entender as propriedades do objeto que está sendo examinado e ter conhecimento sobre a transferência de calor e teoria da radiação térmica e infravermelha (CALDEIRA, 2016).

Quanto as leituras de temperatura medidas pelas câmeras térmicas, as mesmas dependem da emissividade, pois não medem a temperatura diretamente, mas sim a radiação emitida. Portanto, as condições da superfície afetam a emissividade, o que significa a capacidade de uma superfície emitir mais ou menos radiação (CERVEIRA, 2020).

Em relação ao posicionamento da câmera, de acordo com a (ABNT, 2013), o ângulo entre a câmera e o ponto a ser inspecionado deve ser o mais perpendicular possível para evitar a redução da emissividade devido a ângulos de visão insuficientes (superiores a 60°). Viégas (2015) acrescenta que não se deve ficar diretamente em frente ao alvo para evitar reflexões de calor do termógrafo, portanto é recomendável o posicionamento em um ângulo de aproximadamente 5° , em relação à horizontal do objeto a ser analisado termicamente, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Ângulo de posicionamento da câmera



Fonte: Viégas (2015), adaptado

Outro ponto que deve ser levado em consideração é a distância entre o equipamento e o objeto. A distância entre a câmera e o objeto, influencia na resolução dos termogramas obtidos, quanto maior a distância maior a área de superfície a ser analisada, com perda de detalhes. Em superfícies menores há mais pixels disponíveis sobre uma área específica. Além disso, a distância também influencia na atenuação atmosférica que pode ser desprezada para distâncias de medição inferiores a 10 m (MARCELINO, 2020).

Outro fator importante é a atmosfera existente entre a fonte e o receptor que pode causar interferência na medição. Além disso, gradientes térmicos e turbulência podem alterar o índice de refração do ar, resultando em redução da qualidade da imagem. No entanto, a atenuação atmosférica é uma das maiores causas de problemas, pois gera erros sistemáticos que são função da faixa espectral utilizada, da distância de observação e das condições meteorológicas. Portanto, as medições feitas em distâncias superiores a 10 metros devem ser corrigidas (BARREIRA, 2004).

Quanto a refletividade, muitas vezes pode ser um problema, porque um objeto real além de emitir e absorver radiação, também reflete radiação de objetos próximos. Como resultado, as imagens obtidas através do ensaio termográfico sofrem influências de radiações próximas, o que pode levar interpretações errôneas dos resultados (SANTOS, 2014).

Em relação a radiação solar, Craveiro (2008) afirma que a mesma pode interferir na obtenção de imagem térmicas em duas maneiras, podendo ser através do carregamento por energia solar, fazendo com que a temperatura dos objetos aumente, e através da reflexão da luz solar, que leva a medições equivocadas da radiação infravermelha emitida por objetos.

Quanto a alta umidade do ar, a mesma afeta a detecção de imagens térmicas, através do resfriamento dos componentes, dificultando a detecção, análise e diagnóstico dos defeitos e além disso, diminui a radiação infravermelha, emitida pelos componentes analisados, que chega ao detector da câmera térmica (CRAVEIRO, 2008).

Além dos fatores mencionados anteriormente, durante uma inspeção termográfica, a superfície que está sendo analisada, pode perder calor devido aos efeitos do vento no ambiente até que eles cheguem a um mesmo valor de temperatura, resultando em resfriamento convectivo. Isso faz com que a diferença de temperatura diminua entre a superfície do objeto a ser medido e o ambiente, resultando em erros de medição da câmera térmica (CALDEIRA, 2016).

2.4.4 Termografia na construção civil

Segundo Sakamoto (2018), a construção civil utiliza técnicas não destrutivas para caracterizar as manifestações patológicas dos mais diversos elementos, materiais e partes de uma edificação. Nesse sentido, a termografia é uma ferramenta que pode ser utilizada como diagnóstico, e como a maioria dos problemas com materiais e componentes estão relacionados a mudanças de temperatura, seu uso é um importante aliado no auxílio e compreensão dos fenômenos que dão origem às anomalias.

Este mesmo autor mencionado anteriormente utilizou a termografia infravermelha para detectar através de variações na temperatura superficial de corpos de prova, eventuais destacamentos e falhas de aderência do revestimento argamassado.

Em um estudo realizado por Pereira (2017) na análise do tempo de pega do cimento, a termografia possibilitou a obtenção de filmagens da pasta de cimento para diferentes relações água/cimento, a fim de analisar o tempo de início e fim de pega do cimento CPV-ARI. Este mesmo ensaio foi realizado também utilizando um calorímetro e aparelho de Vicat como forma de comparar os resultados. No estudo citado a termografia se mostrou inviável, devido a sua propriedade de identificar apenas a temperatura superficial.

Azenha, Faria e Figueiras (2011) atestaram a viabilidade do uso para o monitoramento das temperaturas da idade precoce do concreto. Durante a hidratação do cimento, a termografia permitiu obter imagens instantâneas das temperaturas superficiais que validassem os resultados obtidos do código do elemento finito

implementado para previsão do desenvolvimento da temperatura do concreto nas primeiras idades, responsável pela influência do calor de hidratação do cimento.

Na análise da profundidade de fissuras em concreto, a termografia utilizada como ensaio não destrutivo se mostrou eficaz possibilitando a análise de grandes áreas em pequenos intervalos de tempo e longas distâncias. Além disso, o método foi eficaz para concluir que fissuras apresentam temperaturas mais baixas durante o dia e superiores durante a noite em relação a outras superfícies do concreto sem defeitos. Também foi possível observar que quanto mais profunda a fissura, mais fria se torna em relação às fissuras superficiais (ROCHA et al., 2017).

Pazhoohesh et al., (2021), realizou o monitoramento do andamento de uma construção utilizando uma câmera termográfica, a fim garantir que o projeto de construção esteja consistente com o cronograma e identificar quaisquer desvios na geometria. Diante das mudanças significativas de temperatura durante a reação de hidratação do concreto, a câmera térmica foi utilizada para tirar fotos dos componentes do concreto (vigas de concreto pré-moldadas) para investigar a viabilidade de usar o método proposto, além disso, foram realizados estudos de caso de estruturas em construção. Os resultados obtidos mostraram que para identificar e monitorar o progresso dos elementos construídos, as imagens baseadas em infravermelho podem fornecer resultados mais precisos do que as imagens tradicionais, porém, alguns dos elementos existentes não foram verificados de forma ambígua com os dados coletados.

Shen et al., (2020), realizou uma pesquisa com o objetivo de avaliar a viabilidade e o desempenho da aplicação da termografia infravermelha montada em drones e radar de penetração no solo para detectar vazios na superfície gerados por problemas de consolidação em pavimentos de concreto. A motivação para este estudo foi identificar defeitos de consolidação nas fases iniciais da pega do concreto, a fim de evitar tais problemas em grandes áreas de pavimento, que são caras e demoradas para reparar. Foram realizados ensaios de laboratório e de campo com ambos os métodos e amostras de testemunhas foram utilizadas para validar os resultados. Mesmo apresentando algumas limitações, os resultados dos testes apresentaram um bom desempenho. No entanto, as tecnologias podem ser usadas em conjunto ou

separadas no campo como ferramentas de controle de qualidade eficazes e econômicas na construção de pavimentos de concreto.

A termografia infravermelha foi aplicada em um estudo comparativo de sistemas de medições de temperatura superficial de pavimentos urbanos. Nesta pesquisa foi realizada uma análise da temperatura superficial de pavimentos de concreto utilizando o sistema de termopares correlacionados com os dados de imagens térmicas, identificando possíveis erros, imprecisões ou limitações dos diferentes métodos. Para esta aplicação, as condições climáticas do ambiente e os dados da variação de temperatura da superfície do pavimento de concreto foram monitorados usando os demais métodos. Com a análise dos resultados concluiu-se que os termopares são mais eficientes e precisos para medição de pontos específicos e as imagens termográficas são uma excelente opção para avaliação de áreas mais amplas, embora apresente menos precisão (KOWALSKI e MASIERO, 2020)

3 METODOLOGIA

3.1 ESTRUTURA DA PESQUISA

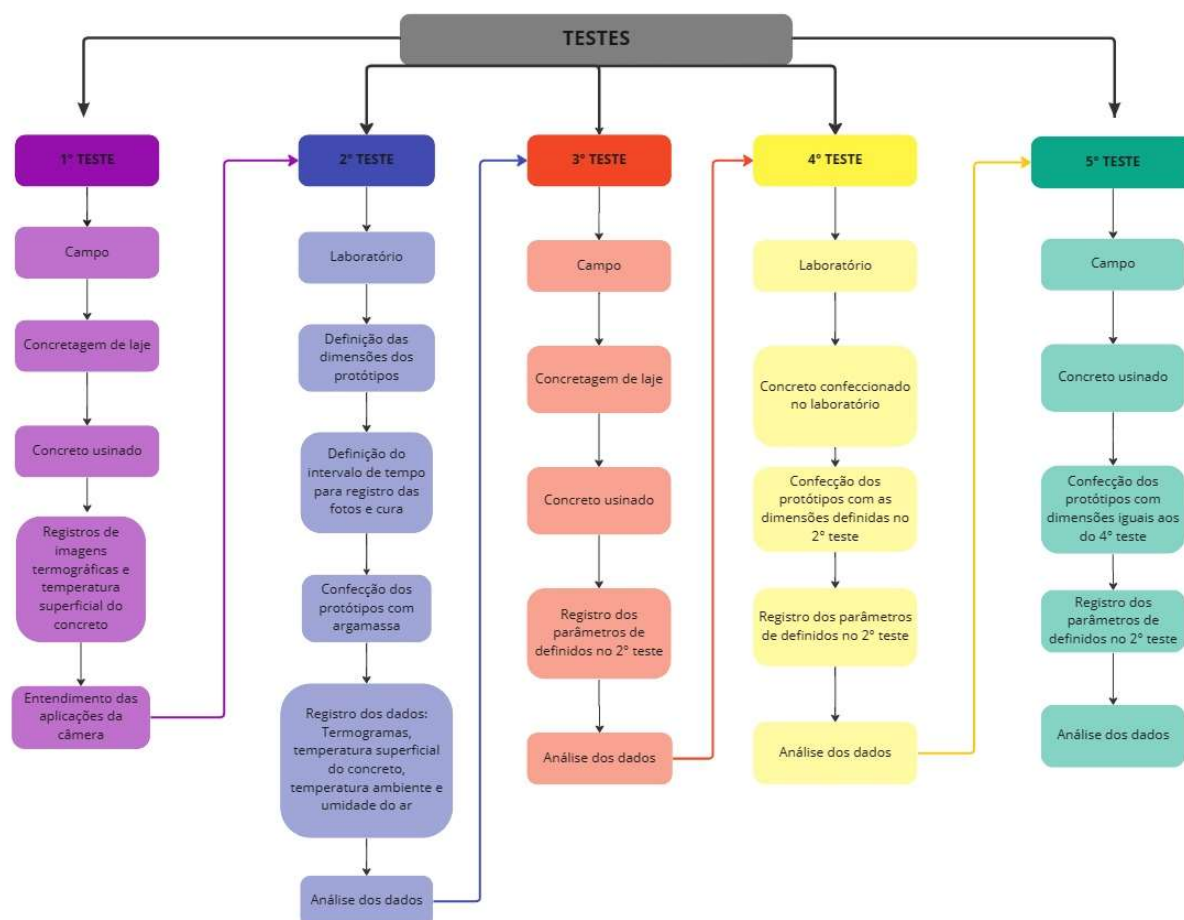
Neste trabalho foi realizado um estudo sobre a variação da temperatura superficial do concreto durante o processo de endurecimento, com o auxílio de uma câmera termográfica, visando entender suas aplicabilidades, limitações e sensibilidade para este fim. A pesquisa recorre à um método experimental e revisão bibliográfica.

O início deste estudo se deu a partir de um levantamento bibliográfico em busca dos conceitos referentes ao concreto, seus componentes, propriedades e comportamentos, bem como a termografia como ensaio não destrutivo aplicado na construção civil dando ênfase na utilização desta tecnologia para análise da temperatura superficial do concreto fresco, para possibilidades de uso para controle tecnológico, seja para controle de cura, ou monitoramento para possível possibilidade de fissuração, dentre outras.

Os testes foram configurados para coleta de dados no laboratório do Instituto Federal de Goiás – IFG situado na cidade de Formosa-GO e no canteiro de obras de um condomínio também em Formosa.

A motivação deste estudo é investigar o comportamento da temperatura superficial do concreto através da tecnologia termográfica, bem como analisar a aplicação do método. Diante disso, cinco experimentos foram projetados e realizados conforme descritos no fluxograma da figura 11. Os experimentos foram aplicados em uma laje *in situ* e em protótipos de lajes.

Figura 11 – Fluxograma dos testes realizados



3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

A câmera termográfica Flir TG165-X ilustrada na figura 12, ajuda a visualizar pontos quentes e frios que podem indicar falhas elétricas, falhas mecânicas ou vazamentos de ar e água. Esta ferramenta de imagem e medição sem contato direto, exibe anomalias de temperatura na tela, permitindo a identificação da origem dos problemas mais rapidamente do que com um termômetro infravermelho de ponto único (FLIR, 2023).

Esta câmera possui capacidade de armazenamento de 50.000 imagens, faixa de temperatura do objeto de -25°C a 300°C, Laser classe 1 que indica o tamanho da área de medição campo de visão (FOV) de 51° x 66°, precisão de 50 °C a 100 °C, conforme $\pm 1,5$ °C, 0 °C a 50 °C e 100 °C a 300 °C, conforme $\pm 2,5$ °C, -25 °C a 0 °C,

conforme $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Além disso, a sensibilidade Térmica/NETD é $< 70\text{ mK}$, resolução é de 2 MP (1600 $\times$ 1200 pixels) e resolução de IV de 80 $\times$ 60 pixels (FLIR, 2022).

Figura 12 - Câmera termográfica FLIR TG165 – X



Fonte: do autor.

Para obtenção da temperatura interna do concreto foi utilizado um termômetro digital tipo espeto, ilustrado na figura 13 abaixo. Este termômetro possui faixa de medição de 45°C a $+230^{\circ}\text{C}$, resolução: $0,1^{\circ}\text{C}$, exatidão de -20°C à $+80^{\circ}\text{C}$: $\pm 1^{\circ}\text{C}$; de -45°C à $-19,9^{\circ}\text{C}$ e de $80,1^{\circ}\text{C}$ à $+200^{\circ}\text{C}$: $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Além disso, a exatidão no restante da escala é de $\pm 4\%$ da leitura, com haste de 127mm, alimentação LR 44x1,5V e vida útil de 6.000 horas.

Figura 13 - Termômetro tipo espeto



Fonte: do autor

A temperatura ambiente e umidade relativa do ar foram registradas através de um termo-higrômetro ilustrado na figura 14, com faixa de temperatura de 10 ~ +50 ° C (14 ~ 122 ° F); Faixa de umidade: 10% ~ 99% RH; resolução da temperatura: 0,1 ° C (0,1 ° F); resolução de Umidade: 1% RH; precisão da temperatura: ± 1 ° C (1,8 ° F); precisão umidade: $\pm 5\%$ UR (40% ~ 80%) e dimensões: 9.5 x 10.1 x 2.1 cm.

Figura 14 – Termo-higrômetro



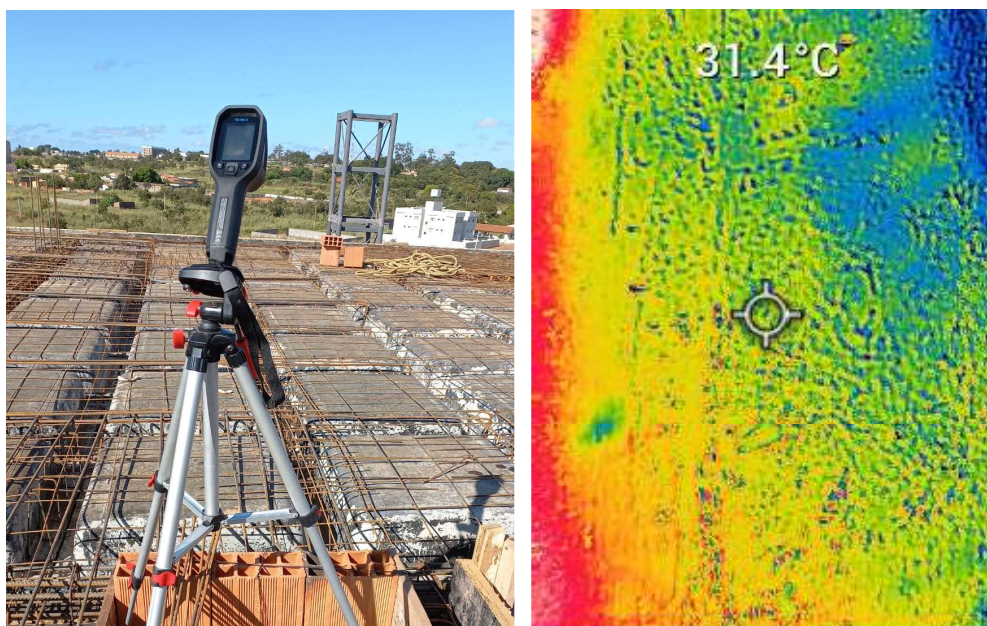
Fonte: do autor

3.3 EXECUÇÃO DOS TESTES

3.3.1 1º teste - Avaliação do funcionamento da câmera

Para entender o funcionamento e limitações da câmera térmica, foi realizado um teste no dia 26 de abril de 2022, durante a concretagem de uma laje nervurada de 26 cm de espessura, com 90 m³ de concreto usinado. Foi escolhido um ponto da laje de fácil acesso para instalação do tripé com a câmera térmica, como ilustrado na figura 15(a), que possibilitou a obtenção de medida de temperatura e imagem termográfica como representada na figura 15(b).

Figura 15 – (a) Câmera térmica posicionada na laje (b) termograma obtido



(a)

Fonte: do autor

(b)

Esse foi o primeiro teste, a fim de verificar a sensibilidade do equipamento. O mesmo apresentou leitura de temperatura e imagem com variação da coloração, como mostrou a figura 15 (b). As imagens dessa coleta foram levadas para discussão e decidiu-se por executar um próximo teste em laboratório.

3.3.2 2º teste – Protótipos de argamassa

Com o intuito de avaliar a interferência dos fatores climáticos e geométricos no processo de endurecimento de materiais cimentícios, foram avaliados a temperatura superficial, interna, ambiente e umidade relativa do ar.

Este ensaio realizado no dia 22 de setembro de 2022, no laboratório do Instituto Federal de Goiás, no período das 16h30 às 22h, consistiu na fabricação de protótipos utilizando duas formas de argamassa com 3 repartições de 4 x 4 x 16 cm cada como ilustrado na figura 16. A produção da argamassa de traço 1:2 (1 kg de cimento do tipo CP-IV e 2 kg de areia) + 500 g de água teve início às 16h30 e o término da moldagem dos protótipos às 16h45. Foi escolhido esse traço, considerado rico, para potencializar a reação de hidratação e verificar seu impacto no ensaio.

Figura 16 - Protótipos em formas de argamassa



Fonte: do autor

A captura das imagens térmicas deu início às 17h seguindo um intervalo de tempo de 30 em 30 minutos para o registro das imagens. Além das imagens termográficas, a temperatura ambiente, umidade do ar e a temperatura interna da argamassa também foram registrados por meio de um termo-higrômetro e um termômetro digital tipo espeto respectivamente, no mesmo instante que as imagens térmicas foram capturadas, como ilustrado na figura 17 abaixo.

Figura 17 - Posicionamento dos equipamentos



Fonte: do autor

Com essa verificação e acompanhamento fatores climáticos, de temperatura ambiente e umidade relativa, e por ser em ambiente fechado onde se minimizam a incidência de vento, foram obtidos os dados de leitura e, na sequência, foi novamente levado para campo para entender o comportamento.

3.3.3 3º teste - Concretagem de laje

Com o objetivo de avaliar a interferência das condições climáticas no processo de endurecimento do concreto em uma situação real, foi realizado no dia 30 de setembro de 2022, no canteiro de obras de um condomínio, a avaliação das temperaturas (superficial, interna e ambiente) e umidade relativa do ar, durante a concretagem de uma laje de 16 cm de espessura, como mostrado na figura 18. A laje foi concretada com concreto usinado de Fck 30, slump 16 ± 2 e brita mista.

Figura 18 - Concretagem de laje maciça



Fonte: do autor

Foi escolhido um ponto da laje de fácil acesso que possibilitou a instalação do tripé com a câmera térmica e o termo-higrômetro como ilustrados na figura 19(a). Próximo ao ponto em que o laser da câmera estava direcionado, foi fixado o termômetro para o acompanhamento da temperatura interna do concreto como mostrado na figura 18(b) a seguir.

Figura 19 - (a) posicionamento da câmera térmica e higrômetro (b) Posição do termômetro



(a)

Fonte: do autor

(b)

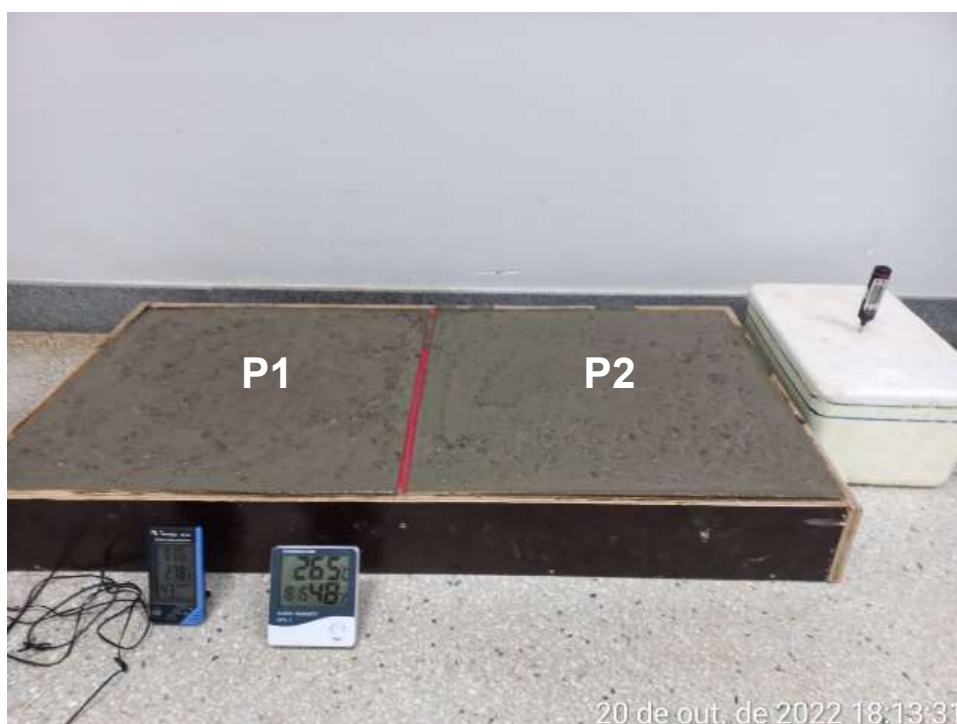
O registro das imagens termográficas, a temperatura ambiente, umidade relativa do ar e a temperatura interna do concreto foi realizado às 11h30, 12h30, 13h30 e 14h30.

3.3.4 4º teste – Protótipos de concreto com maiores dimensões

A fim de avaliar a influência das dimensões da peça no processo de endurecimento do concreto, 2 protótipos foram avaliados quanto a temperatura superficial, interna, ambiente e umidade relativa do ar. O ensaio ocorreu no dia 20 de outubro de 2022 no mesmo laboratório em que foi realizado primeiro ensaio. Foram confeccionados 2 protótipos em formas de compensado com dimensões 50 x 50 x 10 cm cada uma, como ilustrado na figura 20.

Além disso, foi utilizado uma caixa de poliestireno (EPS) que recebeu o mesmo concreto, que em seguida foi fechada com tampa e teve o termômetro de espeto posicionado. Esse teste foi realizado para verificar o gradiente térmico e entender a diferença da temperatura do concreto hermeticamente isolado em relação ao concreto das formas que perde temperatura para o meio.

Figura 20 - Protótipos de concreto



Fonte: do autor

O concreto cujo traço 45 kg de brita, 45 kg de areia, 30 kg de cimento, 12,5 kg de água e 150 g de aditivo, foi dosado às 15h30. A captura das imagens termográficas, a temperatura ambiente, umidade relativa do ar, temperatura interna do concreto teve início às 16h e as quatro primeiras medidas foram obtidas em um intervalo de 15 em 15 min (16h, 16h15, 16h30 e 16h45), os demais registros foram de 30 em 30 minutos até às 22h. A cada medição o protótipo P1 foi submetido a cura úmida utilizando um borrifador com água e o protótipo P2 a nenhum tipo de cura. Foi realizado a molhagem da superfície para entender o efeito do procedimento de cura na temperatura superficial do concreto. A figura 21 mostra o posicionamento da câmera térmica.

Figura 21 - Posicionamento da câmera térmica no laboratório



Fonte: do autor

A partir desse ensaio, um novo teste foi programado para campo, mas aplicando o mesmo protótipo em condição de obra.

3.3.5 5º teste – Protótipos de concreto no canteiro de obras

Com a finalidade de avaliar a mesma situação da quarta etapa no campo, com todas as condições do ambiente em que as peças estruturais estão sujeitas no dia da concretagem, foi realizado no dia 17 de novembro de 2022 no canteiro de obra de um condomínio, uma avaliação de 2 protótipos de dimensões iguais ao do quarto ensaio 50x50x10cm, como mostrado na figura 22 abaixo.

Figura 22 - Posicionamento câmera térmica em campo



Fonte: do autor

Um local de fácil acesso dentro do canteiro de obras foi escolhido para confecção e análise do protótipo. O concreto usinado utilizado para produção dos protótipos possui F_{ck} 30, slump 16 ± 2 e brita mista. As imagens termográficas, a temperatura ambiente, umidade relativa do ar, temperatura interna do concreto foram capturadas de 30 em 30 minutos, tendo início às 08h30 e término às 17h. A cada medição o protótipo P1 mostrado na figura 23 foi submetido a cura úmida utilizando um borrifador de água e o protótipo P2 além da análise da temperatura superficial, também foi analisado a temperatura interna, mas não houve nenhum tipo de cura.

Figura 23 - Protótipos P1 e P2



Fonte: do autor

Cabe ressaltar que não foram limitadas as interferências das condições de obra, ou seja, o concreto teve momentos de incidência solar direta e momentos da presença de sombra. Condição pela qual o termo-higrômetro também foi submetido.

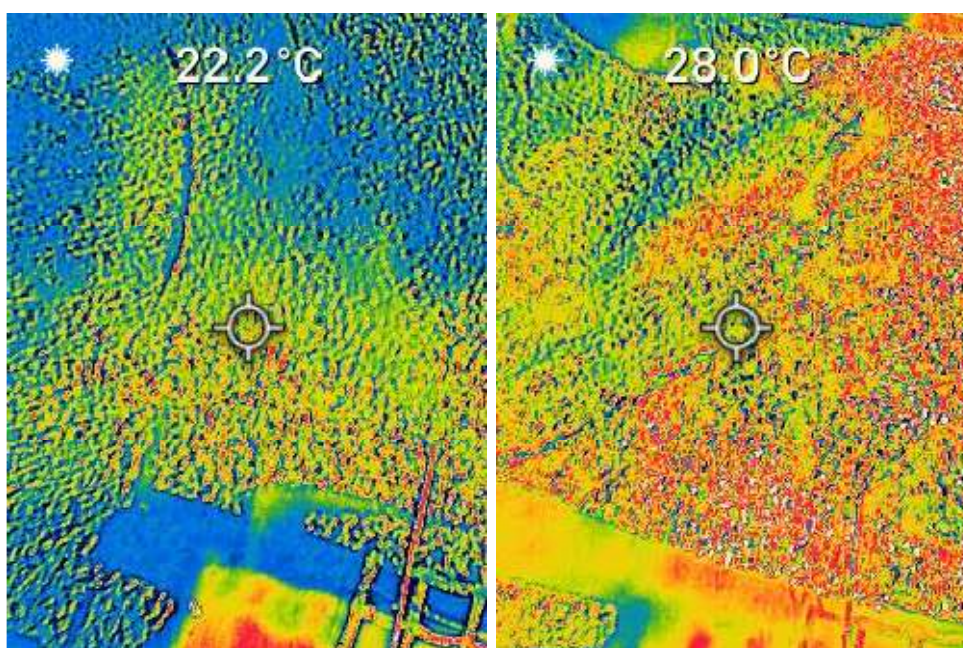
4 RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos testes definidos na metodologia.

4.1 1° TESTE – TESTE DO FUNCIONAMENTO DA CÂMERA

O primeiro teste foi basicamente exploratório de verificação da câmera termográfica. A figura 24 apresenta duas imagens em dois momentos, elas mostraram diferença de coloração e com duas leituras diferentes de temperatura.

Figura 24 - Imagens termográficas do ensaio



Fonte: do autor

Neste teste, não foi definido nenhum parâmetro, apenas foi feito a captura das imagens em intervalos de tempo aleatórios com o intuito de verificar se a câmera termográfica era capaz de obter a distribuição da temperatura superficial concreto, bem como seus termogramas. Diante disso, identificou – se que a câmera era inicialmente sensível ao que se esperava. Assim, foi dado prosseguimento à pesquisa e com os demais testes. O resultado das imagens foi discutido e foi definido por realizar teste em laboratório, que foi definido pelo segundo teste.

4.2 2° TESTE - PROTÓTIPO DE ARGAMASSA

Os dados de temperatura superficial dos protótipos de argamassa coletados por uma câmera termográfica durante o período de análise, bem como a variação de temperatura do ambiente, umidade relativa do ar e temperatura interna da argamassa, estão apresentados na tabela 1.

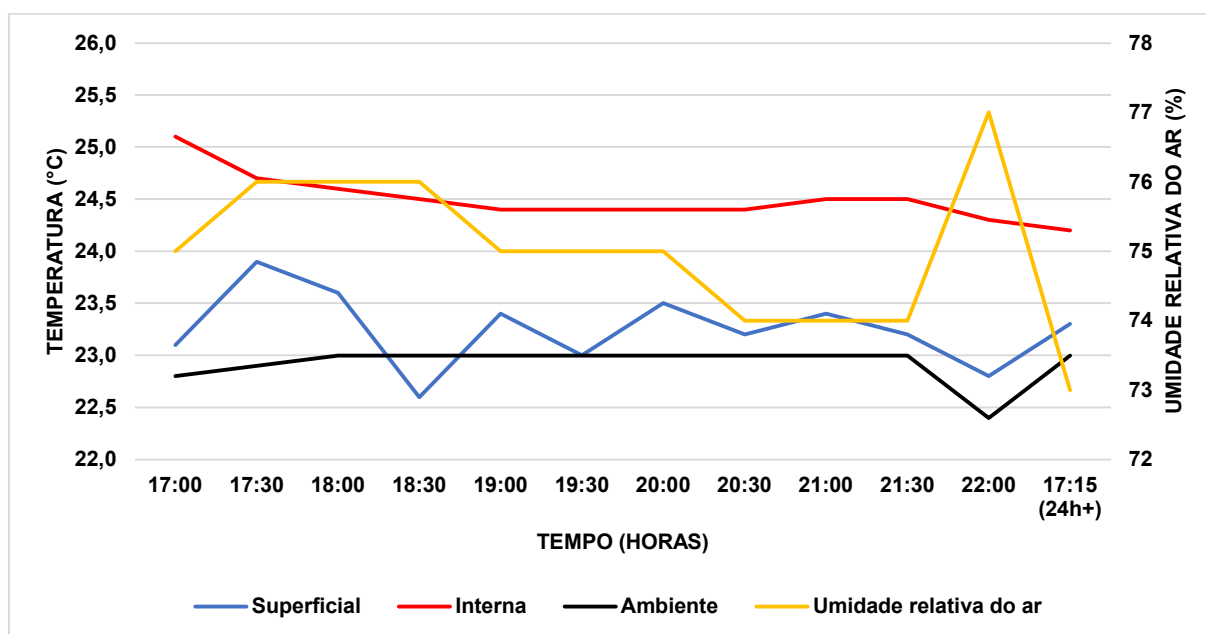
Tabela 1 - Dados obtidos da análise de protótipos de argamassa em laboratório

Tempo (horas)	Temperatura Câmera térmica (°C)	Temperatura termômetro (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Umidade do ar (%)
17:00	23,10	25,1	22,8	75,0
17:30	23,90	24,7	22,9	76,0
18:00	23,60	24,6	23,0	76,0
18:30	22,60	24,5	23,0	76,0
19:00	23,40	24,4	23,0	75,0
19:30	23,00	24,4	23,0	75,0
20:00	23,50	24,4	23,0	75,0
20:30	23,20	24,4	23,0	74,0
21:00	23,40	24,5	23,0	74,0
21:30	23,20	24,5	23,0	74,0
22:00	22,80	24,3	22,4	77,0
17:15 (24h+)	23,30	24,2	23,0	73,0

Fonte: do autor

Na figura 25 estão relacionados a temperatura superficial e interna da argamassa, temperatura ambiente e umidade relativa do ar.

Figura 25 - temperatura superficial e interna da argamassa, temperatura ambiente e umidade relativa do ar



Fonte: do autor

A temperatura mínima e máxima da superfície do concreto são de 21,3°C e 23,8°C respectivamente, e a temperatura interna mínima de 24,2°C e máxima de 25,1°C. A temperatura ambiente se manteve praticamente constante durante as medições, com máxima de 23°C e mínima de 22,4°C, como ilustrado no gráfico da figura 25.

Nesta situação, a temperatura interna do concreto medida pelo termômetro é maior que a temperatura superficial obtida pela câmera termográfica. A medição é coerente com o fenômeno, pois Duarte (2018) afirma que, o calor de hidratação liberado eleva a temperatura interna da massa, sendo que, parte deste calor em elementos estruturais de menor espessura, é dissipado para o ambiente por condução na peça, gerando uma diferença entre a temperatura interna e externa.

A temperatura interna do concreto se apresentou maior que a temperatura ambiente, variando em média 1,4°C em relação a temperatura ambiente. Uma diferença inicial maior da temperatura interna em relação ao ambiente que tende a diminuir ao longo do tempo. Neste caso pode ter sido devido a interferência do calor de hidratação do concreto.

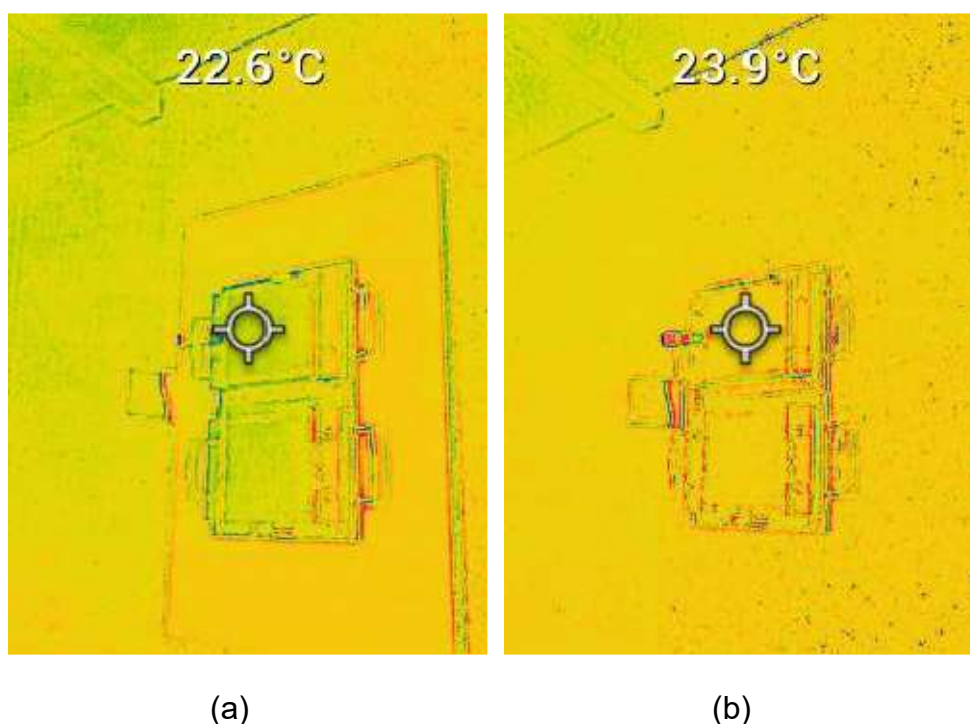
No início da moldagem a temperatura superficial do concreto se mostrou superior a temperatura ambiente. Ao longo do tempo percebeu-se ocorrer uma troca de calor entre o concreto e o ambiente. Onde a partir das 20h, as curvas seguem trajetórias similares, com uma diferença que pode ser atribuída ao calor de hidratação do concreto, já que, pela discussão anterior a temperatura interna foi, durante o ensaio, na média, 1,25°C mais alta.

Percebe-se, pelas leituras, que a temperatura ambiente se manteve relativamente constante durante as medições, a temperatura superficial apresentou, na média, uma temperatura de 0,3°C mais quente. Diferença considerada baixa, sendo, possivelmente, característica intrínseca de cada equipamento na leitura.

Nesse teste, observou-se que a dimensão dos protótipos pode ter influenciado na leitura da temperatura, principalmente interna pois como a dimensão da forma é de 3 x 4x4x16cm e a forma é metálica, o material, rapidamente, pode perder temperatura para o ambiente, chegando em equilíbrio mais rápido, já que a condutividade térmica equivale a uma quantidade de calor transmitida através de uma determinada espessura. Pois, como visto na literatura, elementos de maior volume tendem a reter a temperatura da reação de hidratação por maior tempo gerando um gradiente térmico considerável entre sua superfície e interior do concreto (CARNEIRO, GIL e NETO, 2011; VIEIRA, 2018).

Além disso, os termogramas obtidos, como nas figuras 26 (a) e (b), não foram úteis para análise dos resultados, devido não ser possível padronizar a escala de cores. A variação de cores na imagem ajuda apenas como diferença, mas não como comparação. Para uma análise mais precisa das imagens termográficas, seria preciso uma câmera com mais recursos, como manutenção da escala relativa à temperatura, porém esse modelo se autocalibrava a escala de cores, dessa forma não permitia a comparação termográfica. Assim, o trabalho utiliza apenas a leitura da temperatura da câmera termográfica para discussão dos resultados.

Figura 26 – (a) Termograma 1 (b) Termograma 2



Fonte: do autor

Contudo, foi possível verificar que dentro do laboratório as temperaturas se apresentaram controladas, tanto ambiente, superficial e interna do concreto. Não pôde ser verificado se a influência na temperatura superficial foi mais impactada pela condição ambiente ou pela elevação de temperatura da reação de hidratação, que podem ter sido impactadas pelo tamanho do protótipo. Diante disso, foi realizado o 3º teste, a fim de entender este comportamento.

4.3 3º TESTE – CONCRETAGEM DE LAJE

Os dados obtidos do ensaio estão listados na tabela 2.

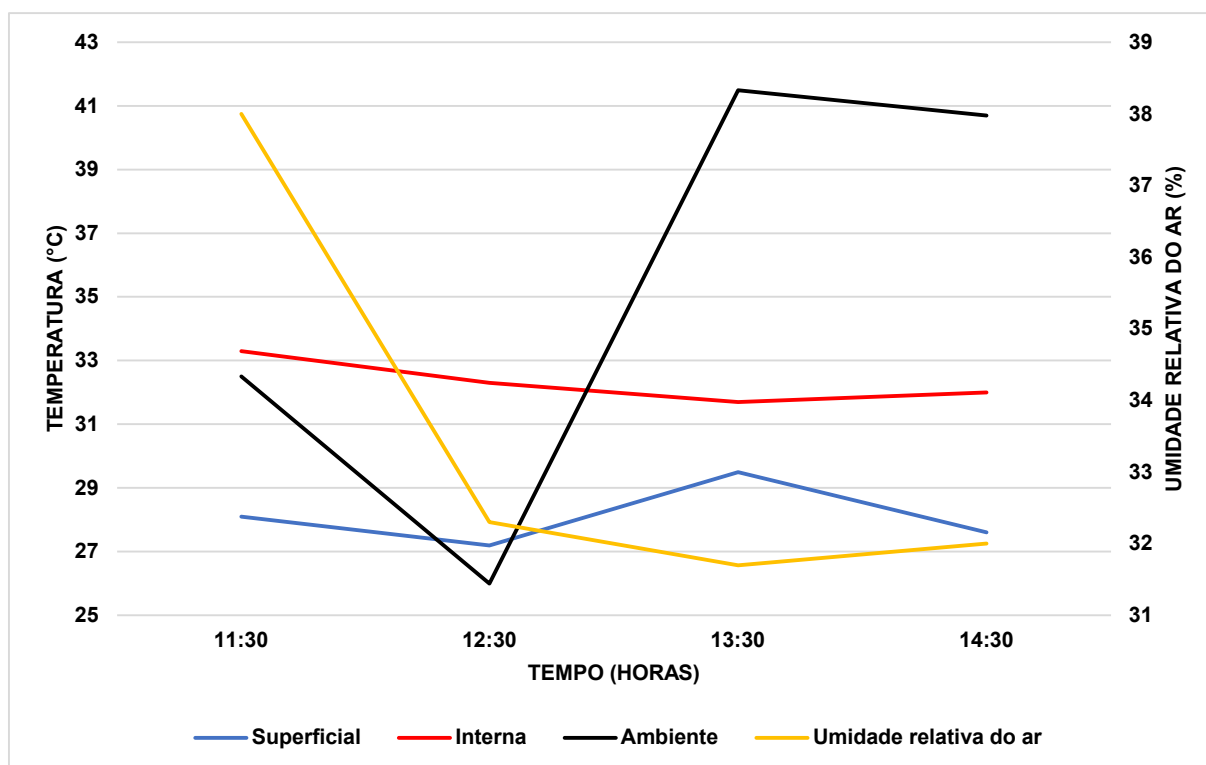
Tabela 2 - Dados obtidos da análise de laje em campo

Tempo (horas)	Temperatura Câmera térmica (°C)	Temperatura termômetro (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Umidade relativa do ar (%)
11:30	28,1	33,3	32,5	38,0
12:30	27,2	32,3	26,0	32,3
13:30	29,5	31,7	41,5	31,7
14:30	27,6	32,0	40,7	32,0

Fonte: do autor

Na figura 27, estão representadas as temperaturas superficiais do concreto obtidas pela câmera térmica, a temperatura interna obtida pelo termômetro tipo espeto, a temperatura ambiente e umidade do ar obtidas pelo termo-higrômetro.

Figura 27 - Temperatura superficial, interna, ambiente e umidade relativa do ar obtidos em campo



Fonte: do autor

Em relação a temperatura superficial e interna ilustrada no gráfico acima, percebeu-se maior distanciamento entre os valores em relação ao segundo teste, que registrou diferença média de 1,4°C e nesta a diferença foi de 4,2°C. Disso percebe-se que, muito provavelmente, a dimensão do protótipo impacta na diferença entre a temperatura interna e superficial, como apresentado pela literatura.

Quanto a temperatura superficial e a temperatura ambiente, percebe-se que, quando a temperatura ambiente diminuiu, houve também a diminuição da temperatura superficial do concreto, mas em menor intensidade, idem a relação com o aumento da temperatura ambiente. Disso, pode-se supor que a temperatura ambiente tem efeito sobre a temperatura superficial, mas essa, nesse caso, com impacto menor,

pois, ao contrário do segundo teste, esse foi em escala real, sendo o elemento de maior extensão, tanto em espessura, quanto da superfície.

Cabe ressaltar que o termo-higrômetro, que faz a leitura ambiente, ficou exposto diretamente aos raios solares, que pode impactar no processo de leitura da temperatura ambiente.

Já a temperatura interna em relação a ambiente, assim como na segunda etapa, não se alterou muito. Mas na etapa anterior, a percepção foi que isso se deu pela manutenção da temperatura em laboratório. Porém, em obra, observou-se que ela não fora muito impactada pela temperatura ambiente, que, também, pode ser resultado da dimensão da peça, maior em escala do que ao do teste anterior, fazendo com que a dissipação da temperatura interna fosse mais lenta e não fora percebido pelo período de ensaio.

Assim, foi definido para a próxima etapa que o protótipo tivesse dimensões maiores do que o da segunda etapa, pela observação da possível relevância. Também foi definido um tempo de leitura maior.

4.4 4° TESTE - PROTÓTIPO DE CONCRETO EM LABORATÓRIO

Na tabela 3 estão listados dos dados obtidos neste 3° ensaio.

Tabela 3 - Dados obtidos da análise de protótipos com maiores dimensões, em laboratório

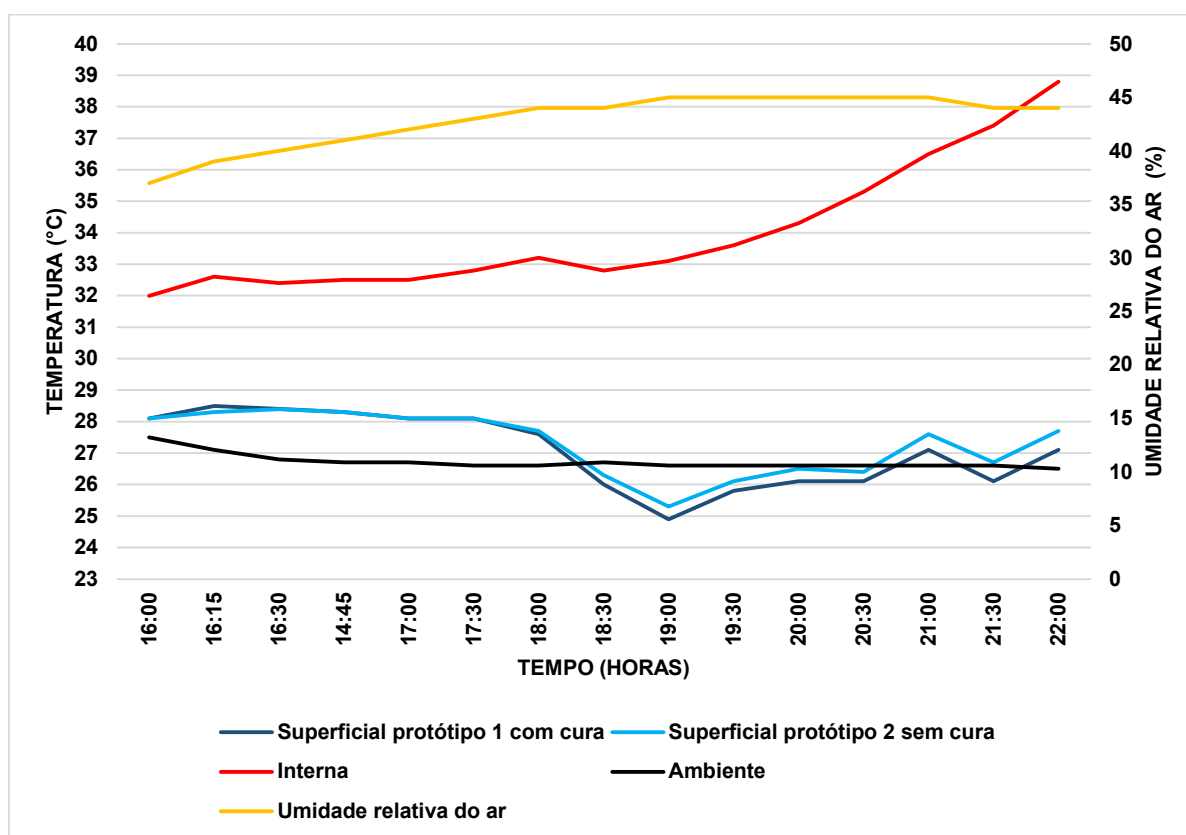
Tempo (horas)	Temp. câmara térmica protótipo 1 com cura (°C)	Temp. câmara térmica protótipo 2 sem cura (°C)	Temperatura Termômetro (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Umidade relativa do ar (%)
16:00	28,10	28,10	32,0	27,5	37
16:15	28,50	28,30	32,6	27,1	39
16:30	28,40	28,40	32,4	26,8	40
14:45	28,30	28,30	32,5	26,7	41
17:00	28,10	28,10	32,5	26,7	42
17:30	28,10	28,10	32,8	26,6	43
18:00	27,60	27,70	33,2	26,6	44
18:30	26,00	26,30	32,8	26,7	44
19:00	24,90	25,30	33,1	26,6	45
19:30	25,80	26,10	33,6	26,6	45
20:00	26,10	26,50	34,3	26,6	45

20:30	26,10	26,40	35,3	26,6	45
21:00	27,10	27,60	36,5	26,6	45
21:30	26,10	26,70	37,4	26,6	44
22:00	27,10	27,70	38,8	26,5	44

Fonte: do autor

Na figura 28, encontra-se as temperaturas superficiais do concreto, interna, ambiente e umidade do ar.

Figura 28 - Temperatura superficial, interna, ambiente e umidade relativa do ar obtidos em laboratório



Fonte: do autor

A temperatura superficial de P1 e P2, seguiram caminhos similares, mas como já era esperado ao longo do tempo a temperatura de P1 é inferior ao P2 devido à realização do procedimento de cura, onde uma de suas funções é controlar a temperatura do concreto, já que as reações químicas que ocorrem liberam calor e elevam a temperatura do concreto, se não controladas podem levar ao surgimento de manifestações patológicas na estrutura (DINIZ, et al., 2016).

Diferente dos ensaios anteriores, o termômetro foi colocado em uma caixa de isopor com tampa, que evita a perda de calor para o ambiente. Diante disso, a diferença da temperatura interna em relação a temperatura superficial de P1 e P2 foi maior, assim como nos ensaios anteriores. Porém, a temperatura superficial de P1 variou em média 6,9°C e P2 6,7°C em relação a interna, distanciando ainda mais entre os valores do segundo e terceiro teste, que teve variação média de 1,4°C e 4,2°C, respectivamente.

Em relação a variação da temperatura interna e ambiente, a temperatura ambiente assim como nos ensaios anteriores foi inferior a temperatura interna e não houve variações significantes, devido ao ambiente controlado do laboratório.

Isso mostra que, como visto no segundo teste, o concreto perde temperatura relativa à reação de hidratação para o ambiente. Seja pelo contato direto com o meio, mas, também, pelo efeito de escala do protótipo.

Em ambos os protótipos a temperatura superficial do concreto é superior a temperatura ambiente até às 18h. A partir deste horário a temperatura superficial foi menor como observado nas figuras. Isso pode ser devido à elevação da umidade relativa nesse período. Porém, como visto no segundo teste, que também apresentou uma tendência de queda nesse horário, pode ser também uma sensibilidade da câmara térmica a mudança de iluminação no ambiente, mesmo o ensaio sendo realizado em laboratório.

4.5 5° TESTE - PROTÓTIPO DE CONCRETO NO CAMPO

Na tabela 4, encontra-se os dados obtidos na realização do ensaio.

Tabela 4 - Dados obtidos da análise de protótipos com maiores dimensões, em campo

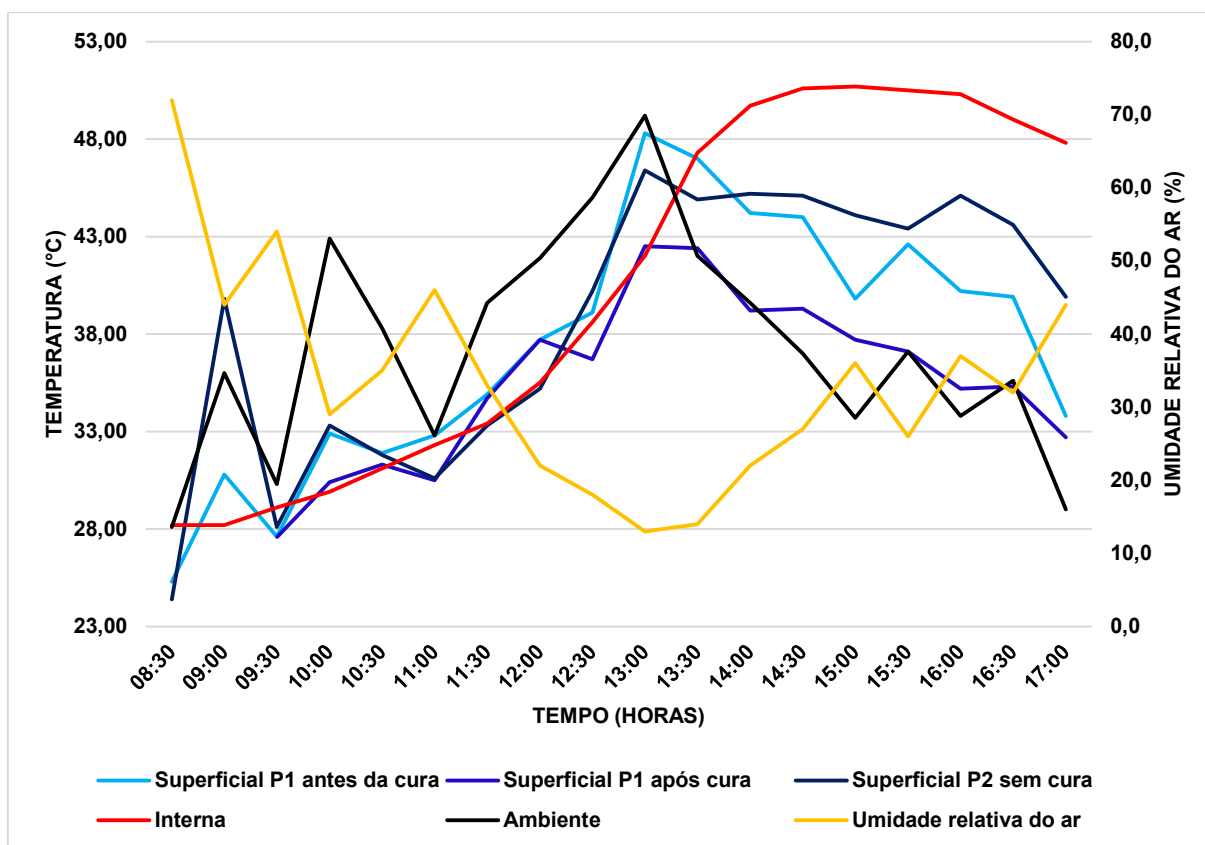
Tempo (horas)	Temperatura câmara térmica P1 antes da cura (°C)	Temperatura câmara térmica P1 após cura (°C)	Temperatura câmara térmica P2 sem cura (°C)	Temperatura Termômetro P2 (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Umidade relativa do ar (%)
08:30	25,30	-	24,40	28,2	28,1	72,0
09:00	30,80	-	39,80	28,2	36,0	44,0
09:30	27,60	27,60	28,10	29,1	30,3	54,0

10:00	32,90	30,40	33,30	29,9	42,9	29,0
10:30	31,90	31,30	31,80	31,1	38,3	35,0
11:00	32,80	30,50	30,60	32,3	32,8	46,0
11:30	34,90	34,70	33,30	33,4	39,6	33,0
12:00	37,70	37,70	35,20	35,5	41,9	22,0
12:30	39,10	36,70	40,20	38,6	45,0	18,0
13:00	48,30	42,50	46,40	42,0	49,2	13,0
13:30	47,00	42,40	44,90	47,3	42,0	14,0
14:00	44,20	39,20	45,20	49,7	39,6	22,0
14:30	44,00	39,30	45,10	50,6	37,0	27,0
15:00	39,80	37,70	44,10	50,7	33,7	36,0
15:30	42,60	37,10	43,40	50,5	37,1	26,0
16:00	40,20	35,20	45,10	50,3	33,8	37,0
16:30	39,90	35,30	43,60	49,0	35,6	32,0
17:00	33,80	32,70	39,90	47,8	29,0	44,0

Fonte: do autor

Na figura 27, estão representadas as temperaturas superficiais do concreto, interna, ambiente e umidade relativa do ar.

Figura 27 - Temperatura superficial, interna, ambiente e umidade relativa do ar obtidos em campo



Fonte: do autor

Como visto na figura 27, a variabilidade de resultados foi acentuada em relação aos ensaios anteriores, principalmente comparados aos testes em laboratório. Com isso, antes de analisar individualmente alguns resultados, percebe-se que a condição climática tem forte influência nas leituras de temperatura superficial do concreto.

Nesta situação, a realização da cura começou logo após o início do tempo de pega do concreto. Percebe-se que, após a realização da cura, houve a diminuição da temperatura superficial do concreto, como era esperado de acordo com a literatura. A temperatura superficial mínima de P1 antes da cura foi 25,3°C e máxima 48,3°C, tendo uma variação de 23°C, já a temperatura superficial mínima de P1 após cura foi de 27,6°C e máxima 42,5°C, variando 14,9°C.

A temperatura superficial acompanhou uma tendência de evolução para ambos os corpos de prova. Sendo que no início e no fim do gráfico, apresentou temperaturas menores em P1, que estava sendo realizado a cura. Cabe destacar que a leitura de temperatura foi executada a cada 30 minutos e imediatamente antes da cura, e isso pode diminuir o efeito do procedimento de cura sobre a temperatura na superfície do concreto. As leituras de temperatura logo após o procedimento de cura, apresentaram maior discrepância em relação ao corpo de prova sem cura. Disso, para um maior efeito do procedimento de cura para a temperatura superficial, provavelmente deveria ter sido feito intervalos menores de tempo.

A temperatura interna evoluiu de 28,2°C as 08h30 até o máximo de 50,7°C as 15h e com uma queda até 47,8°C as 17h. Percebe-se que a temperatura superficial do concreto teve uma tendência de acompanhamento dessa evolução de elevação e diminuição de temperatura.

Como visto no quarto teste, a temperatura pela reação de hidratação do concreto se elevou bastante, pois o isolamento do corpo de prova com caixa de polietileno, propiciou essa observação. Porém em outros testes, principalmente com corpos de prova com menor dimensão, a dissipação dessa temperatura foi rápida, e a diferença com a temperatura ambiente foi menor. Nesse caso, como a temperatura ambiente também se elevou ao longo do teste, a dissipação da temperatura da reação de hidratação começou a se manifestar no final do ensaio.

Nota-se uma evolução da temperatura superficial do concreto acompanhando a evolução de temperatura interna. Porém a temperatura superficial apresentou picos mais salientes, provavelmente mais impactada pela condição ambiental.

Quanto a temperatura superficial e a temperatura ambiente, percebe-se, também, uma tendência de acompanhamento de ambas. Inicialmente a temperatura ambiente é maior que a superficial. No momento em que houve um pico da temperatura ambiente, o mesmo ocorreu com a temperatura superficial. A partir deste pico, a temperatura ambiente baixou e a temperatura superficial do concreto também, deixando evidente o fenômeno da troca de calor do concreto com o ambiente. Mas que esse, assim como nos testes anteriores, o efeito é mais impactado em relação ao tamanho do corpo de prova. Em escala real, essa interferência demora mais para se manifestar.

Em relação a variação da temperatura interna e ambiente, a temperatura ambiente foi maior que a temperatura interna até as 13h00, pois o termo-higrômetro captou a alta incidência solar. Depois desse período de tempo, a temperatura interna foi superior a temperatura ambiente como nos outros ensaios.

Levando em consideração todos os testes realizados, pode-se perceber que, a temperatura ambiente é o principal causador de impactos na temperatura superficial concreto. Tendo como exemplo o segundo teste que foi realizado em laboratório, onde em certo período a temperatura superficial do concreto e ambiente foi 22,8°C e 22,4°C respectivamente, quando a temperatura ambiente aumentou para 23,0°C a temperatura superficial também aumentou para 23,3°C. Outro exemplo que deixa isso claro, são as temperaturas obtidas no terceiro teste, quando a temperatura ambiente diminuiu de 32,5°C para 26°C a temperatura superficial diminuiu de 28,1°C para 27,2°C.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de câmera térmica para avaliação de materiais cimentícios se apresenta viável. Tem-se a aplicação para investigação de manifestações patológicas em consolidação, porém, para acompanhamento do processo de endurecimento, são poucos estudos.

A câmera térmica utilizada, se apresentou viável apenas para obtenção da temperatura superficial de materiais cimentícios. Os termogramas obtidos não foram considerados para análise dos resultados devido a impossibilidade de padronizar a escala de cores. Diante disso, para uma análise mais precisa das imagens termográficas, seria preciso uma câmera com mais recursos. Além disso, é necessário que o operador tenha conhecimento sobre a operação e funcionamento da câmera para conseguir interpretar os termogramas.

Diante das discussões realizadas para análise dos resultados, houve uma grande dificuldade para compreensão dos dados de temperatura obtidos e das influências dos fatores climáticos sobre os mesmos, pois as referências sobre o assunto eram escassas para o embasamento científico, e a delimitação de tempo para mais teste com isolamento das variáveis.

Das variáveis relativas a materiais e meio ambiente entende-se que, a câmera termográfica, o termo-higrômetro e a superfície do concreto sofrem influência das condições do meio e isto já era esperado de acordo com a literatura. Além disso, nos testes realizados no laboratório e em campo foi perceptível os impactos dos fatores ambientais sobre a temperatura superficial do concreto, principalmente a temperatura ambiente.

Foi perceptível tanto nos testes no laboratório quanto nos testes em campo, que quanto maior a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar, a incidência solar e do vento sobre a superfície recém concretada, mais a temperatura superficial sofre variações. Na literatura gradientes com variação de temperatura interna e externa superiores a 20°C podem levar à fissuração do concreto, sendo assim no quinto teste realizado houve grande probabilidade de fissuração diante da variação de 23°C entre a temperatura superficial e interna. Resultado esse não percebido no teste pela

dimensão do protótipo. Mas no teste 3, que foi executado diretamente na laje, foi possível observar fissuras por retração no momento do endurecimento.

O impacto da temperatura superficial sofrido devido a estes fatores, consequentemente interfere no grau de evaporação da água da mistura. Sabe-se que a perda de água do concreto é um dos fatores que possibilita o surgimento de fissuras e isso explica o surgimento das fissuras na laje do segundo teste.

Como visto nos testes, o procedimento de cura, tem leve impacto na temperatura superficial. Considerando o procedimento aplicado. Se sabe que a cura é fundamental para manutenção da qualidade do concreto no seu endurecimento. Assim aprimorar os testes com aplicação de cura devem alimentar com mais dados para análise no comportamento da temperatura superficial do concreto.

Contudo, mesmo com as limitações da câmara térmica, a mesma possibilitou o início de um estudo. É necessário mais tempo para aplicação de mais testes, principalmente com o controle das condições de contorno para compreensão do comportamento da temperatura superficial do concreto ao longo do processo de endurecimento.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos deixaram dúvidas e oportunidades que necessitam de pesquisas futuras para entender melhor o fenômeno da temperatura superficial e estender as aplicabilidades do método. Diante disso, sugere-se:

- Realizar o mesmo ensaio aplicando um fator de escala dos corpos de prova, pois isso afeta a condução de temperatura pelo corpo de prova;
- Simular diferentes ações ambientais para entender o mecanismo que é preponderante na atuação sobre a temperatura superficial do concreto.
- Testar diferentes intervalos dos tempos de cura para entender o tempo de evaporação da água associada condição climática;
- Utilizar uma câmara mais precisa junto com algum outro tipo de equipamento que possibilite a análise da temperatura superficial do concreto, para assim comparar os resultados;

- Aplicar métodos que correlacione a temperatura da superfície com o grau de evaporação da água do concreto.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, Livia Borba et al. Análise calorimétrica de pastas de cimento Portland contendo polímero superabsorvente (SAP) e nanopartículas de sílica (NS). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020.
- ALMEIDA, Paulo Sérgio Dorneles. **Termografia infravermelha aplicada à análise térmica de alvenaria em blocos cerâmicos estruturais**. 2017. 64 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.
- ALVES, José Dafico. **Manual de tecnologia do concreto**. 4 ° ed. rev. Atual, Goiânia: Ed. da UCG, 2002.
- ANDRADE, Leonardo de Brito. **Análise da influência da substituição do agregado miúdo natural por materiais granulares porosos residuais na fase plástica de concretos**. 2008. 286 p. Dissertação (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- ANDRADE, Manuela Petra Cavalcanti de. **Desenvolvimento de calorímetro para estudos das variações de temperatura de concretos com diferentes tipos e consumos de cimento**. 2017. 67p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- ANDRADE, R.; RESENDE, Maurício M.; MARANHÃO, Flávio L. Estado da arte da utilização da técnica de termografia da técnica de termografia embarcada em drones para inspeção de revestimentos de fachadas. **Tecnologia de processos e sistemas construtivos**, v. 2. 2019.
- ANDRADE, Talita Cristina C. **Avaliação do tipo de cura nas propriedades de concretos de pós reativos**. 2015. 102 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- ARAÚJO, J. M. Tensões térmicas em blocos de concreto armado. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.22, p.1-14, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - requisitos**. Rio de Janeiro, p. 19. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14931: **Execução de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, p. 53. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15572: **Ensaio não destrutivos — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos**. Rio de Janeiro, p. 8. 2013.

AURICH, Mauren. **Simulação computacional do comportamento do concreto nas primeiras idades**. 2008. 190 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

AZENHA, Miguel; FARIA, Rui; FIGUEIRAS, Helena. **Thermography as a technique for monitoring early age temperatures of hardening concrete** 2011. Elsevier: Construction and Building Materials. Maio 2011.

BARDELLA, Paulo Sergio; BARBOSA, Denise Cristina; CAMARINI, Gladis (2005). **Sistemas de Cura em Concretos Produzidos com Cimento Portland de Alto-Forno com Utilização de Sílica Ativa. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado**. São Carlos, 12 p. 2005.

BARREIRA, E., FREITAS, V. **Evaluation of Building materials using Infrared Thermography**. Construction and Building Materials, 21, 218-224. Elsevier, 2007.

BARREIRA, Eva Sofia Botelho Machado. **Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: 5ª Edição, Ed. LTC. 2008.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: 6ª Edição, Ed. LTC. 2019.

BESERRA, Simone Ataíde et al. **Influência do tipo e do tempo de duração de cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos em períodos quente ($t > 25^\circ \text{C}$) e de baixa umidade relativa do ar ($h < 50\%$)**. 2005. 137 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.

BIAGIOTTI, Nathalia. **Câmera Termográfica como ferramenta de caracterização do comportamento térmico de fachadas: Estudo de caso – edifícios comerciais em Ribeirão Preto**. 2021. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

CALDEIRA, Mariana Martino. **Aplicação da termografia infravermelha para identificação de danos na aderência entre concreto e polímero reforçado com fibras**. 2016. 230 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2016.

CAMPOS NETO, Tiago Ferreira et al. **Efeitos da temperatura do concreto fresco na sua trabalhabilidade**. 2015. 132 p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

CERVEIRA, Fernando Guilherme Castanheira et al. **Inspeção de fachadas com recurso à termografia de infravermelhos. Caso de estudo em Viseu**. 2020. 105 p. Tese (Doutorado) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2020.

COELHO, Nailde de Amorim et. al. A influência das propriedades térmicas do concreto na construção de barragens de gravidade. **Comitê Brasileiro de Barragens, XXIX Seminário nacional de grandes barragens**. Porto de Galinhas, PE, 1-14p, 2013.

COELHO, Nailde de Amorim. **Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa**. 2012. 152 p. Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2012.

CORTIZO, Eduardo Cabaleiro. 2007. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações: Ênfase em Edificações do Patrimônio Histórico**. 178 p. Tese (Pós-graduação) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

COUTO, José Antônio Santos et al. **O concreto como material de construção**. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE, v. 1, n. 3, p. 49-58, 2013.

CRAVEIRO, M. A. C. **Desenvolvimento de um sistema para avaliação dos fatores de influência sobre análises termográficas em subestações desabrigadas**. 2008. 154 p. Dissertação (mestrado - Universidade Federal de Itajubá, 2008.

CUNHA, Letícia Shirozaki. **Avaliação de edificações com a utilização da termografia como ensaio não destrutivo: estudo de caso**. 2016. 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - UniCEUB, Brasília, 2016.

DEWITT, D.; Incropera, F.P.; Lavine, A.S.; Bergman, T.L. (2011). **Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Seventh Edition**, John Wiley & Sons, pp. 3-12.

DINIZ, Hugo A. A.; MONTE JUNIOR, Italo Vale; OLIVEIRA, Samuel Silva; SOUZA, Kalina J. Marques. Influência da cura por imersão em concretos convencionais. **Revistas Científicas**, v. 2 n. 3, 2016.

DOMONE. P. L. P. Construction Materials. 2010. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais, Parte 3** - 3ª Edição, p. 583. 2010.

DUARTE, Francisco Kléber Dantas. **Avaliação térmica do concreto nas primeiras idades: estudo de caso**. 2018. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2018.

FERRARI, Vinícius. **Investigação sobre o efeito do aumento da temperatura durante a cura do concreto**. 2017. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Sul de Santa Catarina, Palhoça – SC, 2017.

FLIR TELEDYNE. **FLIR TG165-X**. Disponível em: <https://www.flir.com.br/products/tg165-x/>. Acesso em: 14 dez. 2022.

GAMBALE, Patrícia Guedes et al. **Estudo do calor de hidratação do concreto massa e contribuição ao cálculo térmico e à previsão de fissuras de retração**. 2017. 120 p. Dissertação (Pós-Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

GARCIA, J. R. R. **Potencialidades da Termografia para o Diagnóstico de Patologias em Edifícios**. 2014. 159 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2014.

GE, Zhi. **Predicting temperature and strength development of the field concrete**. 2005. 232 p. dissertation (graduate faculty in Civil Engineering) - Iowa State University, Stockholm, Sweden, 2017.

GONÇALVES, Beatriz. **Evolução de fases durante a hidratação do cimento portland brasileiro por difração de raios x**. 2021. 176 p. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2021.

GRAEFF, Eduardo Recktenvald. **Elevação de temperatura de concretos com baixo consumo de cimento e adição de cinza volante**. 2017. 123 p. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

HARTMANN, C.; JEKNAVORIAN, A. SILVA, D.; BENINI, H. Cap. 10 Aditivos Químicos para Concretos e Cimentos. *In*: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. vol. 1. São Paulo: Ed. Ibracon. 2011.

HORTA, Ricardo Augusto dos Santos; DE PAULA, Júnia Nunes; CALIXTO, José Márcio Fonseca. Avaliação do perfil térmico e calor de hidratação de pastas de cimento com adição de óxido de grafeno. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, 2022.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. vol. 1. São Paulo: Ed. Ibracon. 2011.

JUNCKES, Ricardo. **Influência da adição de cinza volante na elevação de temperatura de concretos aplicados em blocos de fundação**. 2015. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, SC, 2015.

JUNIOR, Dejalma Frasson; BETAZZAb, Fernando Augusto; RIBEIRO, Thatyanne Santana da Costa. **Verificação da influência da cura química na resistência à compressão do concreto**. 2018. 86 p. Trabalho de conclusão de curso – Instituto Construindo Conhecimento, Florianópolis, 2018.

KOWALSKI, Luiz Fernando; MASIERO, Érico. Estudo Comparativo de Sistemas de Medições de Temperatura Superficial de Pavimentos Urbanos. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 8, n. 61, 2020.

KRAAI, P. P., **A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete**, Concrete Construction, v. 30, n. 9, pp. 775-778, 1985.

LODI, Vitor Hugo. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó-SC**, 2006. 131 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

LORENZI, Alexandre et al. Inspeção de obras através da aplicação de ensaios não destrutivos. In: **Congresso CONPAT 2019, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**. 2019.

LUNA, Sara de Oliveira Marques. **Análise incremental considerando efeitos de retração e fluência em vigas de transição de concreto armado**. 2020. 134 p. Dissertação de Mestrado - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

MARCELINO, Cátia Sofia Garcia. **A envolvente exterior de edifícios através da termografia: caracterização construtiva e identificação de patologias**. 2020. 120 p. Dissertação (mestrado) - Escola Superior de Tecnologias do Instituto Politécnico de Castelo Branco, 2020.

MARQUES, Melissa Borges de Oliveira. **Cura seca, cura úmida, cura térmica: avaliação da eficiência na resistência à compressão do concreto**. 2018. 64 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró/RN, 2018.

MATTOS, Gustavo de. et al. A Influência da cura do concreto na resistência a compressão Axial. **Revista eletrônica multidisciplinar FACEAR**. Associação Paranaense de Ensino e Cultura, 10 p. 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais**- 2ª Edição. Ed.: IBRACON. ISBN.:978-85-98576213. Português, p. 751. 2014.

MILAGRES, Eduardo Araújo et al. **Retração e secagem do concreto: estudo da retração do concreto e o aparecimento de patologias**. 2019. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

MILANEZ, Mariana Ortolan. **Influência do vento na detecção de defeitos em estruturas de concreto utilizando termografia infravermelha**. 2017. 150 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

NASCIMENTO, Éberto Roque dos Santos. Patologias das estruturas de concreto armado. **Revista Fatec de Tecnologia e Ciências**, v. 6, n. 1, 2021.

Neville, A. M. **Propriedades do concreto** - 5. ed. - Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, K. B. L. et al. Utilização de ensaios não destrutíveis para inspeção de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado. In: **4º Simpósio paranaense de patologia das construções**, p. 504-513, 2019.

OLIVEIRA, Valin jr de, Marcos; CHIQUITO, Aparecida Natalína. Uso de aditivo plastificante para concreto aplicado com mais de 150 minutos. **Proficientia**, n. 14, p. 25-40, 2020.

PAZHOOHESH, Mehdi et al. Infrared thermography for a quick construction progress monitoring approach in concrete structures. **Architecture, Structures and Construction**, v. 1, n. 2, p. 91-106, 2021.

PEREIRA, Mirian D. **Análise do tempo de pega dos cimentos com o uso de calorímetro e termografia**. 2017. 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

PIMENTA, Cristiano. Estudo da evaporação de uma superfície livre com convecção forçada. 2012. **20º POSMEC**, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

RECENA, Fernando A. P.; PEREIRA, Fernanda Macedo. Produção e controle de concreto em obra. In: **Concreto: Ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, v.1, p. 537-584, 2011.

RECENA, F. A. P. **Retração do concreto**. Porto Alegre: Edipucrs, 2014. 151 p.

RESNICK, R., HALLIDAY, D., & Walker, J. **Fundamentos de Física Vol. 4: Óptica e Física Moderna**. LTC–Livros Técnicos e Científicos Editora AS, 10 Ed, 2016.

RIBEIRO JR, E. Propriedades dos materiais constituintes do concreto. **Revista IPOG**, n10, vol. 1, 2015.

ROCHA, Joaquin Humberto Aquino et al. Análise da Profundidade de Fissuras em Concreto com Termografia Infravermelha. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 3, 2017.

SAKAMOTO, Camila Akemi; FIORITI, Cesar Fabiano. Detecção de destacamento e falha de aderência em revestimentos argamassados utilizando a termografia infravermelha. **CONSTRUINDO**, v. 10, n. 1, p. 50-60, 2018.

SALES, Rosemary do Bom Conselho. **Estudo de compostos de cimento Portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia**. 2008. 204 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas, Belo Horizonte, 2008.

SALVADOR FILHO, J. A. A. **Cura térmica dos concretos de alto desempenho: análise das propriedades mecânicas utilizando o método da maturidade**. 2001. 104 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, Brasil.

SANTOS S.B.; BITTENCOURT, R. M.; GRAÇA, N. G. Efeitos da temperatura sobre o concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. Ed. São Paulo: IBRACON, n. 1, p. 705-732, 2011.

SANTOS, Maria da Conceicao Formoso Nobre. **Uso da termografia para caracterizar qualitativamente fachadas de edifícios**. 2014. 80 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra 2014.

SARAIVA, Marco Antônio Caixeta. **Análise da influência da cura na resistência à compressão do concreto**. 2018. 68 p. Trabalho de Conclusão de curso – UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 2018.

SARMENTO, Ítalo Bittencourt. **Análise de manifestações patológicas: Estudo de caso da estrutura da Rodoferroviária de Brasília**. 2019. 60 p. Trabalho de Conclusão de Curso - UniCEUB – Centro Universitário de Brasília, Brasília – DF, 2019.

SHEN, Z., Erdogmus, E., Morcou, G., Cheng, C., Shang, Z., McCabe, T., Kodsy, A. (2020). **Early Detection of Near-Surface Void Defects in Concrete Pavement Using Drone Based Thermography and GPR Methods**. NDOT Research Report SPR-P1(19) M082.

SILVA, Amanda Fernandes Pereira da et al. Patologias em estruturas de concreto armado: estudo de caso. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 363-374, 2021.

SILVA, D. D. S. **Diagnóstico de patologias em fachadas utilizando termografia**. 2012. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.

SILVA, Elisangela Soares da et al. **Influência da Cura na Resistência do Concreto à Compressão**. 53º congresso brasileiro do concreto – IBRACON. 9 p. 2011.

SILVA, Erlucivânia Bueno et al. Influência do método de cura para o concreto pré-moldado. **REVISTA UNIARAGUAIA**, v. 15, n. 1, p. 1-11, 2020.

SILVA, Lorena. **Análise da influência das microfibras de polipropileno no controle da retração hidráulica no concreto autoadensável**. 2018. 146 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SILVA, Marília Pereira. **Efeito da variação térmica no processo de cura em bloco de concreto**. 2019. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Maranhão, Balsas/MA, 2019.

SIQUEIRA, Rodrigo Alves et al. Análise comparativa entre o concreto usinado e o concreto produzido no canteiro de obra. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro** – Universidade Presidente Antônio Carlos (Unipac), ISSN, 13 p. 2018.

SOARES, Augusto Cezar Maciel. **Avaliação experimental da retração em concretos com substituição do agregado gráúdo natural por agregados reciclados**. 2019. 244 p. Dissertação (mestrado) Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SOARES, Laura Kaddyjean Oliveira et, al. Análise da resistência à compressão axial do concreto a partir de ensaios de esclerometria. **XVII Congresso Internacional sobre patologia e reabilitação das construções**, Fortaleza, 1-8 p. 2021.

SOUSA, Alex Lucena da; SILVA, Iago Rhuan Rocha da; CASTRO, Paulo Henrique de Machado. **Retração térmica e fissuração em concreto por calor de hidratação**. 2014. 108 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SOUZA NETO, João Augusto de; ARAÚJO, Joviano Gonçalves de. **Estudo da influência dos processos de cura na resistência à compressão do concreto convencional**. 2019. 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso - UNIEVANGÉLICA, Anápolis/GO 2019.

SOUZA, Alex Lucena de; Silva, Iago Rhuan Rocha da; Castro, Paulo Henrique Machado. **Retração térmica e fissuração em concreto por calor de hidratação**. 2014. 108 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Goiás Escola de Engenharia civil, Goiânia. 2014.

TELES, Vanessa Yasmine F. da R. et al. A influência do clima tropical sobre a retração e fluência do concreto. In: **CONPAR Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas**, 1-12 p. 2017, Recife.

TERZIAN, Paulo. Prevenção de fissuras por retração plástica de origem climática em pavimentos, pisos e lajes de concreto. **Concreto e Construções – IBRACON**, São Paulo, n. 46, p. 38-41, 2007.

TRINTA, Regina Paula Baldez. **Caracterização do clínquer e comportamento físico-mecânico do cimento**. 2019. 102 p. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Rio de Janeiro, 2019.

VARGAS, Leonardo Borges. **Avaliação das ações térmicas e de retração em uma edificação em paredes de concreto moldadas in loco**. 2021. 78 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2019.

VIÉGAS, D. J. A. (2015). **Utilização da termografia infravermelha em fachadas para verificação de descolamento de revestimento**. 2015. 165p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Pernambuco, 2015.

VIEIRA, Welington Hilário. **Modelagem numérica de estruturas de concreto com variação de temperatura**. 2018. 102 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

WASHER, G., FENWICK, R., BOLLENI, N. (2010), Effects of Solar Loading on Infrared Imaging of Subsurface Features in Concrete, **Journal of Bridge Engineering**, V.15, No. 4, pp. 384-390.

WITTMANN F.H. On the action of capillary pressure in fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 6, p. 49-56, 1976.

YAZIGI, W. **A TÉCNICA DE EDIFICAR**. 17. ed. São Paulo: PINI, 2017