

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JORDANA ROCHA SOUSA

ANÁLISE DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CONCRETO EM BASES DE
AEROGERADORES – ESTUDO DE CASO

Jataí
2023

JORDANA ROCHA SOUSA

**ANÁLISE DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CONCRETO EM BASES DE
AEROGERADORES – ESTUDO DE CASO**

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Marina Augusta Malagoni de Almeida.

Coorientador: Prof. Me. Fábio Santos

JATAÍ
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Sousa, Jordana Rocha.

Análise do calor de hidratação do concreto em bases de aerogeradores – estudo de caso [manuscrito]/ Jordana Rocha Sousa. - Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, 2023.

91 f.; il.

Orientadora: Profa. Dra. Marina Augusta M. de Almeida.

Coorientador: Prof. Me. Fábio Santos.

Bibliografias.

1. Torres eólicas. 2. Calor de hidratação. 3. Métodos de resfriamento. 4. Concreto massa. I. Almeida, Marina Augusta M. de. II. Santos, Fábio. III. IFG, Câmpus Jataí. IV. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.

Bibliotecária – Rosy Cristina Oliveira Barbosa Sabino – CRB 1/2380 – Campus Jataí. Cód. F057/2024-2.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

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

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

Aos 30 dias do mês de maio do ano de dois mil e vinte e três, às 14h30, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Jataí, situado à Avenida Presidente Juscelino Kubitschek, nº 775, Residencial Flamboyant, da cidade de Jataí, Estado de Goiás, foi realizada presencialmente a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso da Graduanda Jordana Rocha Sousa (matrícula: 20191020260066) do curso de Bacharelado em Engenharia Civil, no primeiro semestre do ano de dois mil e vinte e três. A banca foi composta pelos seguintes membros: Marina Augusta Malagoli de Almeida, Vítor Freitas Gonçalves e Mônica Maria Emerenciano Bueno, sob a presidência da primeira. O trabalho de conclusão de curso tem como título: ANÁLISE DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CONCRETO EM BASES DE AEROGERADORES – ESTUDO DE CASO, da área de Engenharia Civil, sob orientação da Profª. Dra. Marina Augusta Malagoli de Almeida. Após a apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso, tendo sido a autora arguida pela Banca Examinadora, a nota obtida foi 9,2. Deliberou-se pela **APROVAÇÃO COM INDICAÇÕES DE CORREÇÃO** a serem providenciadas nos próximos 30 dias.

Encerra-se a presente sessão às 16h05. Eu, Profª. Dra. Marina Augusta Malagoli de Almeida, dato e assino a presente ata que segue assinada eletronicamente por todos os membros da Banca e pela graduanda.

Presidente da Banca/ Orientador: Profª. Dra. Marina Augusta Malagoli de Almeida

Membro Interno: Profª. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno

Membro Externo: Prof. Me. Vítor Freitas Gonçalves

Graduanda: Jordana Rocha Sousa

Documento assinado eletronicamente por:

- Monica Maria Emerenciano Bueno, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 19/06/2023 15:46:40.
- Marina Augusta Malagoli de Almeida, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 15/06/2023 11:32:41.
- Vítor Freitas Gonçalves, Vítor Freitas Gonçalves - 234515 - Docente de ensino superior na área de pesquisa educacional - Ifg - Câmpus Jataí (10870883000306), em 15/06/2023 07:47:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 25/05/2023. 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: 412149

Código de Autenticação: d9aca5e013



JORDANA ROCHA SOUSA

**ANÁLISE DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CONCRETO EM BASES DE
AEROGERADORES – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel e Engenharia Civil.

Monografia defendida e aprovada, em 30 de maio de 2023, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^a Marina Augusta Malagoli de Almeida
Presidente da banca/ Orientadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Me. Fábio Felipe dos Santos
Coorientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof./ Prof^ª. Dr^a Mônica Maria Emerenciano Bueno
Membro Interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Me. Vítor Freitas Gonçalves
Membro Externo
Centro Universitário UNA – Jataí - GO

Jataí,
2023

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: Jordana Rocha Sousa

Matrícula: 20191020260066

Título do Trabalho: ANÁLISE DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CONCRETO EM BASES DE AEROGERADORES – ESTUDO DE CASO

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () 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:

- i. 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;
- ii. 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;
- iii. 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.

Jataí, 31/12/2024

Local

Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as oportunidades concedidas. Agradeço também a minha Mãe, por ter sido meu exemplo e inspiração desde sempre, por ter me ensinado a lutar e buscar minha independência, mesmo que não esteja presente fisicamente, o meu sucesso devo a você. Obrigada por ter sido colo, afago, ensinamento e agora, memória.

RESUMO

O avanço das tecnologias de construção de torres eólicas resultou em aerogeradores de maiores alturas e, por consequência, maiores volumes de fundações, sendo este intimamente ligado com o calor de hidratação do concreto. Os métodos de resfriamento são utilizados diante da necessidade de diminuir o calor gerado pelo concreto massa, sendo assim, este trabalho propõe uma análise estatística, relacionada ao calor de hidratação e as variáveis envolvidas em uma comparação com os reais comportamentos, a partir da verificação da temperatura de concretagem de bases de aerogeradores, em uma situação de estudo de caso de um parque eólico localizado no Rio Grande do Norte - Brasil. Foram propostas análises das concretagens de 62 bases de aerogeradores, a partir do software MATLAB®, a fim de traçar o comportamento verificado pelos dados da amostra. Como resultados, a análise de variáveis aleatórias mostrou-se mais favorável pelas diferentes condições as quais as fundações estão submetidas. As análises comprovaram a eficiência do método de resfriamento utilizando a adição de gelo ao emassamento e o atendimento ao modelo de comportamento previsto.

Palavras-chave: Torres eólicas; Calor de hidratação; Métodos de resfriamento; Concreto massa.

ABSTRACT

The advancement of wind tower construction technologies resulted in wind turbines with greater heights and, consequently, greater volumes of foundations, which is closely linked with the heat of hydration of concrete. Cooling methods are used in view of the need to reduce the heat generated by the concrete mass, therefore, this work proposes a statistical analysis, related to the hydration heat and the variables involved in a comparison with the real behaviors, from the verification of the concreting temperature of wind turbine bases, in a case study situation of a wind farm located in Rio Grande do Norte - Brazil. Analyzes of the concreting of 62 bases of wind turbines were proposed, from the MATLAB® software, in order to trace the behavior verified by the sample data. As a result, the analysis of random variables proved to be more favorable due to the different conditions to which foundations are subjected. The analyzes proved the efficiency of the cooling method using the addition of ice to the mix and the fulfillment of the predicted behavior model.

Keywords: Wind towers; Heat of hydration; Cooling methods; Mass concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Evolução da altura das torres com a potência das turbinas.	20
Figura 2-2 - Velocidade média do vento - estudo de caso.....	22
Figura 2-3 - Direção do vento - estudo de caso.....	23
Figura 2-4 - Velocidade do vento - estudo de caso.	23
Figura 2-5 - Incidência do vento - estudo de caso.....	24
Figura 2-6 - Principais impactos negativos no meio social, com a instalação de Parques Eólicos, registradas em artigos científicos publicados em periódicos nos últimos 10 anos (2006-2016).	25
Figura 2-7 - Principais Impactos negativos causados no meio faunístico decorrentes da instalação de Parques Eólicos, registradas em artigos científicos publicados em periódicos nos últimos 10 anos (2006-2016).....	26
Figura 2-8 - Principais Impactos negativos causados no meio físico decorrentes da instalação de Parques Eólicos, registradas em artigos científicos publicados em periódicos nos últimos 10 anos (2006-2016).....	26
Figura 2-9 - Componentes de um aerogerador.	28
Figura 2-10 - Exemplo do padrão de variação de temperatura que ocasiona fissuração interna no concreto massa.....	30
Figura 2-11 - Exemplo do padrão de mudança de temperatura que causa fissuras externas no concreto massa.....	31
Figura 2-12 - Taxa de liberação de calor de uma pasta de cimento Portland durante o período de pega e endurecimento precoce.....	33
Figura 2-13 - Adições do Cimento Portland.....	34
Figura 2-14 - Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.....	36
Figura 2-15 - Relação tração/compressão.	37
Figura 2-16 - Resumo do processo da reação álcali-agregado.	39
Figura 2-17 - Ocorrência de fissuras térmicas no concreto.	41
Figura 2-18 - Efeito da temperatura do concreto fresco na distribuição de temperatura máxima (a) lançamento a 10°C e (b) lançamento a 25°C.	44

Figura 2-19 - Efeito da pozolana na temperatura do concreto.	47
Figura 2-20 -Efeitos dos tubos de resfriamento internos.....	48
Figura 2-21 - Circulação de água em serpentina.	49
Figura 2-22 - Relação entre a espessura de camadas de concretagem e a temperatura máxima.	50
Figura 2-23 - Relação entre intervalo de colocação e temperatura máxima.	51
Figura 2-24 - Usinas Eólicas em operação no território brasileiro - consulta realizada em out/22 a partir de software Ecotx.....	52
Figura 2-25 - Variação climática em território brasileiro.....	53
Figura 2-26 - Relação entre volume (V) e a temperatura da água (θ).	55
Figura 3-1 - Posicionamento dos termopares nas bases de aerogeradores.	58
Figura 3-2 - Seção transversal do bloco de fundação com dimensões, cotas e tipos de concretos utilizados.....	59
Figura 3-3 - Termopar modelo TP-01 F.	60
Figura 3-4 - Data Logger modelo LogBox AA IP-65.	60
Figura 4-1 - Elenco de informações contidas no boxplot.....	63
Figura 4-2 – Boxplot do termopar A - todas as bases estudadas.....	63
Figura 4-3 - Continuidade de temperaturas médias para o Termopar A.	64
Figura 4-4 - Boxplot do termopar B - todas as bases estudadas.....	65
Figura 4-5 - Continuidade de temperaturas médias para o Termopar B.	66
Figura 4-6 - Boxplot do termopar C- todas as bases estudadas.....	66
Figura 4-7 - Continuidade de temperaturas médias para o Termopar C.	67
Figura 4-8 - Boxplot do termopar D - todas as bases estudadas.....	68
Figura 4-9 - Continuidade de temperaturas médias para o Termopar D.	69
Figura 4-10 - Boxplot do termopar A - Base 1.....	70
Figura 4-11 - <i>Boxplot</i> do termopar A - Base 2.	71
Figura 4-12 - <i>Boxplot</i> do termopar A - Base 3.	72
Figura 4-13 - <i>Boxplot</i> do termopar A - Base 4.	73
Figura 4-14 - <i>Boxplot</i> do termopar A - Base 5.	74
Figura 4-15 - <i>Boxplot</i> do termopar B - Base 1.	75
Figura 4-16 - <i>Boxplot</i> do termopar B - Base 2.	76
Figura 4-17 - <i>Boxplot</i> do termopar B - Base 3.	77

Figura 4-18 - <i>Boxplot</i> do termopar B - Base 5.	77
Figura 4-19 - <i>Boxplot</i> do termopar B - Base 4.	78
Figura 4-20 - <i>Boxplot</i> do termopar D - Base 1.	79
Figura 4-21 - <i>Boxplot</i> do termopar D - Base 2.	79
Figura 4-22 - <i>Boxplot</i> do termopar D - Base 3.	80
Figura 4-23 - <i>Boxplot</i> do termopar D - Base 4.	80
Figura 4-24 - Evolução esperada para as temperaturas em cada camada.....	81
Figura 4-25 - Comportamento de concretagem de base LEI 04-12.	82
Figura 4-26 - Temperaturas máximas alcançadas em V1, V2, V3 e V4 com a variação de temperatura de lançamento em 15°C (S1), 25°C (S2) e 35°C (S3).....	83
Figura 4-27 - Temperaturas médias máximas e mínimas por camada de concretagem.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Pesos atribuídos a cada critério de modelagem.....	21
Tabela 2.2 - Composição do cimento Portland.....	35
Tabela 2.3 - Classificação das anomalias causadas por deformação excessiva da estrutura de concreto (deformação lenta).	42
Tabela 2.4 - Estudos que utilizaram nitrogênio líquido como método de pré-resfriamento. ...	46
Tabela 4.1 - Temperatura médias de lançamento do concreto.	84

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	INSTALAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS	19
2.1.1	Estudo de instalação de parques eólicos	20
2.1.2	Impactos Ambientais	24
2.1.3	Esquema construtivo de Aerogeradores	27
2.2	CONCRETO MASSA	29
2.3	HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	31
2.4	CIMENTO PORTLAND	34
2.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	36
2.6	REAÇÃO ALCALI-AGREGADO.....	38
2.7	FISSURAÇÃO.....	40
2.8	MÉTODOS DE RESFRIAMENTO	42
2.8.1	Adição de Gelo	43
2.8.2	Nitrogênio Líquido	45
2.8.3	Uso de Adições.....	46
2.8.4	Tubos de Resfriamento.....	48
2.9	CONCRETAGENS EM CAMADAS	49
2.10	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA AMBIENTE EM CONCRETAGENS	51
2.10.1	Concretagem sob altas temperaturas	54
2.10.2	Concretagem sob baixas temperaturas	55
3.	METODOLOGIA	57
3.1	COLETA DE DADOS.....	58
3.1.1	Sensores de temperatura utilizados	59
3.2	ANÁLISE DE DADOS	61
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62

4.1	COMPORTAMENTO AMOSTRAL DAS CONCRETAGENS	62
4.2	COMPORTAMENTO DE BASES ALEATÓRIAS	70
4.3	COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS CAMADAS DE CONCRETAGEM	81
5.	CONCLUSÃO	86
6.	REFERÊNCIAS	87
7.	ANEXOS	91

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Segundo Chastre e Lúcio (2014), um dos resultados da industrialização foi o desenvolvimento de grandes moinhos de vento para gerar eletricidade. Os primeiros aerogeradores apareceram na Dinamarca por volta de 1890.

Atualmente, a energia eólica tem sido utilizada em grande escala no mundo por ser uma tecnologia de geração de energia elétrica renovável, competitiva e confiável (RAMPINELLI; JUNIOR, 2012). Segundo os autores, a necessidade de diversificação da matriz energética é explicada a partir do interesse de minimização dos problemas ambientais.

Para Panwar, Kaushik e Kothari (2011), as tecnologias renováveis são consideradas fontes sustentáveis de energia que possibilitam a redução dos impactos ambientais pela minimização dos resíduos secundários, oferecendo a oportunidade de diminuição de emissão dos gases do efeito estufa e redução do aquecimento global por meio da substituição de fontes de energia convencionais, como a eólica.

De acordo com Panwar, Kaushik e Kothari (2011, p. 5) “das tecnologias de energia renovável aplicadas à geração de eletricidade, a energia eólica só perde para a hidrelétrica em termos de capacidade instalada e está experimentando um rápido crescimento” a nível mundial.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (ABEEÓLICA, 2021), 2021 foi um ano recorde de instalações de nova capacidade eólica no país. Considerando todas as fontes de geração de energia elétrica, em 2021, foram instalados 7,5 GW de potência e a eólica foi a fonte que mais cresceu, representando 50,91% da nova capacidade instalada no ano. Diante desse fato, a compreensão dos fenômenos envolvidos na construção dos aerogeradores torna-se necessária.

Como as torres dos aerogeradores são elementos esbeltos, a estrutura da fundação recebe cargas elevadas e, normalmente, precisa ser maior e/ou mais profunda que as estruturas convencionais, o que resulta em um elevado volume de concreto. Tais estruturas são conhecidas pelo termo “concreto massa”.

Um dos problemas desse tipo de estrutura é a concentração do calor de hidratação do cimento, levando à uma diferença de temperatura grande entre o interior e o exterior da peça estrutural, o que pode provocar fissuras, afetando a segurança estrutural e o uso normal do elemento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A fim de evitar esse tipo de problema, tornam-se necessários estudos que validem os procedimentos utilizados atualmente para reduzir o calor de hidratação dos blocos de fundação dos aerogeradores.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo de caso sobre a temperatura de concretagem de bases de aerogeradores em uma usina no Rio Grande do Norte. Foram coletados dados de temperatura de 62 bases e esses são comparados entre si e também com dados da literatura que utilizaram o mesmo método de resfriamento, a saber adição de gelo.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão subdivididos em objetivos gerais e específicos, sendo abordados individualmente a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a eficiência do método de resfriamento utilizado na execução das 62 bases de aerogeradores em uma usina no Rio Grande do Norte por meio da determinação do modelo probabilístico seguido pelas amostras.

1.1.2 Objetivos Específicos

Podem ser citados como objetivos específicos do presente trabalho:

- Detalhar os efeitos do calor de hidratação no processo de cura do concreto e as possíveis intervenções para seu resfriamento;

- Realizar a comparação gráfica do comportamento das fundações executadas com os dados esperados a partir do estudo de implantação do parque eólico;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão tratados aspectos gerais a respeito da instalação de parques eólicos e do estudo do calor de hidratação em bases de aerogeradores, expondo as características técnicas do tema que posteriormente serão utilizadas para analisar os dados do estudo de caso.

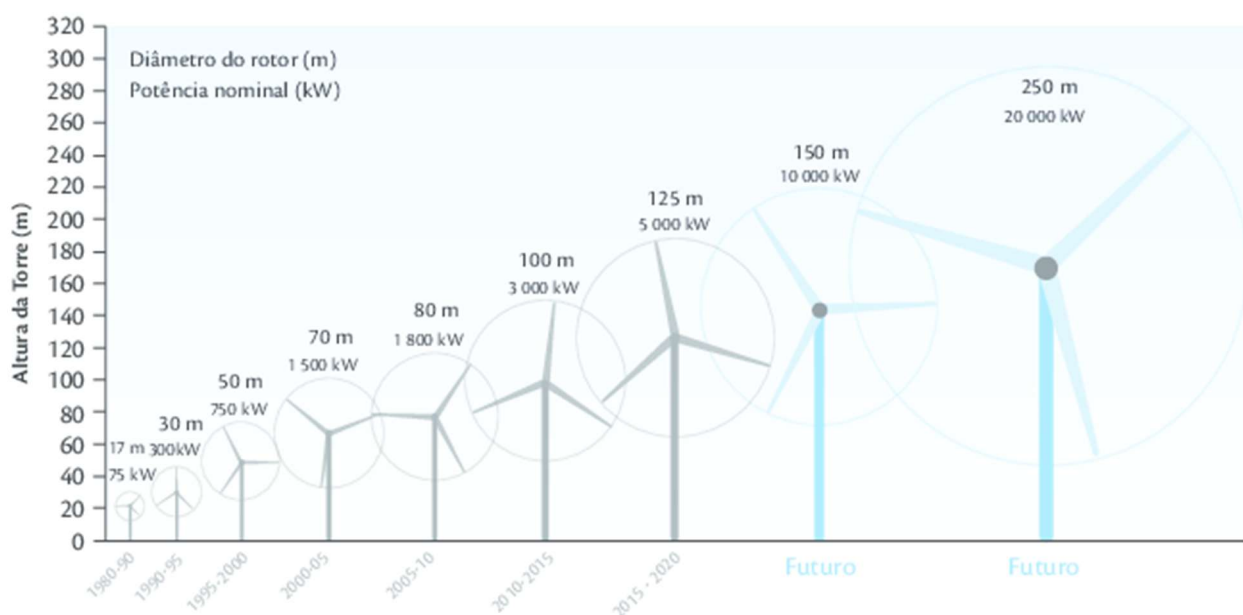
2.1 INSTALAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS

A utilização de fontes renováveis de geração de energia surge como alternativa para a redução dos impactos ambientais dos combustíveis fósseis e para o suprimento de parte da demanda crescente de energia elétrica (RAMPINELLI; JUNIOR, 2012).

Só no século XXI, o concreto armado aparece como alternativa às torres de aço (CHASTRE; LÚCIO, 2014). A crescente modernização das torres resultou em peças de maiores alturas e consequentemente, maiores espessuras de parede, quantidade de aço empregado e até mesmo volume de fundação.

Como exposto pela Figura 2-1, a altura das torres está intimamente relacionada com a eficiência energética, sendo assim, sua altura mais que quadruplicou desde seu início. Algumas limitações ainda são intransponíveis, como o custo e diâmetros máximos, por questões de transporte e até mesmo produção dificultada pela magnitude dos componentes.

Figura 2-1 - Evolução da altura das torres com a potência das turbinas.



Fonte: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2011 – adaptado pelo autor.

A distribuição de instalação de aerogeradores pode ser no mar (*offshore*) ou em terra (*onshore*). Dentre os materiais de composição das torres destaca-se o concreto pré-moldado, aço e concreto armado.

2.1.1 Estudo de instalação de parques eólicos

O vento é causado pelo aquecimento desigual da superfície da Terra gerado pela diferença na pressão atmosférica (CHASTRE; LÚCIO, 2014). A velocidade do vento é uma variável aleatória e, portanto, a avaliação do potencial eólico exige uma análise probabilística, com registros da velocidade e da direção do vento, em pelo menos duas alturas distintas, referentes ao local onde se pretende instalar o parque eólico (PESSANHA; FRAGOSO; BELTRÃO, 2010).

Segundo Miller e Li (2014), a metodologia para escolha de áreas prioritárias para instalação de parques eólicos segue 5 variáveis, sendo estas avaliadas com uma nota de 0 a 4, onde 4 representa a maior adequabilidade da área. Essas variáveis são apresentadas a seguir:

- Velocidade do vento – Preferíveis maiores velocidades médias do vento, analisado a 50 metros de altura;
- Uso da terra – Menor impacto, buscando manter sua originalidade;
- Linhas de transmissão – Proximidade com linhas já existentes, dispensando os custos para instalação de novas linhas;
- Declividade – Grandes declividades são prejudiciais devido a custos com construção;
- Densidade populacional – Busca de locais com menores densidades devido a possíveis resistências quanto a instalação dos parques eólicos.

De acordo com o grau de relevância de cada critério, é importante aplicar pesos de forma a adequar a análise das áreas, conforme Tabela 2.1.

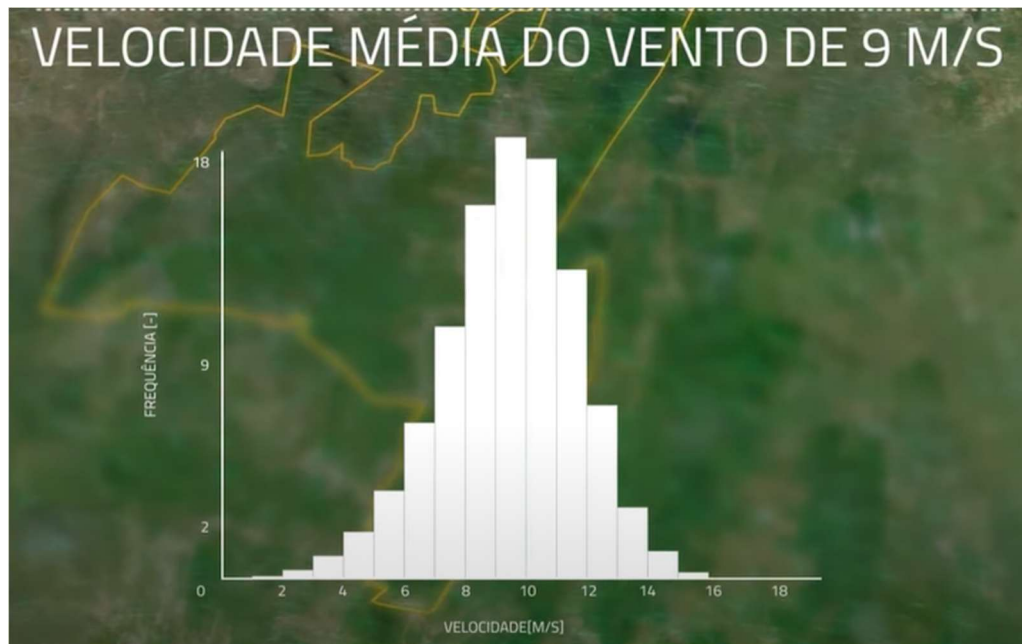
Tabela 2.1 - Pesos atribuídos a cada critério de modelagem.

CAMADA	PESO ATRIBUÍDO
Velocidade do Vento	3
Declividade	2
Uso da terra	2
Distância a linha de transmissão	2
Distância a estradas	2
Densidade populacional	1

Fonte: MILLER; LI, 2014 – adaptada pelo autor.

Para o estudo de implantação do parque eólico em questão, foram instaladas 13 torres anemométricas a partir das quais foram realizadas medições durante 6 anos. Conforme verificação a partir da Figura 2-2, é possível observar uma velocidade média de 9 m/s para a área do empreendimento, sendo uma das maiores médias obtidas.

Figura 2-2 - Velocidade média do vento - estudo de caso.



Fonte: CATEC CONSULTORIA E ASSESSORIA TÉCNICA EM ENGENHARIA LTDA, 2022.

Conforme Miller e Li (2014), médias de velocidade acima de 7,5 m/s são consideradas de alto desempenho, sendo este o caso do empreendimento em estudo. A não oscilação da direção do vento, representada pela Figura 2-3, revela o potencial de geração da usina, já que está diretamente relacionada com o aproveitamento do seu efetivo.

Figura 2-3 - Direção do vento - estudo de caso.



Fonte: CATEC CONSULTORIA E ASSESSORIA TÉCNICA EM ENGENHARIA LTDA, 2022.

Outro fator de destaque é a manutenção da incidência dos ventos durante todo o dia, como exposto pela Figura 2-4. A constância da velocidade do vento dispensa sobredimensionamento dos componentes em casos de picos, já que os valores possuem pouca variância, apresentando um bom desempenho continuamente.

Figura 2-4 - Velocidade do vento - estudo de caso.



Fonte: CATEC CONSULTORIA E ASSESSORIA TÉCNICA EM ENGENHARIA LTDA, 2022.

Por fim, é de conhecimento que a meteorologia afeta diretamente os ventos, sendo assim, a disponibilidade dos mesmos durante todo o ano é uma qualidade indispensável, como pode ser verificado a partir da Figura 2-5.

Figura 2-5 - Incidência do vento - estudo de caso.



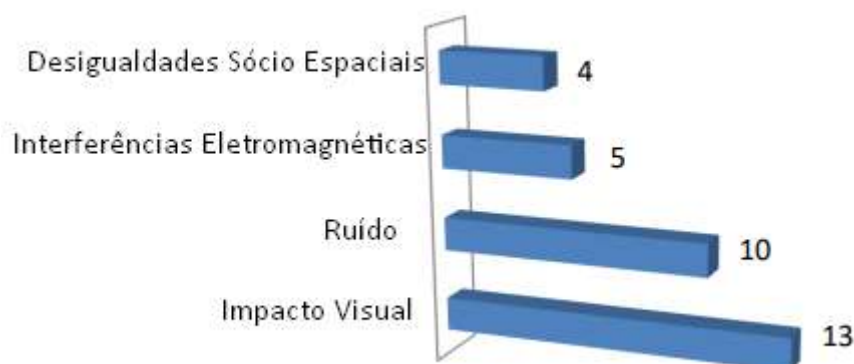
Fonte: CATEC CONSULTORIA E ASSESSORIA TÉCNICA EM ENGENHARIA LTDA, 2022.

2.1.2 Impactos Ambientais

Os impactos ambientais dos parques eólicos se aplicam ao processo de instalação, duração e finalização das atividades. Dentre os principais impactos estudados, destaca-se o dano ao meio social, físico e faunístico (ARAÚJO; MOURA, 2017).

Segundo Araújo e Moura (2017), o meio social, ou seja, aquele compreendido pelos habitantes, é o mais prejudicado, sendo seguido pelo dano à fauna e ao espaço físico. A Figura 2-6 expõe as principais desvantagens para o meio social.

Figura 2-6 - Principais impactos negativos no meio social, com a instalação de Parques Eólicos, registradas em artigos científicos publicados em periódicos nos últimos 10 anos (2006-2016).



Fonte: ARAÚJO; MOURA, 2017.

Além do impacto visual, agente de maior interferência pela dimensão dos aerogeradores, o ruído também provoca grande desconforto aos moradores locais pela perturbação sonora contínua, que se inicia na construção e permanece durante todo o período de operação.

Não menos importante, as interferências eletromagnéticas também são destacadas por Araújo e Moura (2017), apresentando-se como fator de impacto por afetar o funcionamento de diversos aparelhos eletrônicos, como celulares e rádios. Com um menor grau de impacto, as desigualdades sócio espaciais se fazem presentes devido à convivência forçada com um grande contingente de trabalhadores ou até mesmo pelo impedimento de circulação pelas atividades em operação.

Para o meio faunístico, o principal impacto é a colisão dos animais, em especial aves e morcegos com as pás dos aerogeradores, como pode ser verificado a partir da Figura 2-7.

Figura 2-7 - Principais Impactos negativos causados no meio faunístico decorrentes da instalação de Parques Eólicos, registradas em artigos científicos publicados em periódicos nos últimos 10 anos (2006-2016).

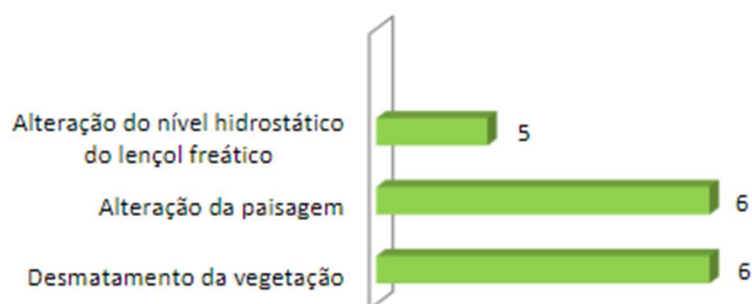


Fonte: ARAÚJO; MOURA, 2017.

As aves são as mais afetadas pela colisão com as pás dos aerogeradores, seguida pela perda do habitat causado pela devastação gerada pela instalação dos parques. Outro fator de impacto é a movimentação de veículos, principalmente durante a noite, que pode causar diversos acidentes, sendo os morcegos e outros animais os mais atingidos.

Em relação às características físicas, a alteração do ambiente revela-se como principal fator de desvantagem, como pode ser observado na Figura 2-8, podendo, por falta de correto manejo, ser definitivo.

Figura 2-8 - Principais Impactos negativos causados no meio físico decorrentes da instalação de Parques Eólicos, registradas em artigos científicos publicados em periódicos nos últimos 10 anos (2006-2016).



Fonte: ARAÚJO; MOURA, 2017.

Além dos impactos ambientais causados pela instalação das usinas, há também os produtos residuais provocados quando expirado seu período de operação, sendo de 20 a 25 anos a vida útil dos parques.

Com o fim da vida útil dos parques eólicos surgem muitas incertezas sobre como proceder com o descomissionamento, ou seja, o desmonte das usinas, pois os regulamentos ainda estão sendo formulados e estão sujeitos a revisão em alguns casos (TOPHAM et al., 2019).

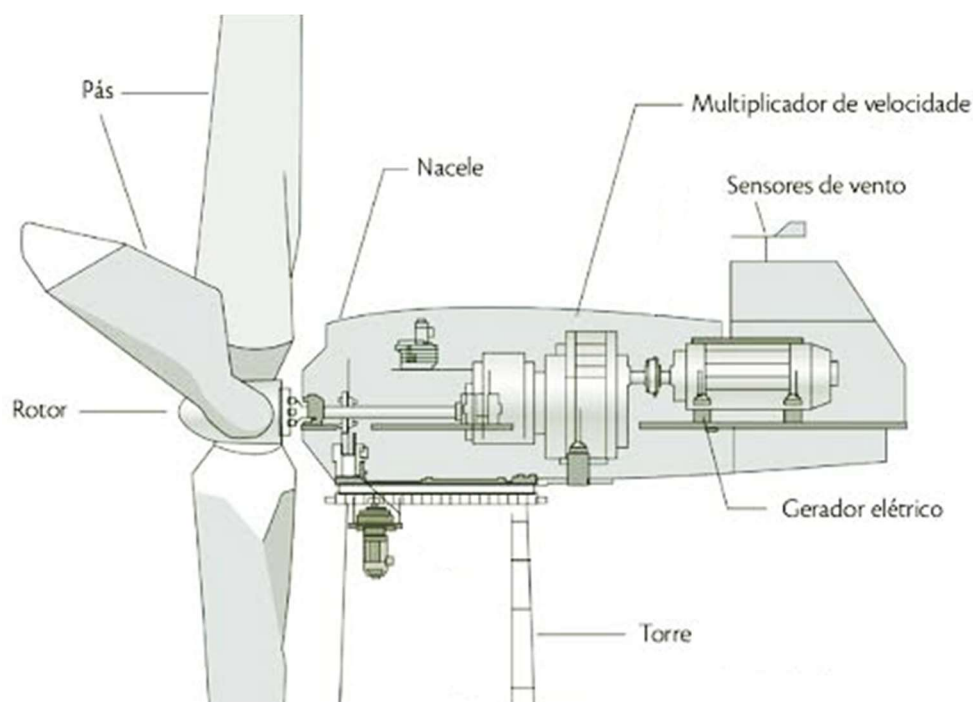
Por fim, de forma a minimizar os impactos gerados, pelo decreto do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA¹) se estabeleceu a participação dos parques eólicos no mercado de créditos de carbono, de forma que qualquer empreendimento possa participar desse mercado. A compensação de carbono permite que indivíduos e empresas reduzam as emissões inevitáveis patrocinando projetos que aumentam a absorção de CO_2 , como projetos de energia renovável, eficiência energética e projetos de reflorestamento (SATO, 2011).

2.1.3 Esquema construtivo de Aerogeradores

O esquema construtivo de aerogeradores segue uma sequência lógica de montagem e logística, já que os componentes possuem grandes dimensões e devem ser adequadamente programados para que não afetem todo o fluxo de um parque eólico. Os componentes podem ser verificados a partir da Figura 2-9, e são descritos individualmente a seguir.

¹ Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica criado pelo governo em 2002 (Lei nº 10.438/2002) com o objetivo de diversificar a matriz energética brasileira e fomentar a presença de fontes alternativas de energia.

Figura 2-9 - Componentes de um aerogerador.



Fonte: WINDBOX, 2022.

- Pás: Componente que, ao se mover ao redor de um eixo, gera energia. Geralmente fabricada em epóxi reforçada com fibra de vidro, poliéster ou fibra de carbono;
- Nacele: Estação de operação e manutenção, abrigando diversos componentes do aerogerador, podendo chegar a 100 toneladas, sendo a parte mais pesada da estrutura;
- Multiplicador de velocidade: Também conhecida por caixa de transmissão ou “*gear box*”, é onde ocorre a amplificação da velocidade oriunda do rotor, sendo transmitida ao gerador;
- Sensores de vento: Composto por anemômetros e biruta. Os equipamentos fazem a medição da velocidade e direção do vento;
- Gerador: Componente responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica. Fica localizado no interior da nacele;
- Rotor: Composto pelo conjunto de pás e cubo, peça que une as pás. É o componente que possibilita a obtenção de energia dos ventos obtida pela rotação das pás;

- Torre: Peça de sustentação, diretamente ligada a nacele, podendo ser constituída de aço, concreto ou estrutura treliçada.

2.2 CONCRETO MASSA

De acordo com Gambale (2017), o concreto massa pode ser definido como aquela estrutura de dimensões suficientes para causar um aquecimento em seu interior, requerendo adoção de medidas para que sejam reduzidos os índices de fissuração. Cabe destacar que atualmente não se tem uma norma que regulamente a utilização do concreto massa, sendo as diretrizes utilizadas oriundas de contribuições individuais de diversos pesquisadores sobre o tema.

Conforme Yikici, Sezer e Chen (2022), a temperatura dentro do núcleo de concreto aumenta rapidamente durante os primeiros dias após a concretagem, enquanto a superfície do elemento perde calor para o ambiente circundante. As discrepâncias de temperatura geram tensões de tração, aumentando o risco de fissuração.

A característica crucial do concreto massa é, portanto, seu comportamento térmico. O objetivo primordial do projeto para esse tipo de concreto é evitar ou reduzir e controlar a largura e o espaçamento das fissuras (NEVILLE, 2016).

A hidratação do cimento Portland gera liberação de calor que, por sua vez, leva à dilatação do concreto. Em seguida, devido à perda de calor para o ambiente, ocorre o resfriamento e uma contração do elemento concretado. Segundo Neville (2016), a existência de restrições aos movimentos de dilatação e contração do concreto leva ao aparecimento das fissuras, podendo ser internas ou externas.

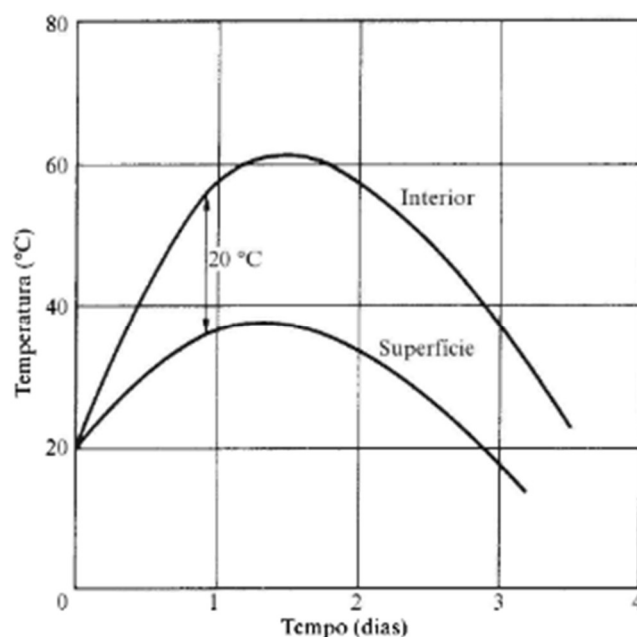
As restrições internas podem ser decorrentes do diferencial de temperatura entre o exterior, mais frio, e o núcleo quente do elemento de concreto. Para Neville (2016), caso as tensões de tração na superfície do elemento, decorrentes da dilatação do núcleo, sejam maiores do que a resistência à tração do concreto ou resultem em deformação por tração maior do que sua capacidade, ocorrerá a fissuração superficial (externa).

Elas também podem ser o resultado do lançamento do concreto em superfícies com uma temperatura muito inferior, como no solo frio ou em fôrmas sem isolamento em tempo frio. Nessas situações, conforme disposto por Neville (2016), as diferentes partes do elemento de

concreto entram em pega em diferentes temperaturas. Posteriormente, quando o núcleo do elemento de concreto esfria, sua contração térmica é restringida pela parte externa, já resfriada, o que pode ocasionar a fissuração no interior do elemento.

A exposição da Figura 2-10 e Figura 2-11 apresenta exemplos de variações de temperatura que levam à fissuração quando a diferença de temperatura entre interior e superfície é maior do que 20°C, limite sugerido por Neville, (2016).

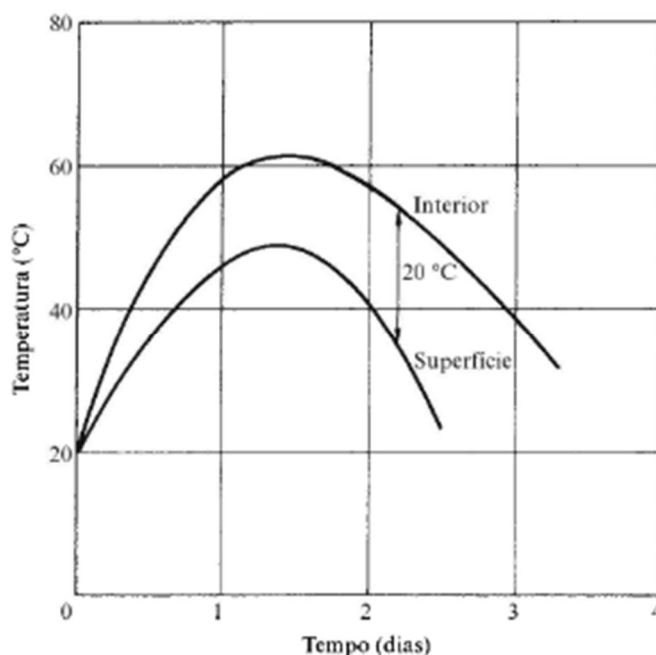
Figura 2-10 - Exemplo do padrão de variação de temperatura que ocasiona fissuração interna no concreto massa.



Fonte: NEVILLE, 2016.

Como estabelecido por Neville (2016, p. 412), “a diferença de temperatura crítica de 20°C ocorre durante o aquecimento, mas as fissuras surgem somente quando o interior tiver sido resfriado em função de uma variação de temperatura maior do que o exterior”.

Figura 2-11 - Exemplo do padrão de mudança de temperatura que causa fissuras externas no concreto massa.



Fonte: NEVILLE, 2016.

Segundo Neville (2016, p. 411), “a diferença de temperatura crítica de 20°C ocorre durante o resfriamento e as fissuras surgem somente quando o interior tiver sido resfriado em função de uma variação de temperatura maior do que o exterior”, fato evidenciado pela Figura 2-10. Como forma de minimizar estas variações, os métodos de resfriamento se constituem em alternativas de grande eficiência.

2.3 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

Segundo Chastre e Lúcio (2014), a utilização da energia eólica tem variado de acordo com o valor dos combustíveis fósseis, sendo que a busca por uma melhor eficiência resultou em um aumento considerável da altura das torres e, por consequência, do volume das fundações. Algumas limitações são impostas pelo tamanho das bases, que utilizando um volume de 470 a 500 m³ de concreto geram um elevado calor de hidratação. “Devido à baixa condutividade

térmica, as estruturas maciças de concreto, em seu tempo de cura, não conseguem dissipar eficientemente o calor de hidratação do cimento” (TRAN & CHAU, 2021).

O processo de hidratação do cimento consiste em uma reação química exotérmica, em que há a mistura do cimento com a água. Essa interação garante as propriedades adesivas, assim como a qualidade de pega e adesão.

Mehta e Monteiro (2014) descrevem o processo de enrijecimento:

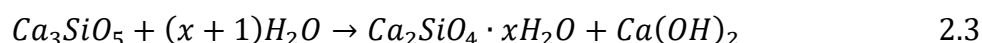
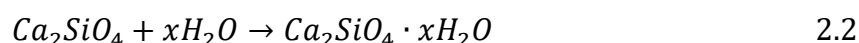
O enrijecimento é a perda de consistência da pasta plástica de cimento e está associado ao fenômeno da perda de abatimento do concreto. A água livre em uma pasta de cimento é responsável por sua plasticidade. A perda gradual de água livre do sistema devido às reações de hidratação, a adsorção física na superfície de produtos de hidratação pouco cristalinos, como etringita e concreto de alta resistência, e a evaporação faz com que a pasta enrijeça e, eventualmente, endureça. (MEHTA & MONTEIRO, 2014, p. 145).

De acordo com Tran e Chau (2021), fica claro atribuir o aumento de temperatura durante a fase de cura do concreto à quantidade de cimento utilizada na proporção da mistura do concreto. Os níveis elevados de calor liberado geram uma expansão seguida por contração volumétrica, podendo provocar fissurações.

Segundo Gambale (2017), a quantidade total, velocidade de hidratação e liberação do calor dependem da quantidade de cimento utilizado e de condições climáticas relativas ao lançamento. Podem depender também de aspectos geométricos e dimensionais do objeto de concretagem, assim como do consumo de agregado utilizado na produção do concreto, que está diretamente ligado à sua capacidade de absorção de água.

O significado do calor de hidratação na tecnologia do concreto é múltiplo (ABDUL AWAL; WARID HUSSIN, 2011). Segundo os autores, além de caracterizar os processos de pega, endurecimento e aumento de temperatura, os índices de reatividade dos compostos podem ser associados à quantidade de calor liberado e às taxas de sua liberação.

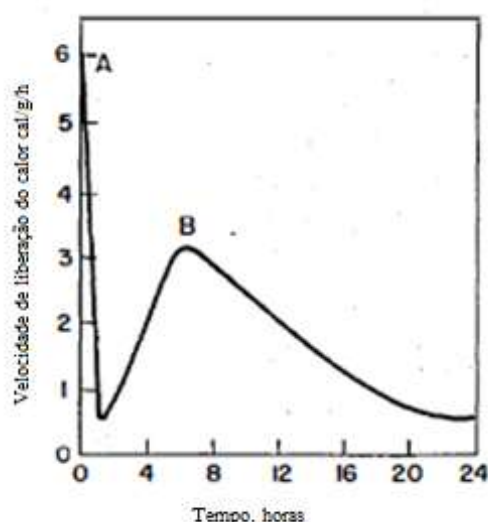
O cimento não ganha resistência por sua secagem, mas por suas reações químicas de hidratação, como podem ser verificadas pelas Equações 2.1 a 2.3. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a dispersão do cimento em água provoca a dissolução do cálcio em altas temperaturas, saturando a solução com íons, como sulfatos, aluminatos, íons de cálcio e de hidroxila, que posteriormente formarão cristais chamados de etringita.



A Figura 2-12 apresenta a reação do cimento puro com a água com consequente aumento de calor, atingindo o ponto A (máximo de liberação) e permanecendo por alguns minutos. Segundo Mehta e Monteiro (2014), isso provavelmente representa o calor de dissolução dos aluminatos e dos sulfatos.

A solubilidade dos aluminatos é reduzida pela presença dos sulfatos, diminuindo a evolução do calor para um limiar abaixo de A. O pico B, apresentado após 4 a 8 horas, representa o calor de formação de etringita, que é um produto normal da hidratação do cimento.

Figura 2-12 - Taxa de liberação de calor de uma pasta de cimento Portland durante o período de pega e endurecimento precoce.



Fonte: MEHTA & MONTEIRO, 2014.

A incorporação de adições minerais, como sugerido no item 0, não só geram uma economia de custo na produção do Cimento Portland, mas também podem trazer uma redução da quantidade de calor liberada durante a sua hidratação. No caso dos concretos massa, apenas a substituição do clínquer por adições não é suficiente para combater as patologias associadas, seja a reação álcali-agradado (no caso de agregados reativos), seja a fissuração. Nesses casos, são utilizados métodos de resfriamento do concreto ou de seus componentes (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Diante do exposto, torna-se imperativo estudar os métodos de resfriamento empregados na atualidade para evitar as patologias discutidas anteriormente. Essa discussão é apresentada a seguir.

2.4 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland possui propriedades aglomerantes que, a partir da mistura com água, se solidifica. Essa reação não é reversível, ou seja, mesmo que submetido à presença de água, o produto final não se decompõe (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Neville (2016), o cimento é composto basicamente por *clínquer*, cujas matérias primas são o calcário, argila, e adições, que diferenciam os diversos tipos de cimento, podendo ser materiais pozzolânicos, materiais carbonáticos ou escórias de alto-forno. As principais características das adições de cimento Portland podem ser verificadas a partir da Figura 2-13.

Figura 2-13 - Adições do Cimento Portland.

Escórias de Alto-forno	Materiais Pozzolânicos	Materiais Carbonáticos
• Obtido durante a produção de ferro-gusa; • Propriedade de ligante hidráulico latente; • Reagem com água, desenvolvendo características aglomerantes; • Maior durabilidade e resistência final.	• Propriedade de ligante hidráulico; • Reagem quando misturados com clínquer e água, tornando-se primeiramente pastosos e depois endurecidos; • Cimento de maior impermeabilidade.	• Melhora a trabalhabilidade dos concretos e argamassas; • Cimento → Fíler calcário;

Fonte: Autor, 2023.

As buscas por melhorias no comportamento do concreto e pela redução da sua pegada de carbono resultaram na produção de diferentes tipos de cimento. O incremento de seu

desempenho foi obtido a partir de alterações de suas características, como o calor de hidratação, resistência à compressão, trabalhabilidade, dentre outros, todos adquiridos a partir das variadas adições aos compostos, como estabelecido pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002), conforme verificado a partir da Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Composição do cimento Portland.

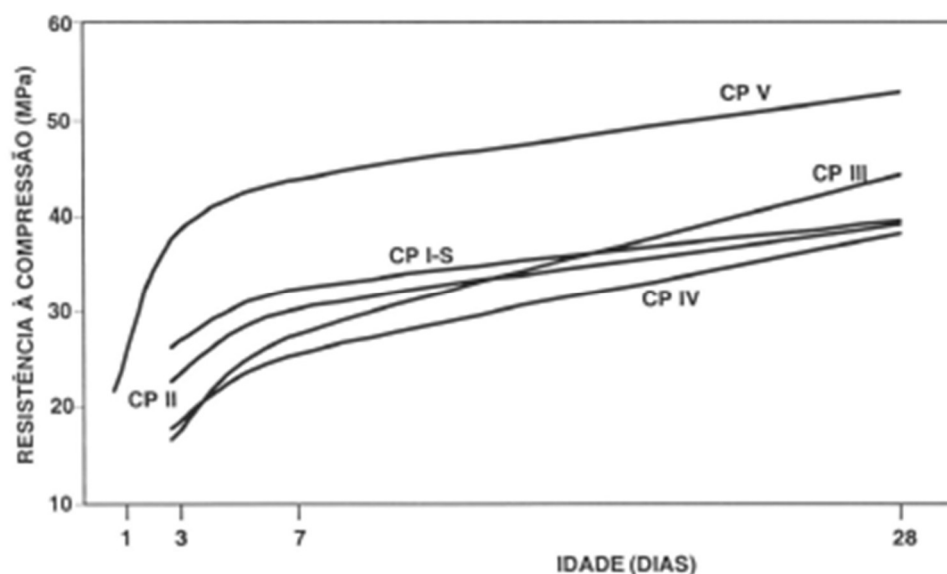
Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (E)	Material pozolânico (Z)	Material carbonático (F)	
Comum	CP I	100	-			NBR 16697-2018
	CP I-S	99-95	1-5			
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 16697-2018
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 16697-2018
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 16697-2018
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 16697-2018

Fonte: ABCP, 2002 - adaptado pelo autor.

Segundo Shabab et al. (2016), o concreto ganha resistência como resultado da hidratação do cimento. O comparativo de resistência entre os diferentes tipos de cimentos pode ser observado na Figura 2-14. Ainda segundo o autor, resultados análogos em termos de resistência à compressão são geralmente observados para teores de ligante² total semelhantes.

² Em ciências dos materiais, ligante é o termo utilizado para se referir a todo material com capacidade cimentante.

Figura 2-14 - Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.



Fonte: ABCP, 2002.

Destina-se a seguir um tópico a respeito da resistência à compressão do concreto, um dos parâmetros mais importantes no estudo do comportamento das estruturas.

2.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

O concreto apresenta dois tipos de resistências que são características cruciais para os projetos de engenharia civil. A resistência característica à compressão (f_{ck}) e a resistência à tração (f_{ctk}).

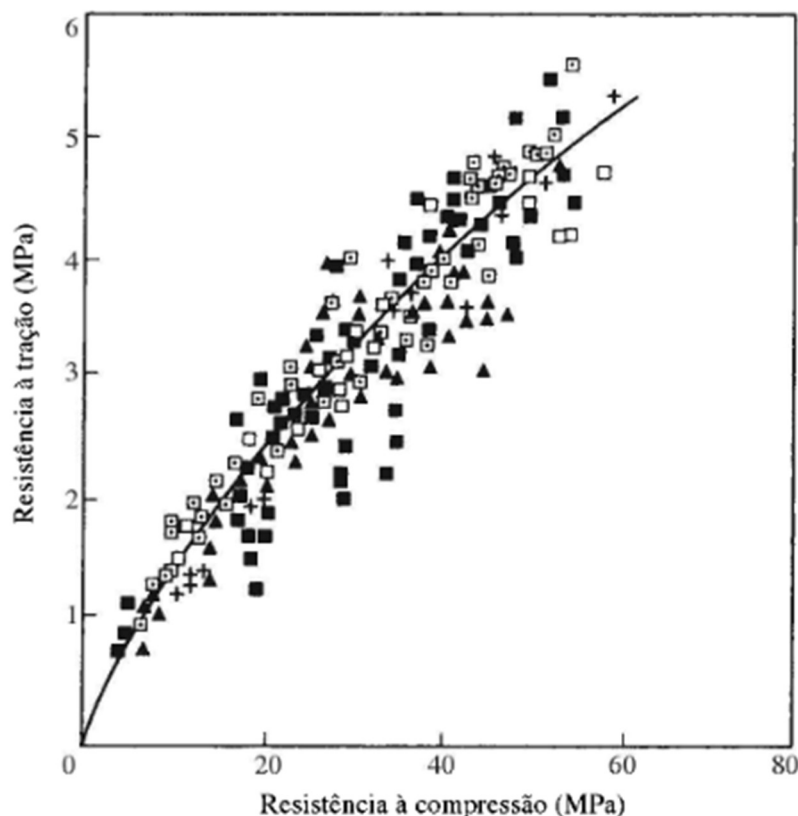
A resistência característica à compressão (f_{ck}), determinada a partir do dimensionamento, destaca-se dentre os parâmetros de qualidade do concreto. Conforme previsto pela norma ABNT NBR 6118 2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, a constatação de conformidade (resistência mínima por classe) é adquirida a partir do rompimento de corpos de prova, com idades de 7 e 28 dias, sendo esta última data utilizada para validação por ser o período estimado de fim de ganho de resistência do concreto (ABNT, 2018).

A resistência à tração do concreto é mais sensível à cura inadequada do que a resistência à compressão, devido, possivelmente, aos efeitos da retração não uniforme nos prismas ensaiados à flexão serem bastante sérios, conforme estabelecido por Neville (2016). A dependência dos

elementos de cura também é reforçada por Xu et al. (2017), interligando o processo de hidratação ao estado de temperatura e umidade.

A composição do concreto pode ser alterada a fim de aumentar a resistência à tração, dentre as alternativas destaca-se o uso de cinzas volante e fibras de aço. A relação entre as resistências de tração e compressão são expressas na Figura 2-15.

Figura 2-15 - Relação tração/compressão.



Fonte: NEVILLE, 2016.

A resistência à tração varia de forma quase linear em relação à resistência à compressão, sendo que as resistências à tração são superestimadas para os baixos valores de compressão e subestimados para os altos valores.

Segundo Neville (2016), a presença de água é um fator crucial para a determinação das resistências, em situações de escassez, ou até mesmo falta, há uma maior diminuição das resistências à compressão do que na resistência à tração.

Sabe-se que a discrepância entre a temperatura interna e externa aumenta o risco de fissuras. Essas, por sua vez, reduzem a durabilidade e a resistência (tração e compressão) do concreto,

assim sendo, nos tópicos a seguir são apresentados temas relacionados à durabilidade do concreto.

2.6 REAÇÃO ALCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado (RAA) é um fenômeno químico que ocorre no concreto endurecido em idades tardias. Envolve a reação entre os álcalis presentes no concreto e certos minerais presentes nos agregados, como a sílica reativa. Essa reação pode resultar na formação de um gel expansivo, que absorve água e causa aumento de volume no concreto. A expansão progressiva pode levar à fissuração e enfraquecimento da estrutura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A durabilidade do concreto foi uma das principais características que o tornou tão popular, sendo assim, a deterioração do concreto a partir da reação álcali-agregado colocou a prova a sua longevidade, já que a correta projeção e execução não isenta sua ocorrência.

Apesar da reação álcali-agregado poder ocorrer em qualquer estrutura, os volumes de concreto massa são mais suscetíveis pela grande variação de umidade e temperatura, o que contribui para a manifestação de patologias. Os fatores que influenciam a velocidade e a intensidade da cinética de reações expansivas são o alto teor de álcalis no concreto, umidade, altas temperaturas, porosidade do concreto e a presença de agregados reativos.

Dentre as formas de evitar a ocorrência de reações álcali-agregado, de acordo com Tang et al. (2015), é possível destacar a utilização de agregados não deletérios e/ou agregados não reativos, a utilização de cimento Portland de baixo teor alcalino ou cimentos misturados com bastantes materiais pozolânicos, a manutenção do concreto o mais seco possível, a utilização de revestimento de controle de difusão e a adição de sais de nitrato.

De acordo com Kihara (1988, p. 131): “Os agregados reativos são aqueles que possuem na sua composição fases mineralógicas que reagem com os álcalis disponíveis (ativos) do cimento provocando reações deletérias no concreto”.

As reações podem ser classificadas em três tipos:

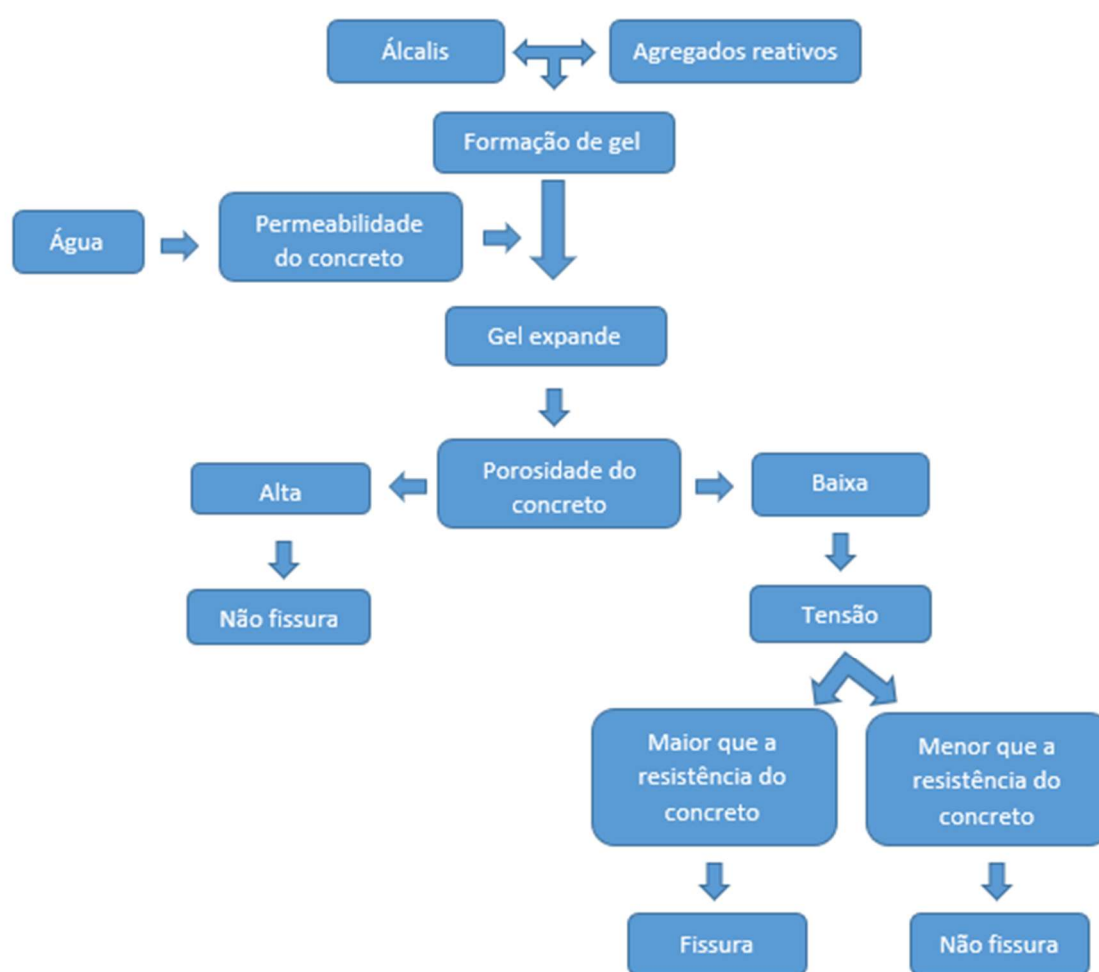
- Reação álcali-sílica – mais conhecida e mais rápida. Com minerais ativos de sílica amorfa;

De acordo com Hoobs (1988), o gel produzido por esse tipo de reação pode apresentar cores diversas, sendo colorido ou branco, ceroso ou aquoso. Carbonatará quando molhado e exposto a dióxido de carbono e aparecerá esbranquiçado quando seco.

- Reação álcali-silicato – semelhante a reação álcali-sílica, sendo mais lenta. É o tipo de reação mais encontrada no Brasil;
- Reação álcali-carbonato – menos comum, velocidade de reação variada. Possui minerais ativos de agregado de calcário dolomítico.

O processo de reação pode ser verificado a partir da Figura 2-16.

Figura 2-16 - Resumo do processo da reação álcali-agregado.



Fonte: FERRARIS, 1995 - adaptado pelo autor.

2.7 FISSURAÇÃO

Um fenômeno muito comum ao concreto massa é a fissuração, ela ocorre devido à superação da resistência pela tensão de tração, provocando pequenas aberturas que comprometem a integridade da estrutura e podem culminar em outras patologias, como a corrosão da armadura. Segundo Wang et al. (2018), a seleção adequada do tipo de cimento é considerada um método simples e eficaz para controlar a formação de fissuras, e assim, cimentos com baixo calor de hidratação devem ser utilizados na maioria das estruturas de concreto massa. Dentre os tipos de cimento é possível destacar as adições já expostas anteriormente: escórias de alto forno, materiais pozolânicos e carbonáticos.

Para Saeed, Rahman e Baluch (2019), a geração de trincas em idade precoce, devido predominantemente a gradientes térmicos e restrições internas/externas, emana da inerente baixa resistência à tração do concreto. A ocorrência de tal patologia compromete o desempenho estrutural, interferindo ativamente na integridade do concreto massa, como destacam Tran e Chau (2021):

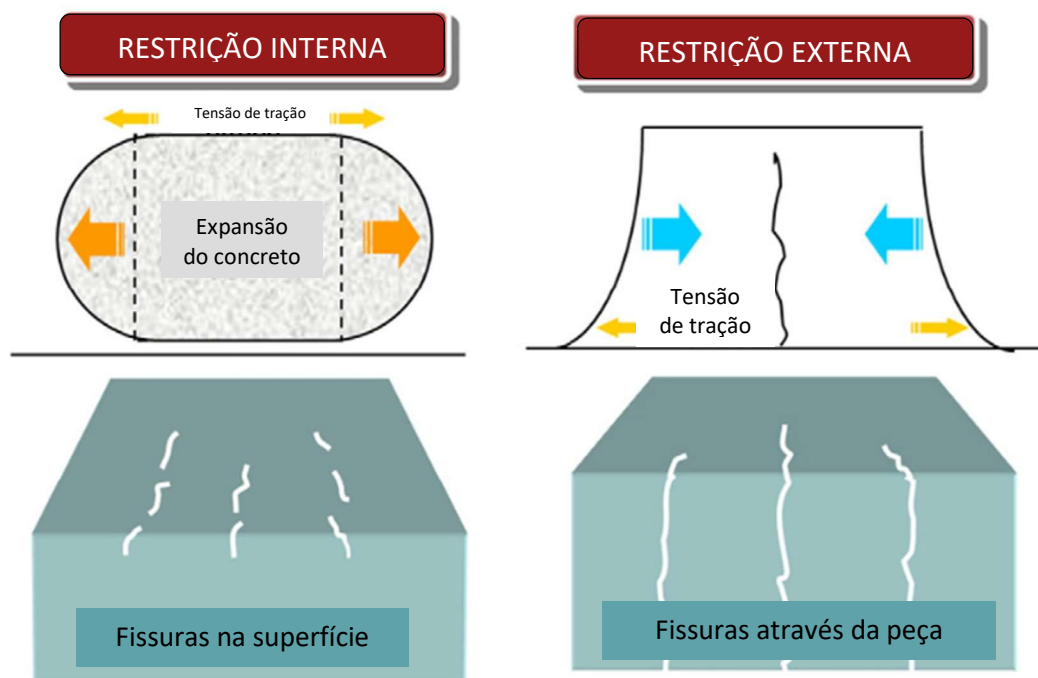
As fissuras podem ser severas e destruir a estabilidade e integridade da estrutura ou diminuir a durabilidade do concreto ao permitir a penetração de compostos químicos nocivos no concreto armado. Portanto, é essencial aliviar o risco de fissuração térmica, reduzindo o calor acumulado da estrutura de concreto (TRAN; CHAU, 2021, p. 1).

Além da diminuição de resistência do bloco estrutural, há outras consequências da fissuração do concreto, como a abertura para infiltrações e vazamentos de algum composto, exposição de armadura ao ambiente externo, provocando corrosão e até mesmo evolução para formas mais críticas de rompimentos.

O processo de formação de fissuras devido a gradiente térmico baseia-se na transferência de calor. “O gradiente térmico gerado durante a cura é direcionado para fora com maior temperatura no interior e menor ou próxima da temperatura ambiente na superfície do bloco” (KODUR et al., 2016, p. 63). Pela elevação de temperatura e estado de agitação das moléculas, há uma expansão no interior do bloco de concreto, enquanto na superfície a temperatura tende a entrar em equilíbrio com o ambiente, tendendo a encolher e se opor à expansão do interior da concretagem.

Segundo Ha, Jung e Cho (2014), as tensões térmicas que se formam causam rachaduras térmicas quando são superiores à resistência à tração do concreto. O processo de expansão do núcleo e retração da superfície está representado na Figura 2-17.

Figura 2-17 - Ocorrência de fissuras térmicas no concreto.



Fonte: HA; JUNG; CHO, 2014.

De acordo com Ballim (2004), em idades posteriores, após a temperatura de pico ter sido atingida e o concreto interno entrar na fase de resfriamento, o aumento da rigidez da zona da superfície atua como uma restrição à retração térmica do concreto interno, explicando o surgimento de fissurações internas.

Normativamente não há uma definição quanto à classificação das fissuras, mas muitos autores se empenharam em definir critérios de classificação, como exposto pela Tabela 2.3. As cinco anomalias apresentadas são dispostas de acordo com o tamanho do vão de abertura.

Tabela 2.3 - Classificação das anomalias causadas por deformação excessiva da estrutura de concreto (deformação lenta).

ANOMALIAS	ABERTURAS (mm)
Fissura	Até 0,5
Trinca	De 0,5 a 1,5
Rachadura	De 1,5 a 5,0
Fenda	De 5,0 a 10,0
Brecha	Acima de 10,0

Fonte: OLIVEIRA, 2012.

Nota-se que as principais patologias associadas ao concreto massa são decorrentes do calor liberado durante o processo de hidratação do cimento. Diante da importância do tema, destina-se um tópico acerca desse assunto.

2.8 MÉTODOS DE RESFRIAMENTO

O surgimento de fissuras destaca-se como a principal patologia da elevação de temperatura no interior das estruturas. As deformações de retração são formadas durante a hidratação do concreto como resultado de uma reação química e da troca de umidade com o meio ambiente (NGUYEN; LUU, 2019).

Segundo Gajda e Vangeem (2002), a limitação das temperaturas máximas é necessária para obter-se redução dos tempos de resfriamento e dos atrasos a ele associados, como o prolongamento do cronograma de obra pelo retardamento do processo de cura, além da minimização do potencial de fissuração devido à expansão e contração térmica, sendo assim, temperaturas acima de 88 °C também podem reduzir as resistências à compressão esperadas.

As diretrizes gerais, baseadas na experiência com o concreto massa, estabelecem a permissão de uma diferença máxima de temperatura entre o interior da estrutura de concreto e o ambiente de 19°C, conforme estabelecido por Gajda e Vangeem (2002), sendo assim, diversas intervenções podem ser realizadas a fim de controlar a temperatura no interior das estruturas.

Dentre as formas existentes, é possível destacar o pré-resfriamento, pós-resfriamento e até mesmo a utilização de cimentos de baixo calor de hidratação, cuja metodologia baseia-se na substituição do clínquer, por materiais menos reativos, como pozolanas e escórias, por exemplo. Segundo Gajda e Vangeem (2002) a temperatura de lançamento do concreto é muito importante:

A temperatura do concreto no momento da colocação tem um grande impacto na temperatura máxima do concreto. Normalmente, para cada 0,6 °C de redução ou aumento na temperatura inicial do concreto, a temperatura máxima do concreto é alterada em aproximadamente 0,6 °C (GAJDA; VANGEEM, 2002, p. 61).

A seguir são apresentados os principais métodos de redução da temperatura de concretagem para concretos massa.

2.8.1 Adição de Gelo

Dentre as possibilidades de intervenções para garantir o resfriamento do concreto está a substituição total ou parcial da água de amassamento por gelo. A principal vantagem desse método é o alcance do objetivo esperado sem o comprometimento do cronograma de concretagem, já que torna possível a concretagem em uma única etapa.

A Primeira Lei da Termodinâmica rege o comportamento das estruturas, como representado pela Equação 2.4. O princípio da conservação de energia estabelece a sua conservação, seja na forma de trabalho (W) ou calor (Q).

$$\Delta U = Q - W \quad (2.4)$$

Em que:

U – Energia interna do sistema

Q – Quantidade de calor

W – Trabalho realizado

$W > 0 \rightarrow$ Expansão do sistema e perda de energia;

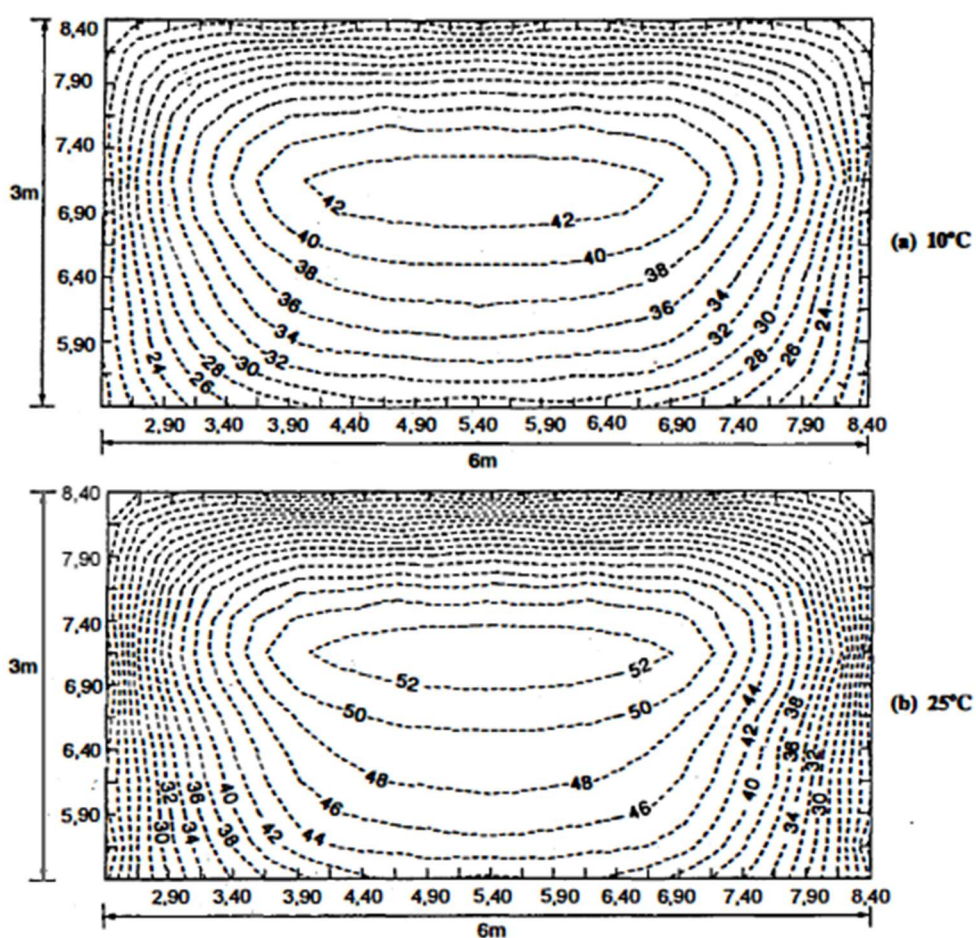
$W < 0 \rightarrow$ Contração do sistema e ganho de energia;

$Q > 0 \rightarrow$ Transferência de calor do meio para o sistema;

$Q < 0 \rightarrow$ Transferência de calor do sistema para o meio.

De forma a manter o equilíbrio das reações, uma forma bastante eficiente é diminuir a temperatura de lançamento do concreto, reduzindo a temperatura final do sistema, como pode ser verificado a partir da Figura 2-18.

Figura 2-18 - Efeito da temperatura do concreto fresco na distribuição de temperatura máxima (a) lançamento a 10°C e (b) lançamento a 25°C.



Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014.

Observa-se que para uma temperatura de lançamento de 10°C, a temperatura máxima no interior do bloco de concreto é de 42°C, enquanto que para uma temperatura de lançamento de 25°C, essas temperaturas atingem 52°C.

A eficiência desse método pode ser verificada a partir das definições feitas por Neville (2016), em que 1 kg de gelo absorve 334 kJ quando se funde a 0 °C, quantidade de calor quatro vezes maior do que a obtida com água a 20 °C. A atenção em relação a esse tipo de uso deve ser voltada ao seu total derretimento antes do fim da mistura, não impactando a homogeneidade do composto.

2.8.2 Nitrogênio Líquido

Outra alternativa de grande eficiência é a utilização do nitrogênio líquido, resfriando o concreto ou seus componentes (como os agregados, por exemplo). “Esta opção pode aumentar significativamente o custo do concreto, no entanto, ela tem sido usada para pré-resfriar com sucesso o concreto a 1°C para concretagens de concreto de massa altamente especializadas” (GAJDA; VANGEEM, 2002, p. 3). Os concretos de alto desempenho normalmente estão ligados a grandes volumes, sendo a tecnificação voltada a limitação de temperaturas limites, como em pontes, viadutos, barragens, entre outros.

Segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2002), a adição de nitrogênio líquido, por si só, não influencia a quantidade de água necessária para a mistura, exceto que a redução da temperatura do concreto pode reduzir a demanda de água. A aplicação do nitrogênio pode ser realizada diretamente no agregado, que por ser majoritário na composição do concreto, mantém a temperatura baixa por mais tempo, auxiliando inclusive na sua trabalhabilidade.

Outro fator de grande importância é a diminuição do tempo de concretagem em relação à utilização do gelo, já que o resfriamento é aplicado diretamente sobre o material pronto para concretagem, dispensando o manuseio isolado do gelo e posterior mistura com os demais materiais, além da diminuição de quantidade de trabalhadores envolvidos.

De acordo com Harith; Hassan e Hasan (2022), as temperaturas de pico são eficientemente reduzidas pela utilização do nitrogênio líquido, no entanto, como um efeito secundário temos o prolongamento do tempo para atingir essa temperatura, podendo, inclusive, ser utilizado como retardador de pega não químico.

A Tabela 2.4 apresenta os diversos estudos sobre a utilização do nitrogênio líquido e suas consequentes conclusões.

Tabela 2.4 - Estudos que utilizaram nitrogênio líquido como método de pré-resfriamento.

Referência (Ano)	Aplicação do N_2	Conclusão
Negami et al. (1990)	Congelamento do agregado miúdo	A temperatura do concreto pode ser reduzida em 25 °C quando usada areia congelada com nitrogênio líquido, que é uma quantidade de redução maior do que a alcançada pelos métodos convencionais de pré-resfriamento.
Juenger; Solt; Hema (2010)	Resfriamento do concreto massa	O tempo de pega inicial do concreto é mais longo do que o previsto, quando há um atraso significativo no resfriamento do concreto com N_2 . O concreto resfriado tem abatimento baixo semelhante ao concreto não resfriado, em climas quentes.
Hansen; Forbes (2012)	Resfriamento de barragem de concreto compactado a rolo	A temperatura do concreto foi reduzida em 0,6 °C, quando do uso de gelo na água de amassamento, e cerca de 1,1°C a 1,7 °C, quando do uso de nitrogênio líquido. O custo do resfriamento, em 1996, foi de US\$ 5,50/m ³ de concreto para resfriamento, o que incluiu o custo do nitrogênio.
Kattoof; Hassan; Hasan (2021)	Resfriamento de concreto nano modificado	O uso de N_2 , no resfriamento do concreto nano modificado pode alcançar desempenho equilibrado e superior em termos de resistência à compressão e absorção de água, tornando-se uma opção viável em regiões de clima quente.
Harith; Hassan; Hasan (2022)	Misturas de ligantes binários ³ e ternários ⁴	Os resultados indicam que a temperatura de pico foi significativamente reduzida pelo uso de nitrogênio líquido. No entanto, o tempo para atingir a temperatura de pico foi significativamente ampliado.
Kattoof; Hassan; Hasan (2022)	Concretos contendo cinzas volantes e nanossílica	O nitrogênio líquido tem influência positiva no consumo de portlandita, principalmente nos concretos nanomodificados ⁵ , o que poderia eliminar a propagação de novas fissuras e resultar em microestruturas internas mais finas e densas.

Fonte: SILVA et al., 2022.

2.8.3 Uso de Adições

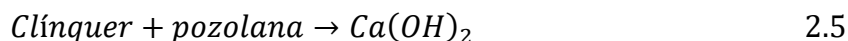
Segundo Gajda e Vangeem (2002), cada 45 kg de cimento aumenta a temperatura do concreto em 7 °C, sendo assim, as misturas de substituição mais utilizadas são aquelas que apresentam o nível máximo de pozolanas, que por possuir composição química favorável além de partículas muito finas, apresentam a propriedade de ligante hidráulico. A principal vantagem na utilização da pozolana é o fato de provocar uma hidratação lenta do concreto, com consequente redução da liberação do calor quando comparado aos demais materiais.

³ Ligantes formados por dois compostos;

⁴ Ligantes formados por três compostos;

⁵ Alteração em nível molecular do concreto, a fim de potencializar suas propriedades físicas e químicas.

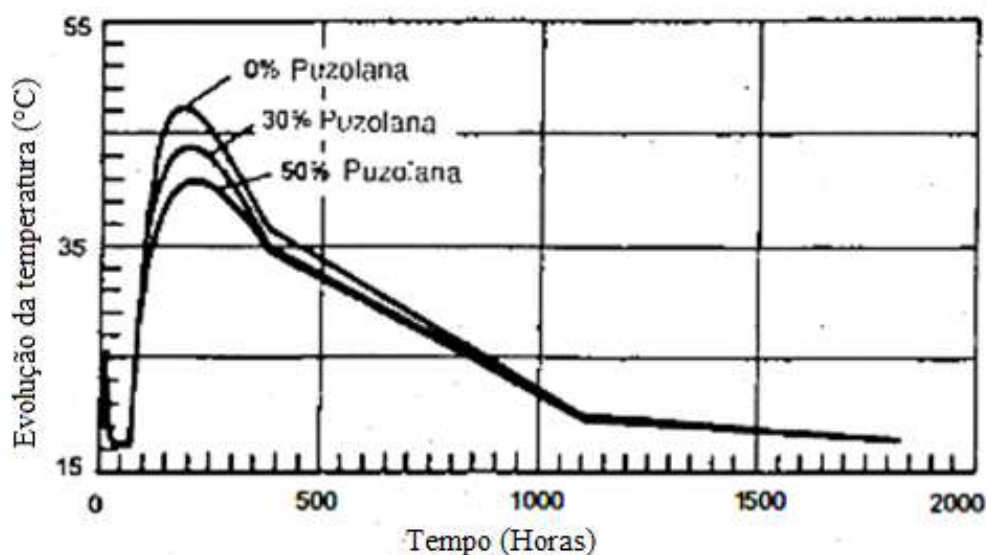
Para a reação ocorrer, deve haver o clínquer, que reagirá com a pozzolana liberando o hidróxido de cálcio (cal), conforme expresso pela Equação 2.5. Dentre os materiais pozzolânicos destacam-se: produto da queima de carvão em usinas termelétricas (cinzas volantes), metacaulim, rochas vulcânicas, matérias orgânicas fossilizadas, entre outros.



De acordo com Shabab et al. (2016), concretos contendo substituição de pozzolana ganham resistência lentamente quando comparados com concretos contendo apenas cimento Portland comum, sendo a taxa de retardamento diferente para cada composto. Esse fato pode impactar negativamente o fluxo da obra, já que demanda mais tempo para atingir os valores de resistência esperados, podendo comprometer o cronograma.

O efeito da concentração de pozzolana na mistura do concreto massa pode ser verificado a partir da Figura 2-19, evidenciando a evolução da temperatura para as concentrações de 0%, 30% e 50% desse composto.

Figura 2-19 - Efeito da pozzolana na temperatura do concreto.



Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014.

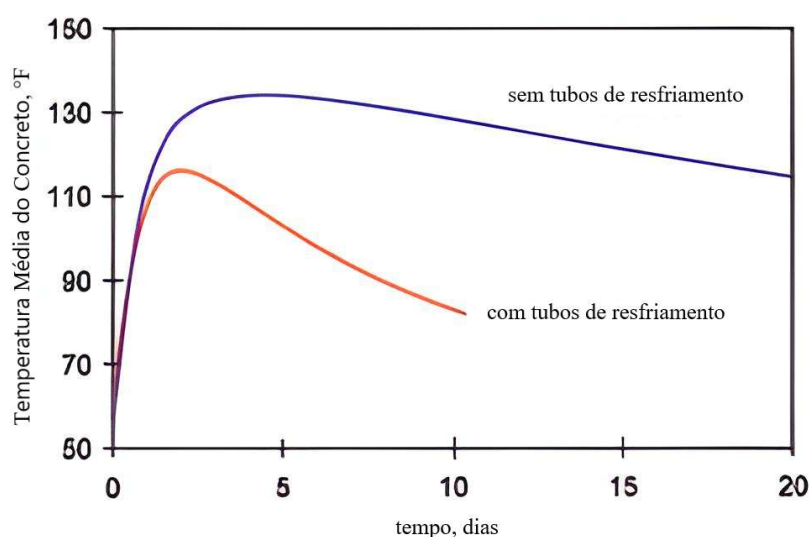
Observa-se que o concreto contendo 50% de adição de pozzolana apresenta menor liberação e calor durante sua hidratação. Enquanto o concreto sem adição de pozzolana (0%), apresenta maior liberação de calor.

2.8.4 Tubos de Resfriamento

O funcionamento dos tubos, também chamados de serpentinas, baseia-se na circulação de água fria, por bombeamento, no interior da estrutura, com consequente diminuição da temperatura no seu interior.

A redução de temperatura a partir da utilização dos tubos de resfriamento pode ser verificada a partir da Figura 2-20, em uma exposição dos efeitos de sua utilização em comparação com uma estrutura sem intervenção.

Figura 2-20 -Efeitos dos tubos de resfriamento internos.



Fonte: GAJDA; VANGEEM, 2002 – adaptado pelo autor.

Segundo Gajda e Vangeem (2002), esse método pode ter altos custos iniciais e operacionais, mas os benefícios geralmente superam esses custos se o tamanho, o espaçamento e as temperaturas do tubo de resfriamento forem otimizados adequadamente.

A Figura 2-21 apresenta a instalação das serpentinas durante a execução de uma concretagem. “A temperatura e a vazão da água fria são os dois parâmetros dominantes que determinam o efeito do controle do calor” (HUANG et al., 2018, p. 248).

Figura 2-21 - Circulação de água em serpentina.



Fonte: GAMBALE, 2019b.

2.9 CONCRETAGENS EM CAMADAS

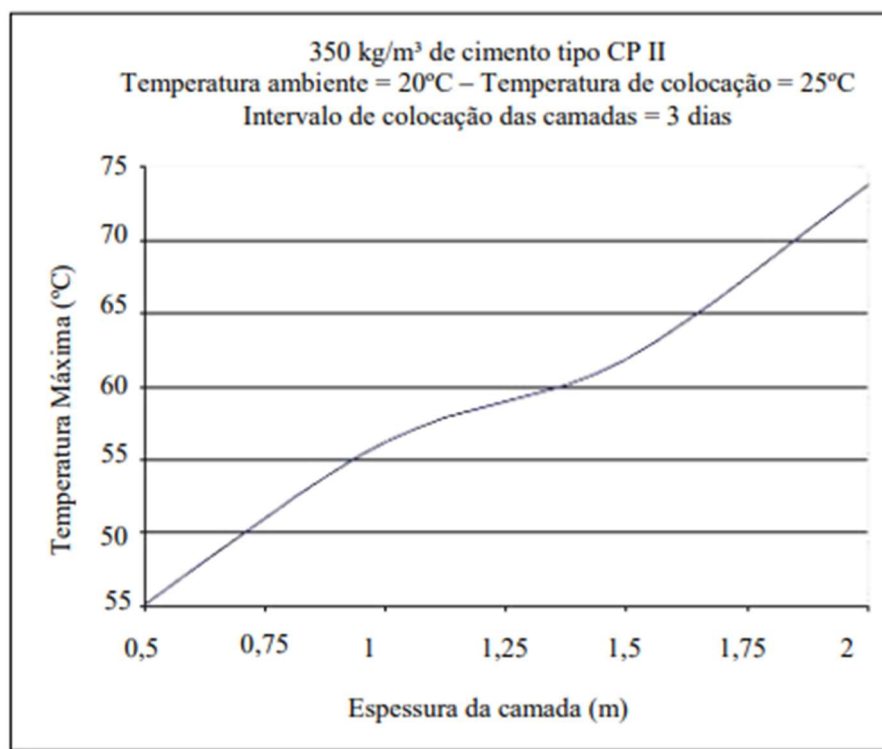
Dentre as características principais do concreto massa, destaca-se as grandes dimensões, resultando em grandes volumes de concretagens. O lançamento de concreto, mesmo que ininterrupto, pode se prolongar por mais de 12 horas, afetando a homogeneidade e resistência da fundação, já que pela diferença temporal, a aderência pode ser reduzida, como destaca Görtz:

Com um intervalo maior de aplicação do concreto e, portanto, um aumento do endurecimento do primeiro lote de concreto, a resistência de aderência entre os dois lotes é geralmente reduzida. Mesmo assim, uma perda de resistência de aderência pode limitar a resistência estrutural geral, as juntas frias⁶ são inevitáveis em muitos casos. A logística de construção, bem como a liberação de calor de hidratação, pode exigir uma concretagem sucessiva e, assim, inviabilizar o desenvolvimento de um bloco monolítico (GÖRTZ et al., p. 2, 2021).

⁶ Junta formada pela interrupção do lançamento do concreto, além do tempo de início de pega.

Além das consequentes perdas de aderência, o aumento da temperatura ocorre proporcionalmente com o aumento do volume das concretagens, como pode ser verificado a partir da Figura 2-22, obtida a partir de medições *in situ*.

Figura 2-22 - Relação entre a espessura de camadas de concretagem e a temperatura máxima.

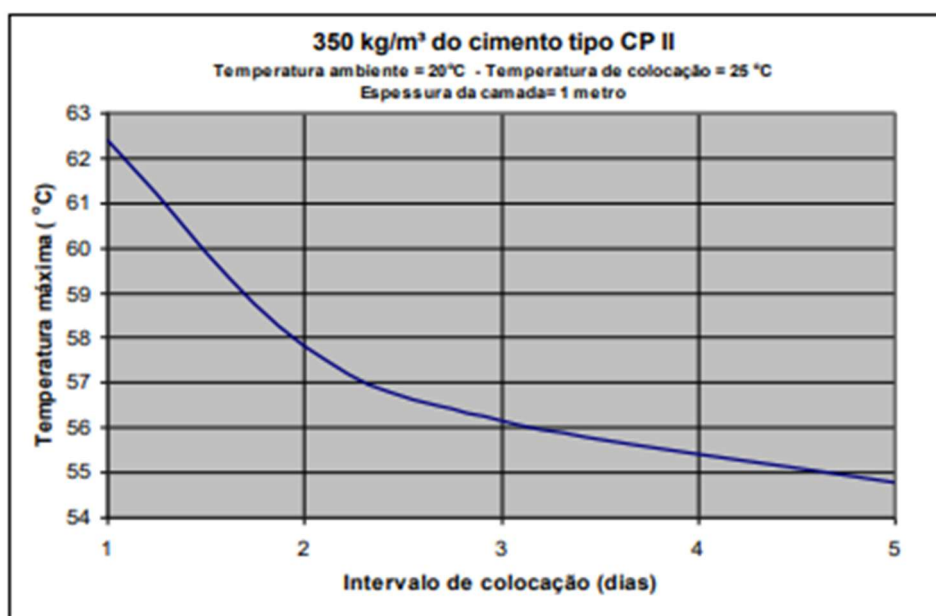


Fonte: GAMBALE, 2019a.

A partir do gráfico acima, é possível evidenciar o volume das bases de aerogeradores como fator de suma importância para a elevação da temperatura no interior das concretagens. Em situações em que os agentes resfriadores não são suficientes, a possibilidade de redução do volume das fundações mostra-se bastante eficaz, sendo que em uma diminuição de 1 m da espessura da camada, temos a redução de até 17°C na temperatura.

Além da redução do volume das fundações, é possível fragmentar o período de concretagem, desde que não haja interferências significativas no cronograma geral da obra. A Figura 2-23 detalha esse processo a partir de dados obtidos de medições *in situ*.

Figura 2-23 - Relação entre intervalo de colocação e temperatura máxima.



Fonte: GAMBALE, 2019a.

A partir da divisão das concretagens obtém-se o fracionamento do pico máximo de temperatura, reduzindo consideravelmente as influências negativas pelo não atingimento da temperatura crítica do concreto.

2.10 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA AMBIENTE EM CONCRETAGENS

A partir das exposições anteriores, fica claro a interferência da temperatura para o desempenho do concreto massa. Além do calor gerado pela reação exotérmica também há grande influência da temperatura ambiente durante e após as concretagens. Tanto a temperatura de lançamento do concreto quanto o processo de cura sofrerão perturbações.

Em uma análise voltada para concretagens de bases de aerogeradores, estudo de caso deste trabalho, é possível revelar a concentração de instalação dos parques eólicos, estando eles localizados majoritariamente na região nordeste e sul do país, como pode ser verificado a partir de consulta em tempo real, representada pela Figura 2-24.

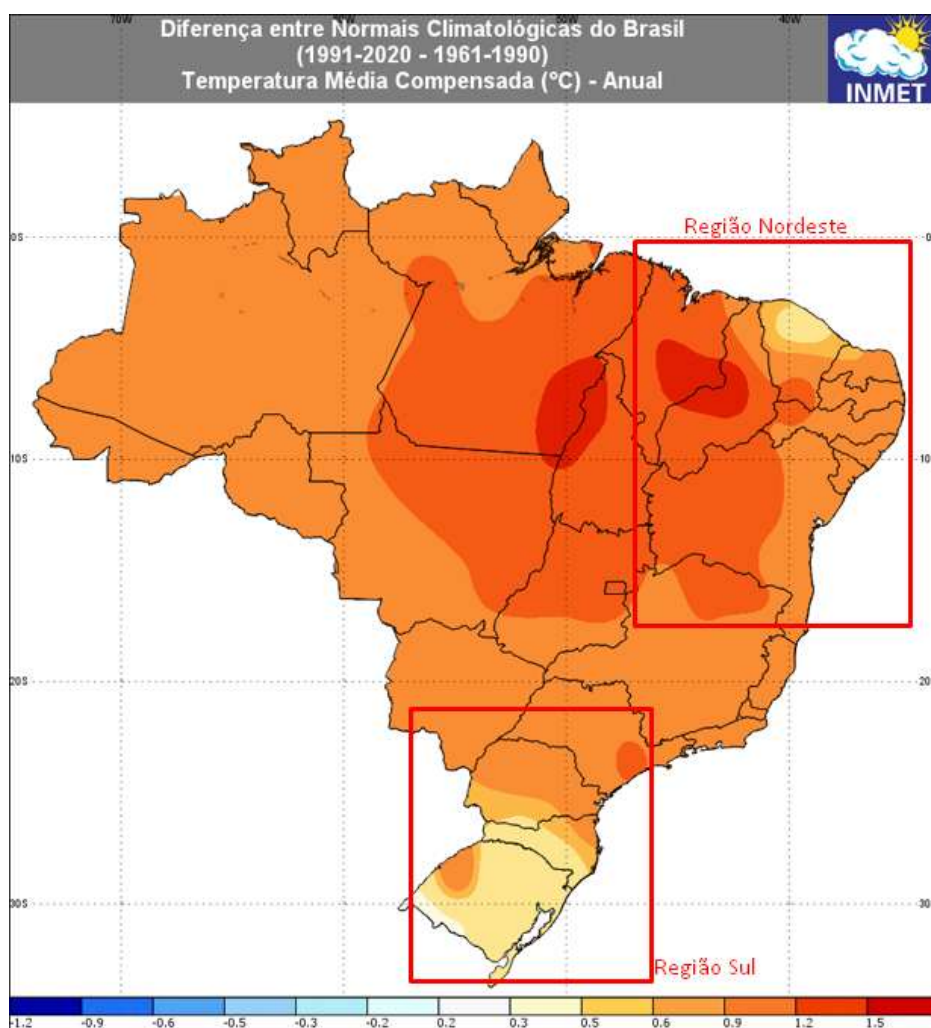
Figura 2-24 - Usinas Eólicas em operação no território brasileiro - consulta realizada em out/22 a partir de software Ecotx.



Fonte: Autor, 2023.

A análise de média de temperatura das duas regiões em destaque, mostrada na Figura 2-25, revela grandes discrepâncias, sendo a região Sul detentora das menores médias de temperatura do país, contrapondo-se a região Nordeste, que além de possuir os valores climáticos mais elevados, ainda conta com os menores índices de precipitação.

Figura 2-25 - Variação climática em território brasileiro.



Fonte: INMET, 2022.

A concentração do potencial eólico nessas regiões deve-se a maior incidência de ventos propícios à geração de energia. Quando comparada a região Sul com a Nordeste, há uma tendência de instalação nas regiões mais ao norte pelo custo de instalação, que tendo menores valores para as áreas, tornam-se mais atrativas.

A concretagem da fundação das torres eólicas terá grande influência das temperaturas ambientes, seja ela mais quente, representada pela região nordeste, ou mais amenas, representada pela região sul. A seguir são abordadas diversas questões sobre concretagens sob altas e baixas temperaturas.

2.10.1 Concretagem sob altas temperaturas

De acordo com Neville (2016), quando submetido a elevadas temperaturas, o concreto pode apresentar comprometimento de sua mistura, cura e até mesmo lançamento. Tais problemas não são exclusivos da temperatura do ambiente, mas podem ser fruto de seu agravamento pelo calor de hidratação, bem como da evaporação exagerada da água de amassamento, como destaca o autor:

A temperatura ambiente elevada causa uma demanda maior de água pelo concreto e aumenta a temperatura do concreto fresco. As consequências disso são o aumento da velocidade de perda de abatimento e uma hidratação mais rápida, que resultam em pega acelerada e em uma menor resistência do concreto em longo prazo (NEVILLE, 2016, p. 415).

A ocorrência de fissuração por retração plástica é oriunda da rápida evaporação da água. O processo consiste na maior rapidez de evaporação quando comparada a velocidade de exsudação, que consiste no surgimento de água na superfície da concretagem, em tempo anterior à pega (NEVILLE, 2016).

Para Shalon (1978, p. 130) “as fissuras de retração plástica variam consideravelmente em profundidade, comprimento e largura. Comprimentos de 1 a 2 m ocorrem frequentemente, mas rachaduras curtas, de alguns centímetros, também são frequentes. A largura varia de 0,1 a 3 mm”.

Segundo Neville (2016), se for permitido o aumento do volume de um concreto relativamente frio quando lançado a uma elevada temperatura, ocorrerá uma expansão dos vazios e redução da resistência. Embora a temperatura ambiente esteja fora do controle humano, medidas como alteração de horários de concretagem e até mesmo planejamento para execução de obra em meses de menores temperaturas tornam-se bastante eficientes.

Devem ser evitadas grandes variações térmicas após as concretagens, portanto, deve ser priorizado o uso de mantas umedecidas e até mesmo cura química. O processo de cura é acelerado em situações de climas quentes, já que o grau de hidratação é alcançado em um menor tempo.

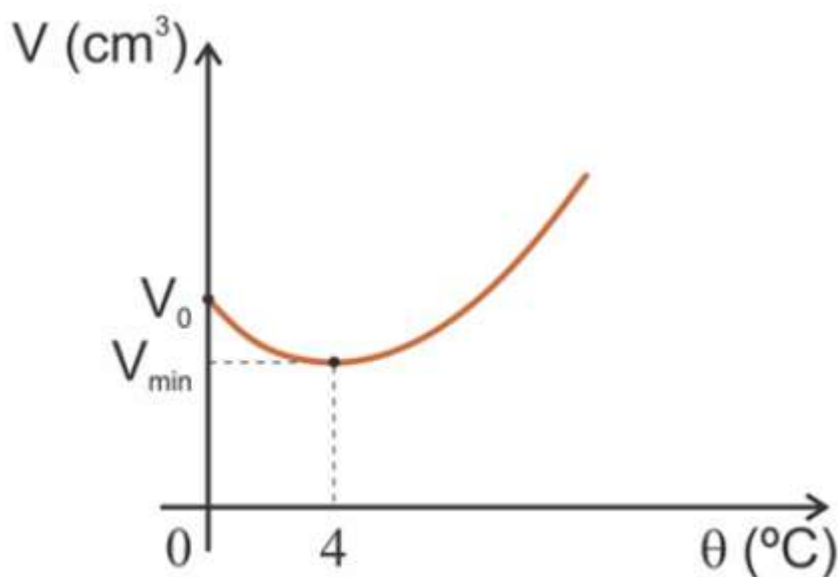
De acordo com Cebeci (1987), o desenvolvimento da resistência do concreto mostrou que a deficiência na umidade é, em geral, o fator prejudicial dominante, afetando mais que as elevações de temperatura, pois favorece a evaporação da água de amassamento.

2.10.2 Concretagem sob baixas temperaturas

Sabe-se que o processo de hidratação do cimento ocorre até mesmo em temperaturas negativas. Embora o processo não seja alterado, deve-se atentar para a temperatura de fusão dos seus compostos, como a água.

O comportamento anômalo da água provoca uma expansão em seu volume quando resfriada e contração quando aquecida, em escala de temperatura de 0°C a 4°C, como pode ser verificado a partir da Figura 2-26. Tais retrações e expansões, como já visto, são prejudiciais para a cura do concreto massa.

Figura 2-26 - Relação entre volume (V) e a temperatura da água (θ).



Fonte: PEREIRA; ABIB, 2015 – adaptado pelo autor.

Segundo Neville (2016), em baixas temperaturas a água de amassamento congela, com um consequente aumento do volume total do concreto. Além do mais, devido a não haver água

disponível para as reações químicas, a pega e o endurecimento do concreto são atrasados e prejudicados.

As análises de perdas de resistência podem ser realizadas em três períodos, sendo eles: imediatamente após o lançamento, durante o processo de pega e em situação de ganho de resistência considerável.

No primeiro período, embora possa ocorrer a redução ou paralisação do processo de pega, não haverá perda de resistência no processo, desde que sejam realizadas revibrações da mistura. As alterações dimensionais provocam uma grande quantidade de poros que podem diminuir a resistência do concreto.

Quando já iniciada a pega, haverá perdas consideráveis de resistência pela desagregação provocada pelo gelo somada à dilatação. O último intervalo caracteriza-se pela grande resistência do concreto, resistindo à pressão do gelo e com grande parte do percentual de água já reagido com o cimento, evitando então seu congelamento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Conforme estabelecido por Neville (2016), a vulnerabilidade ao congelamento do concreto será menor quanto maior for a resistência e mais avançada estiver a hidratação do cimento. Mesmo que não sejam submetidas a condições drásticas de congelamento, a temperatura de lançamento do concreto deve ser incisivamente controlada, já que deve ser superior a 4°C, livrando-se dos efeitos do comportamento anômalo da água. A partir desta etapa o calor de hidratação é suficiente para isentar sobre futuras preocupações sobre eventuais resfriamentos.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho é baseada na análise de dados de um parque eólico localizado no estado do Rio Grande do Norte, de tal forma, seguirá as seguintes etapas:

- Organização/Classificação/Tratamento/Formatação dos dados a partir do uso do Excel[®] e software Matlab[®];
- Análise estatística;
- Validação do estudo de implantação do parque eólico (simulações numéricas) realizado pelo empreendimento;
- Validação das informações obtidas com dados auferidos da revisão bibliográfica realizada e estudo de viabilidade de implantação do parque.

O estudo se baseou no direcionamento adquirido pela revisão bibliográfica, em uma seleção de autores, títulos e temas mais relevantes. A partir disso, a condução do referencial teórico orientou sobre os pontos de relevância na análise de dados, já que a vasta quantidade de informações possibilitaria as mais diversas abordagens.

Para a execução do complexo eólico foi realizado um estudo de viabilidade de implantação, doravante chamado de Estudo Termomecânico, considerando as particularidades da região a fim de estabelecer um plano de execução do empreendimento.

O estudo foi realizado a partir de simulações computacionais por meio do software *b4cast*[®], o qual utiliza o método dos elementos finitos para obter o comportamento termomecânico no interior da estrutura de concreto simulada, fornecendo, dentre outras informações, os dados de temperatura esperadas, objeto de interesse deste estudo.

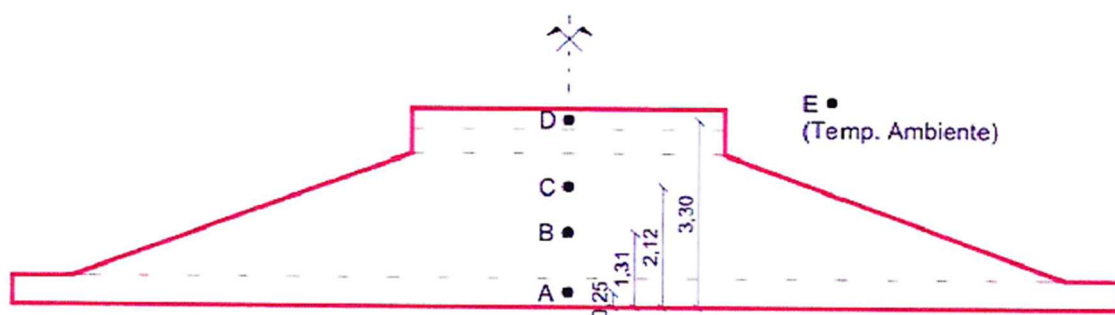
Como o foco deste estudo não é a simulação computacional do comportamento das fundações, e sim a averiguação do real desempenho, dispensou-se novas modelagens, sendo aproveitados os dados do Estudo Termomecânico a nível de comparação.

3.1 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada a partir da instalação de termopares nas fundações antes da concretagem, conforme localização exposta pela Figura 3-1. As medições de temperatura se iniciaram a partir do lançamento do concreto na estrutura, gerando um histórico de medições durante todo o processo de concretagem. O concreto utilizado foi bombeado e resfriado pela adição de gelo.

Para a observação do comportamento das amostras foi verificado o desempenho de 62 bases de aerogeradores, cujos dados foram coletados a cada hora durante 7 dias, período considerado crítico para a liberação do calor de hidratação, totalizando 168 informações por base, perfazendo um total de 10.416 dados.

Figura 3-1 - Posicionamento dos termopares nas bases de aerogeradores.



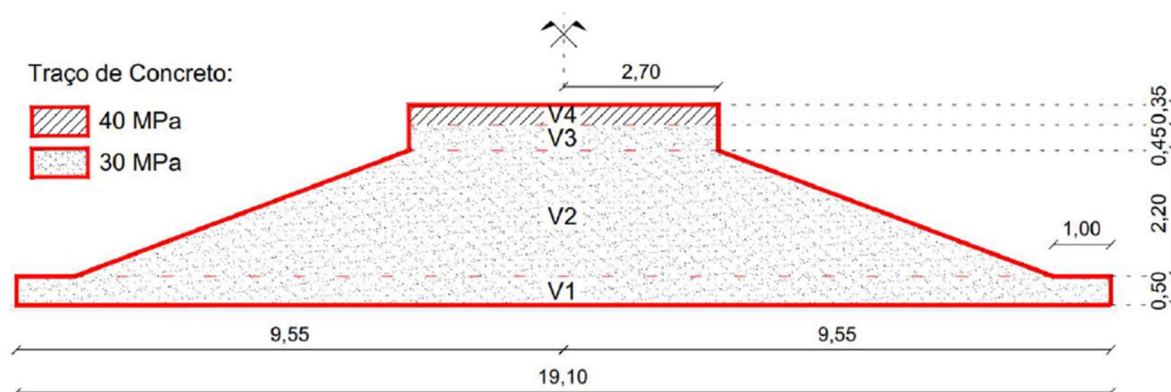
Fonte: CATEC CONSULTORIA E ASSESSORIA TÉCNICA EM ENGENHARIA LTDA, 2022.

Os pontos centrais foram escolhidos pela maior possibilidade de alcance das temperaturas máximas. A inserção de vários termopares foi realizada a fim de averiguar a temperatura no interior da fundação, comparando-as com a temperatura ambiente, ponto E, e com a temperatura de lançamento do concreto.

A partir do Estudo Termomecânico realizado, foi definida a temperatura de lançamento do concreto, levando em consideração o volume de concreto utilizado (400 m³), a temperatura do ambiente e a incidência de ventos no local.

A execução das bases foi realizada com a adição de gelo em escamas e uso de dois tipos de concreto: $f_{ck} = 30MPa$ e $f_{ck} = 40MPa$, distribuídos conforme mostra a Figura 3-2.

Figura 3-2 - Seção transversal do bloco de fundação com dimensões, cotas e tipos de concretos utilizados.



Fonte: CATEC CONSULTORIA E ASSESSORIA TÉCNICA EM ENGENHARIA LTDA, 2022.

Observa-se que apenas as camadas em contato direto com o ar ambiente utilizaram concreto de 40 MPa. As demais camadas utilizaram concreto de 30 MPa.

3.1.1 Sensores de temperatura utilizados

Como dito anteriormente, as temperaturas no interior dos blocos de fundação foram obtidas por meio de termopares. Foram utilizados termopares do tipo K modelo TP-01 F da marca Bagarel, com cabo de isolamento em fibra de vidro com conector compensado mini-macho em um ponta, conforme apresentado na Figura 3-3. Esses sensores possuem uma precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Figura 3-3 - Termopar modelo TP-01 F.



Fonte: CATEC CONSULTORIA E ASSESSORIA TÉCNICA EM ENGENHARIA LTDA, 2022.

A aquisição dos dados de temperatura foi realizada por meio de registrador eletrônico de temperatura do tipo *Data Logger*, o qual possui memória interna para o registro eletrônico dos dados, com interface para posterior descarregamento em computador, conforme mostrado na Figura 3-4.

Figura 3-4 - Data Logger modelo LogBox AA IP-65.



Fonte: NOVUS, 2022.

3.2 ANÁLISE DE DADOS

Dado o volume de dados coletados, foram utilizados os softwares Excel® e Matlab® para a análise. Inicialmente as informações de temperatura foram plotadas em função do tempo, para cada base analisada. Em seguida, os dados são tratados estatisticamente, considerando-se as médias de temperatura por faixa de concretagem e por período (1 a 7 dias).

A análise da distribuição de probabilidade permite a verificação de variáveis aleatórias a partir de sua probabilidade de ocorrência. De acordo com Montgomery e Runger (2012, p. 47), “para uma variável aleatória discreta, a distribuição é frequentemente especificada por apenas uma lista de fatores possíveis, juntamente com a probabilidade de cada um”.

A probabilidade paramétrica também será aplicada a fim de analisar os dados, traçando padrões entre os resultados de concretagens das fundações. Segundo Conover (1999), qualquer teste de hipótese ou intervalo de confiança que seja baseado na suposição de que a função de distribuição populacional é conhecida, é chamado de método paramétrico.

Os métodos não paramétricos também podem ser aplicados a este estudo, sendo eles baseados em algumas das mesmas suposições que os métodos paramétricos, com a suposição de que a amostra é uma amostra aleatória, sendo válidos para os dados de qualquer população com qualquer distribuição de probabilidade (CONOVER, 1999).

Embora o número de bases analisado até o presente momento mostre que a probabilidade dos dados se direciona ao modelo da distribuição normal, para Conover (1999), não é possível afirmar tal distribuição, já que as definições são baseadas em suposições e hipóteses.

Por fim, o tratamento dos dados direcionados, somados com estudos já realizados, expostos pela revisão bibliográfica, serviram para reafirmar e refutar certas ideias, em uma consolidação de informação a partir do estudo de caso.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão são apresentados os resultados e discussões da presente pesquisa. Inicialmente é exposto o comportamento térmico das camadas de concretagens, em uma análise comparativa de dados previstos a partir do Estudo Termomecânico e os dados obtidos *in loco* para todas as bases estudadas. Em seguida é apresentada a análise, a partir do software MATLAB®, de 5 bases aleatórias selecionadas a partir do conjunto amostral de 62 bases concretadas, apontando o comportamento seguido por elas.

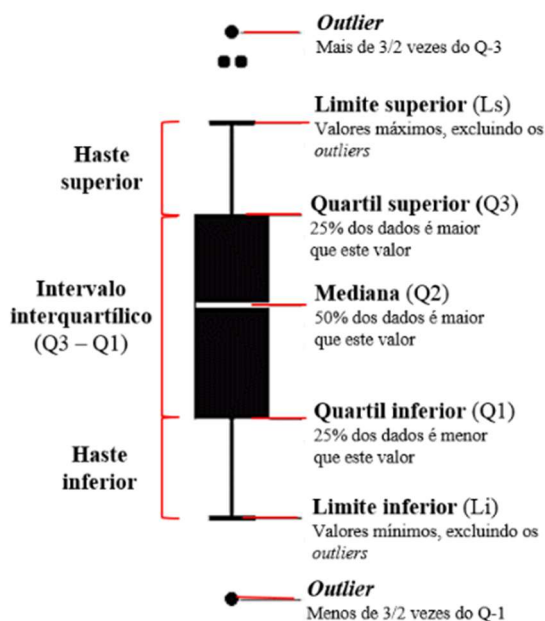
4.1 COMPORTAMENTO AMOSTRAL DAS CONCRETAGENS

Diante da quantidade de dados analisados, foi proposta a análise das informações em conjunto (todas as bases), objetivando estabelecer alguns parâmetros do comportamento das temperaturas. Foram elaborados Bloxpot's para cada termopar, avaliando o comportamento para os sete dias em que foram acompanhadas as temperaturas.

A escolha da representação gráfica do tipo Boxplot se deve ao fato de ser uma ferramenta gráfica muito popular e, de acordo com Humbert e Vandervieren (2008), que permite visualizar a distribuição de dados unimodais contínuos, possibilitando a verificação de informações sobre dispersão, assimetria, localização, bem como as caudas dos dados.

Com uma taxa de representatividade de 98% dos dados, as informações do *Boxplot* podem ser verificadas a partir da Figura 4-1.

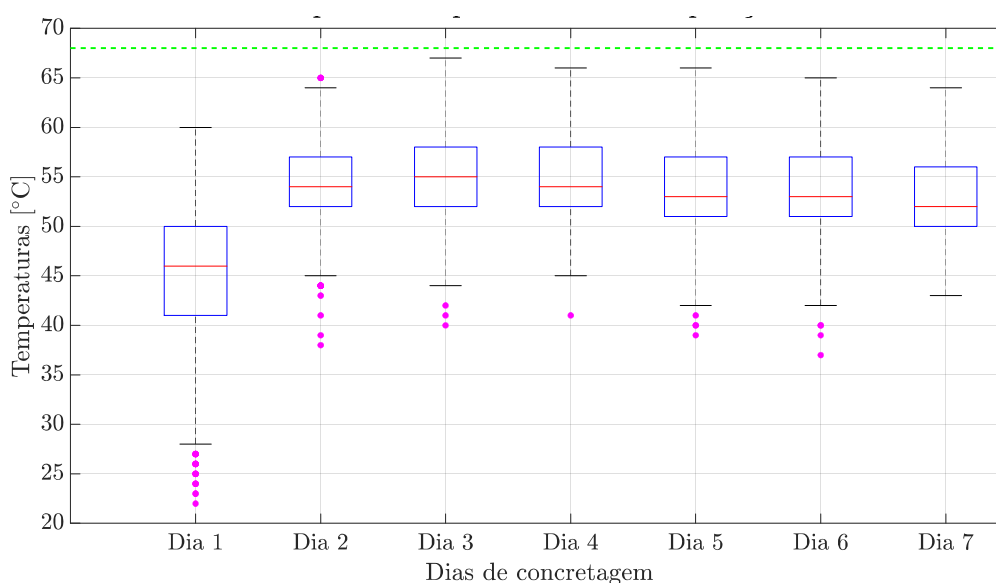
Figura 4-1 - Elenco de informações contidas no boxplot.



Fonte: NETO et al., 2017.

De acordo com Pandis (2015) o *boxplot* é um gráfico útil para analisar e sumarizar os dados quantitativos, especialmente quando estes são contínuos, sendo assim, a Figura 4-2 apresenta o comportamento da fundação na camada V1 por dia após a concretagem. Por ser a região em contato com a camada de regularização, pode haver influência calorífica do solo.

Figura 4-2 – Boxplot do termopar A - todas as bases estudadas.



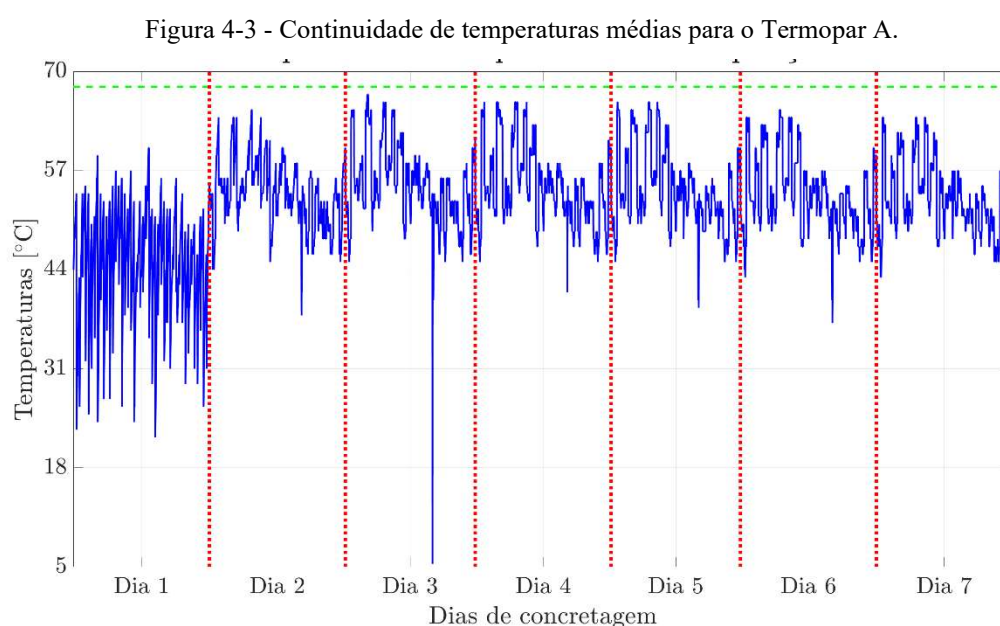
Fonte: Autor, 2023.

A partir da análise da camada A é possível inferir que, para o conjunto amostral, o primeiro dia é o que apresenta maior variabilidade, isso pode ser justificado pela rápida elevação de temperatura. A temperatura máxima foi atingida no terceiro dia, não superando a máxima estabelecida de 68°C, conforme estudo termomecânico.

Dado o tempo de duração das concretagens, até 12 horas, os dados iniciais de temperatura já remetem ao aquecimento da base, e não à sua temperatura de lançamento. Alguns *outliers* são apresentados, sendo estes valores discrepantes da amostra, podendo ser relacionado a algum erro do termopar ou de coleta da informação, ou até mesmo algum valor fora do padrão analisado.

Entre o segundo e sétimo dia as médias de temperatura foram semelhantes, se mantendo no intervalo de 50°C a 57°C. A partir do quinto dia é possível verificar indícios de resfriamento das bases, atestado pela baixa do valor das medianas.

Para a mesma camada foi proposto outro tipo de análise dos dados, evidenciando a continuidade da temperatura durante todo o período de coleta de informações de temperatura, exposto a partir da Figura 4-3.

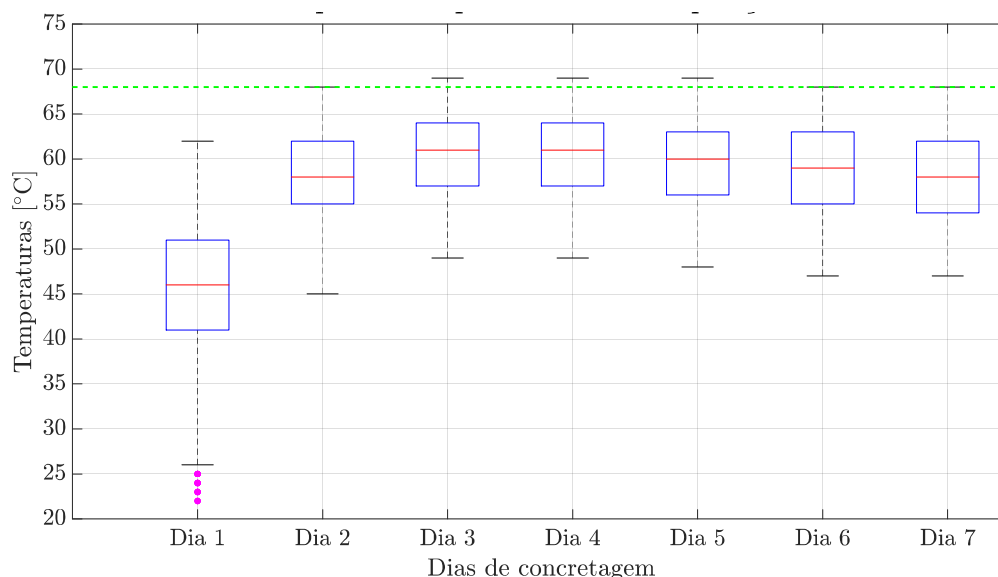


Fonte: Autor, 2023.

É possível notar uma grande oscilação de temperatura em um curto intervalo de tempo, como pode ser percebido com mais intensidade no Dia 1. Além das elevadas variações, são verificadas incoerências, como o valor desconexo apresentado no Dia 3, podendo atestar uma falha na leitura ou conversão dos dados.

O comportamento da camada B pode ser verificado a partir da Figura 4-4. Para esta região destaca-se as interferências caloríficas das duas camadas contíguas, sendo elas a camada A e C.

Figura 4-4 - Boxplot do termopar B - todas as bases estudadas.



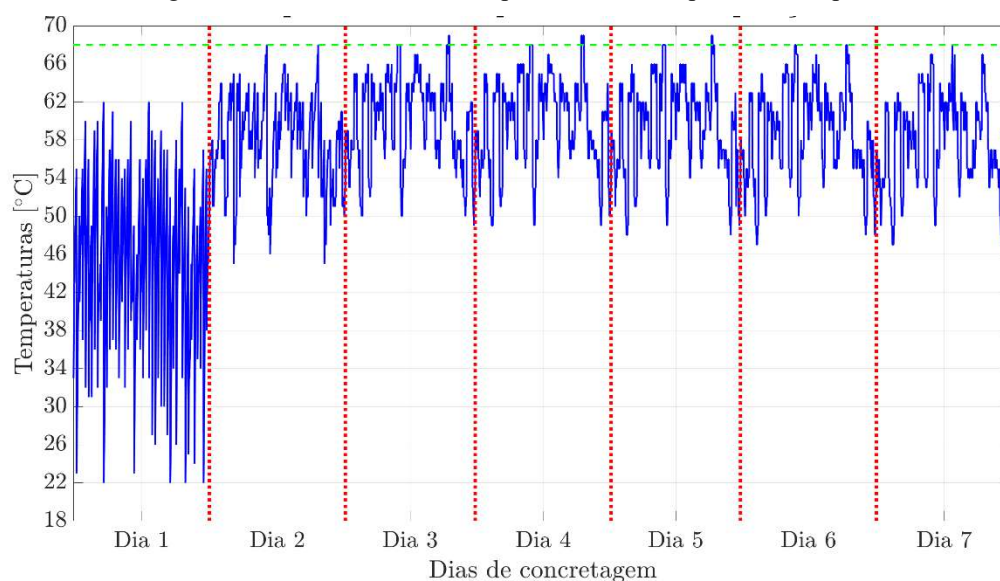
Fonte: Autor, 2023.

De forma semelhante a camada A, o primeiro dia aponta a maior variabilidade de todo o período. Diferentemente da primeira região analisada, as temperaturas máximas apresentam, por três dias consecutivos, valores superiores a máxima estabelecida no estudo termomecânico, para esses dias, a localização das caixas (*boxplot*) revela a concentração dos dados abaixo da temperatura limite, minimizando os riscos pela baixa ocorrência desses valores.

A maior coerência dos dados é revelada a partir da menor ocorrência de *outliers*, sendo estes presentes apenas no primeiro dia. As temperaturas médias para o período posterior ao segundo dia se mantêm no intervalo de 50°C a 57°C, podendo ser observados indícios de resfriamento no mesmo período da camada A (a partir do quinto dia).

A visualização exposta pela continuidade da temperatura, representada pela Figura 4-5, apresenta as mesmas variações que os termopares A, sendo ainda mais amplificado para o primeiro dia.

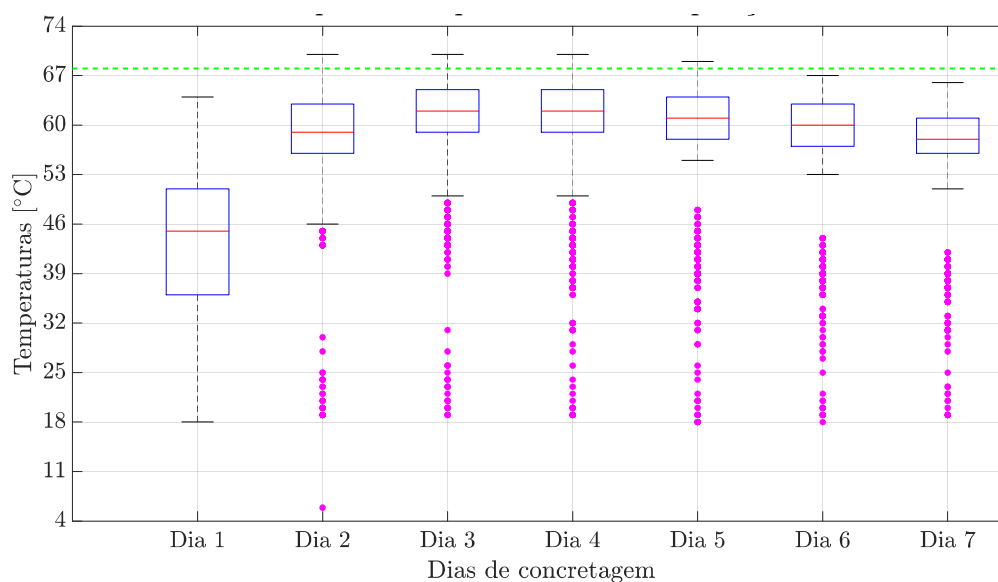
Figura 4-5 - Continuidade de temperaturas médias para o Termopar B.



Fonte: Autor, 2023.

A camada C, bem como a anterior, sofre interferências caloríficas de outras duas camadas, sendo as camadas B e D. Seu comportamento pode ser observado a partir da Figura 4-6.

Figura 4-6 - Boxplot do termopar C- todas as bases estudadas.

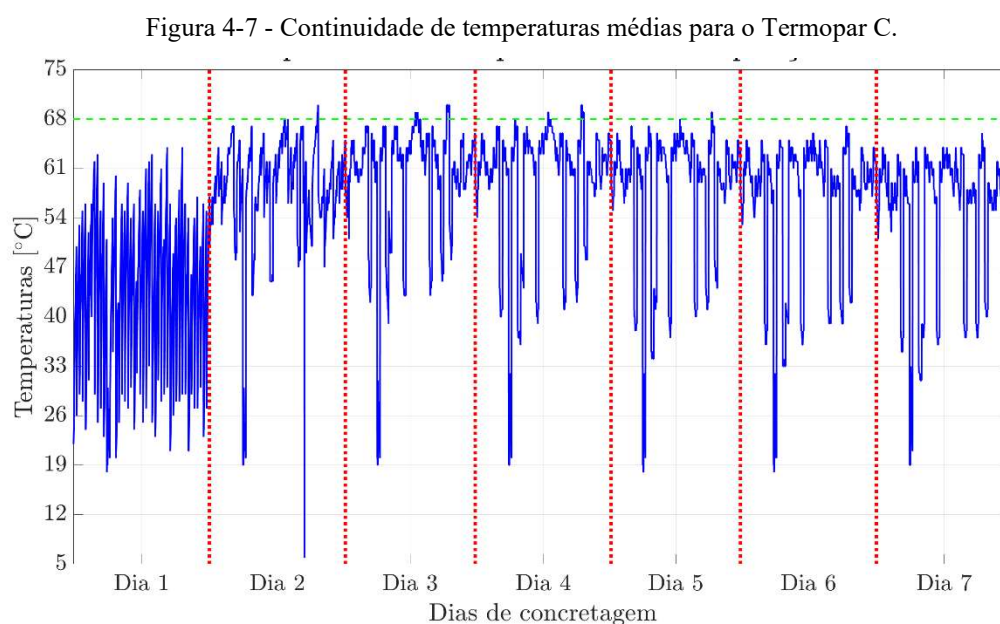


Fonte: Autor, 2023.

A maior variabilidade, como nas demais análises, permanece no primeiro dia, contudo, é possível destacar a redução da variabilidade para os demais dias (redução do tamanho da caixa do *boxplot*), podendo ser devido a interferência térmica que sofre das demais camadas.

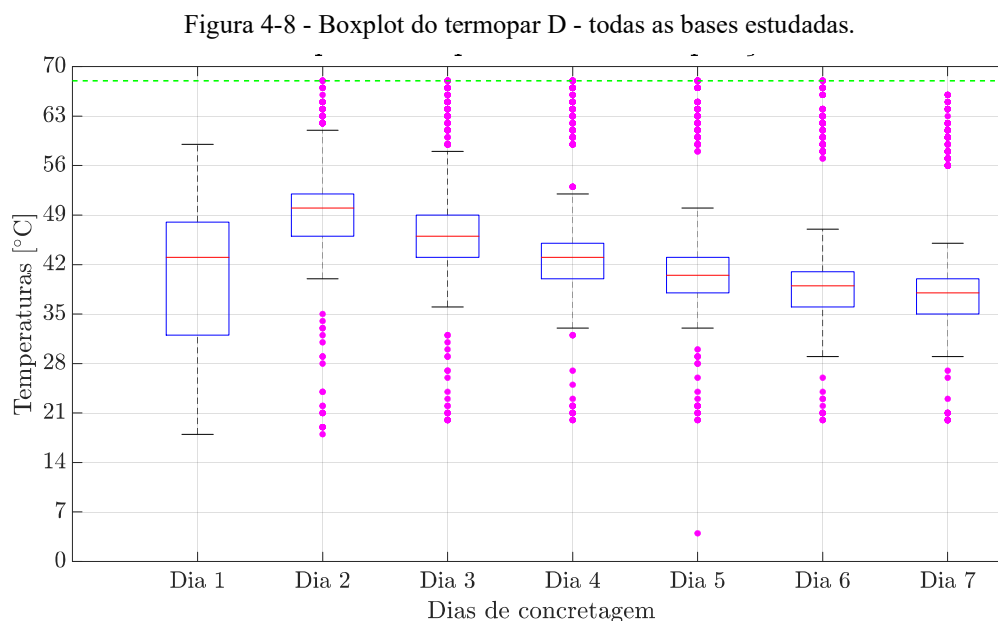
Entre o segundo e quinto dia é verificada a superação do limite de temperatura estabelecido no estudo termomecânico, sendo este o termopar de maior alcance das temperaturas máximas. Além da extrapolação do limite de temperatura, outro ponto de atenção é a quantidade de *outliers* verificada, sendo incompatível com análises padrões.

Os indícios de resfriamento se mantêm ao quinto dia, contudo, verifica-se uma sutil elevação das médias de temperatura. A Figura 4-7 apresenta os dados a respeito da continuidade das temperaturas para o termopar C.



Fonte: Autor, 2023.

O comportamento já evidenciado como anormal para os outros termopares se repete, sendo amplificado por picos negativos para uma oscilação cada vez mais crescente no primeiro dia. O último termopar, D, é o que sofre maiores interferências por seu contato com o ambiente externo, meio de menor elevações de temperatura. Seu comportamento pode ser verificado pela Figura 4-8.

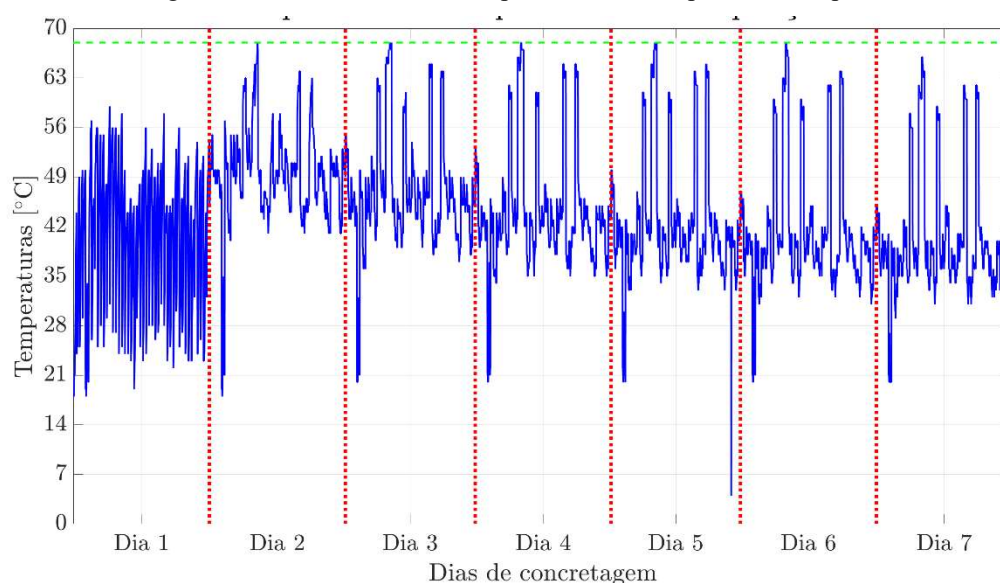


Fonte: Autor, 2023.

A análise do último termopar revela um resfriamento anterior aos demais, sendo iniciado no segundo dia, somado a isso, os picos máximos de temperatura são significativamente menores, assim como as médias de temperatura.

Assim como no termopar C, as incoerências verificadas pela quantidade de *outliers* se mantém, sendo apresentados tanto nos limites inferiores quanto superiores. A visualização a partir da continuidade da temperatura de todo o grupo amostral pode ser verificada a partir da Figura 4-9.

Figura 4-9 - Continuidade de temperaturas médias para o Termopar D.



Fonte: Autor, 2023.

Embora seja normal uma variação de temperatura, não é esperado que ela ocorra com grande intensidade em um intervalo curto de tempo. Assim como nos outros termopares, a análise contínua da temperatura não apresenta grande relevância, a respeito disso, será discorrido sobre prováveis justificativas.

A instalação de parques eólicos requer um grande distanciamento das bases, o que pode ser verificado pelo Anexo A e atestado pela norma IEC 61400 - 1 (Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements), com isso, há diferentes tipos de solo que provocam as mais variadas interações com as fundações, assim como pode ocasionar em variações climáticas e de incidência de ventos, pela altitude em que são realizadas, fatores que influenciam diretamente o comportamento térmico das fundações.

Diante das condições expostas e dos comportamentos verificados acima, conclui-se que as temperaturas das bases dos aerogeradores não devem ser analisadas em conjunto, já que não são submetidas às mesmas condições. Sendo assim, a correta análise deve ser realizada por meio da amostragem aleatória, conforme proposto por Montgomery e Runger (2012), que expõe o componente aleatório em experimentos com pequenas variações em variáveis que não estejam controladas, como as alterações nas temperaturas ambiente.

4.2 COMPORTAMENTO DE BASES ALEATÓRIAS

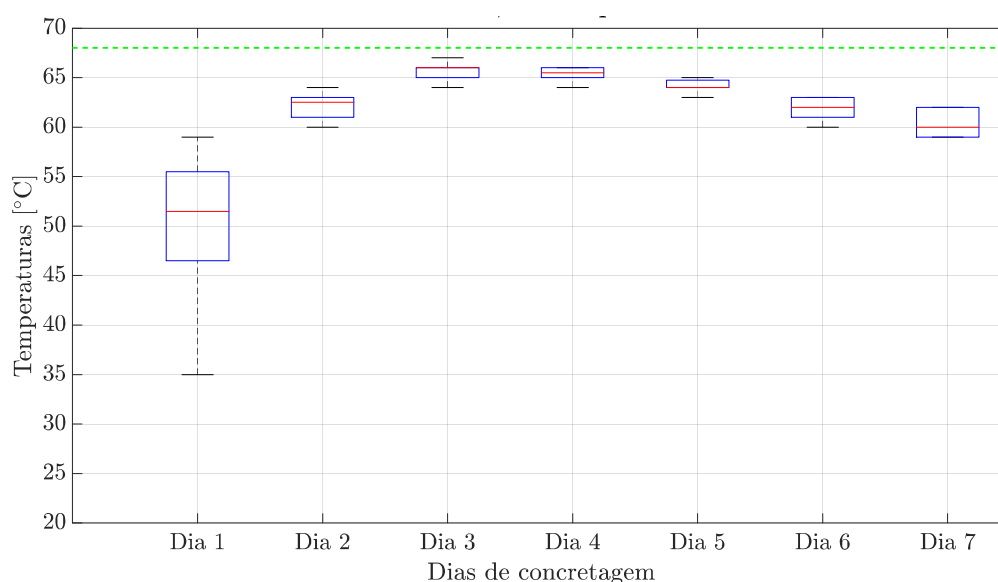
Devido à extensão territorial dos parques Eólicos, as bases são submetidas a diferentes condições de altitude, temperatura, umidade e composição do solo, inviabilizando a análise dos dados em conjunto e revelando a necessidade de análise a partir da seleção de bases escolhidas aleatoriamente.

Sendo assim, foi proposta a análise das informações a partir da seleção de 5 bases aleatórias, objetivando estabelecer alguns parâmetros do comportamento das temperaturas. Foram elaborados *Blospot's* para cada termopar e base, avaliando o comportamento para os sete dias em que foram acompanhadas as temperaturas.

As bases selecionadas foram LEI 03-07, LEI 03-08, LEI 04-07, LEI 05-06 e LEI 12-15, sendo identificadas na análise gráfica por Base 01, 02, 03, 04 e 05, sucessivamente. Sua localização pode ser verificada a partir do Anexo A.

A seguir será exposto o comportamento térmico por camada para todas as bases evidenciadas, iniciando com a camada V1 – Base 1, expressa pela Figura 4-10.

Figura 4-10 - Boxplot do termopar A - Base 1.



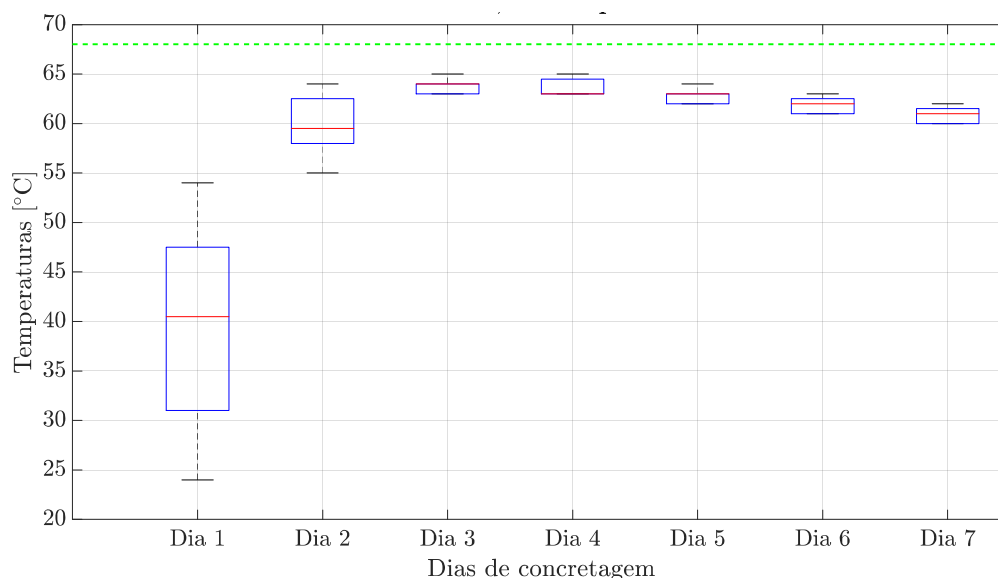
Fonte: Autor, 2023.

Para essa camada pode haver uma maior influência calorífica do solo devido ao seu contato com a camada de regularização. A visualização da Base 01 revela uma maior variação térmica no primeiro dia, podendo ser justificada pela rápida elevação de temperatura do concreto. A

temperatura máxima foi atingida no terceiro dia, não superando a máxima estabelecida de 68°C fixada no estudo termomecânico. O aquecimento é verificado até o terceiro dia, ou seja, 72 horas após a concretagem, sendo que após esse período pode ser constatado o resfriamento da base, como observado pela diminuição das temperaturas máximas a partir do quarto dia.

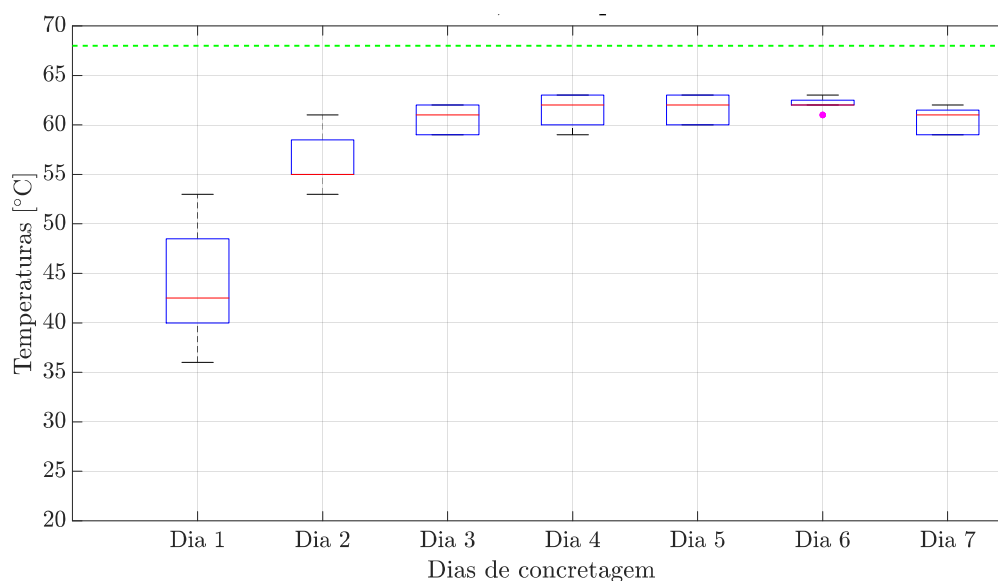
A ausência de hastes superiores para os dias 04, 06 e 07 indicam a ocorrência dos valores máximos de temperatura no quartil superior. A mesma análise é válida para a ausência de hastes inferiores, estando os dados de temperatura mínima no quartil inferior. A concentração dos dados é identificada pela localização da barra vermelha na caixa de dados. A Figura 4-11 apresenta os dados da base 02 para a mesma camada.

Figura 4-11 - *Boxplot* do termopar A - Base 2.



Fonte: Autor, 2023.

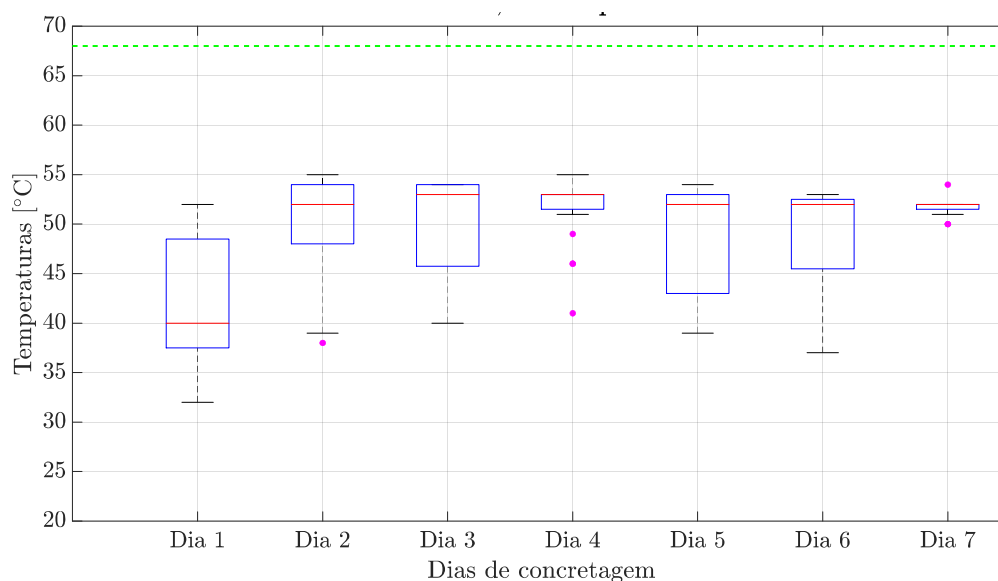
Para esta base também é possível notar uma maior amplitude térmica para o primeiro dia, com aquecimento até o terceiro dia, seguido pelo seu resfriamento. Não houve extrapolação do limite máximo de temperatura estabelecido de 68°C. A análise do termopar A da base 03 pode ser verificada a partir da Figura 4-12.

Figura 4-12 - *Boxplot* do termopar A - Base 3.

Fonte: Autor, 2023.

Como previsto a partir das demais visualizações, o primeiro dia apresentou uma maior variação térmica, no entanto, o período de aquecimento se estendeu até o quarto dia, sendo posteriormente seguido pelo sutil resfriamento da camada. Também é possível notar a presença de *outlier* no sexto dia, sendo este valor discrepante da amostra, podendo ser relacionado a algum erro do termopar ou de coleta da informação, ou até mesmo algum valor fora do padrão analisado.

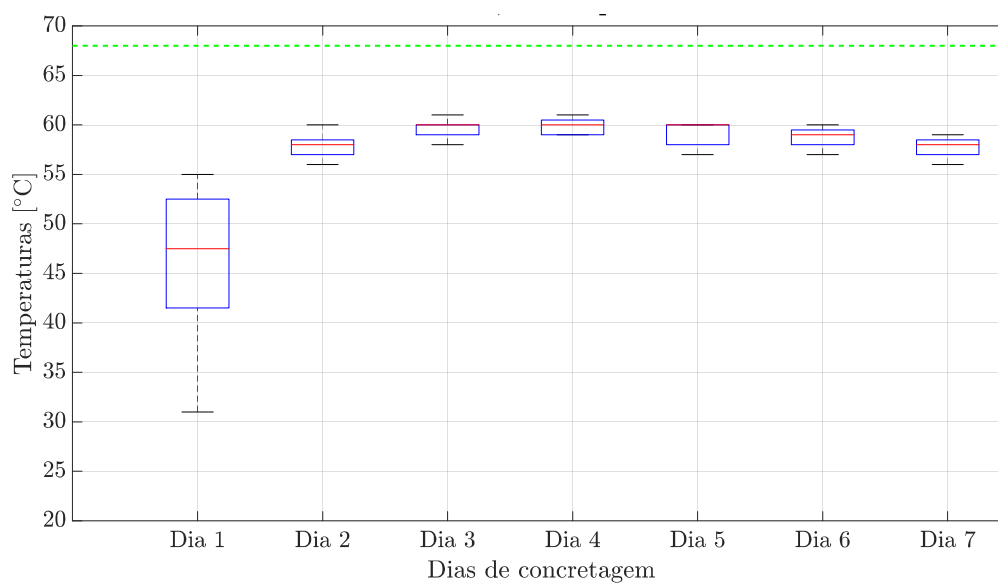
Para a base 04, as informações de temperatura para a camada analisada são representadas na Figura 4-13.

Figura 4-13 - *Boxplot* do termopar A - Base 4.

Fonte: Autor, 2023.

Diferentemente das demais bases, notamos picos de temperaturas inferiores para todos os dias de acompanhamento, bem como em uma maior amplitude térmica para os mesmos, isso pode ser devido a condições diferenciadas as quais essa base está sujeita, como temperatura na semana de concretagem além das diversas condições que levaram a esta análise aleatória.

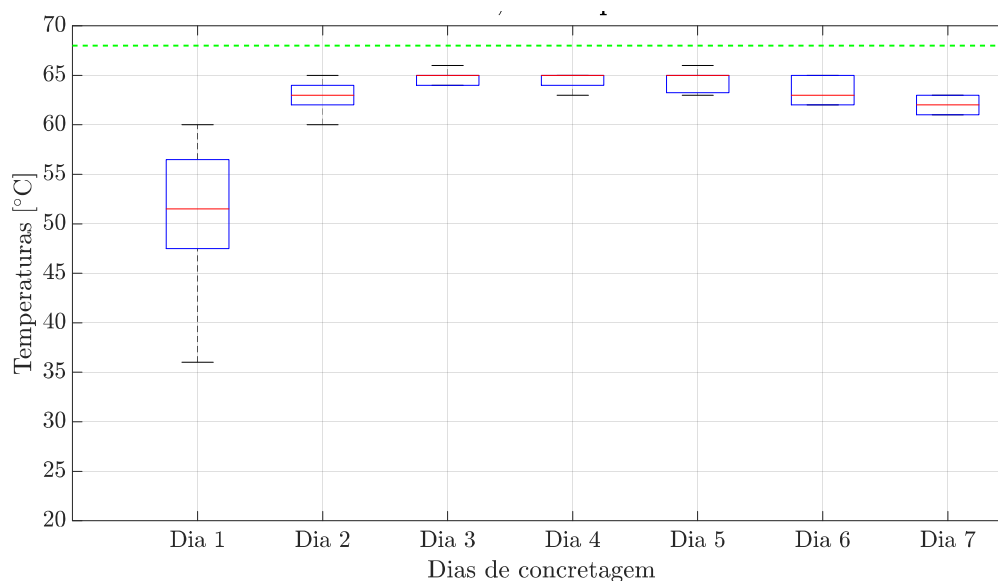
Um número maior de *outliers* também pode ser observado, sendo presente no segundo, quarto e sétimo dia. A Figura 4-14 expressa os dados para o termopar A da última base analisada.

Figura 4-14 - *Boxplot* do termopar A - Base 5.

Fonte: Autor, 2023.

Seguindo os padrões das primeiras bases, a maior variação térmica ocorre no primeiro dia, apresentando um aquecimento do primeiro ao terceiro dia, seguido pelo seu resfriamento. O limite de temperatura estabelecido não foi ultrapassado.

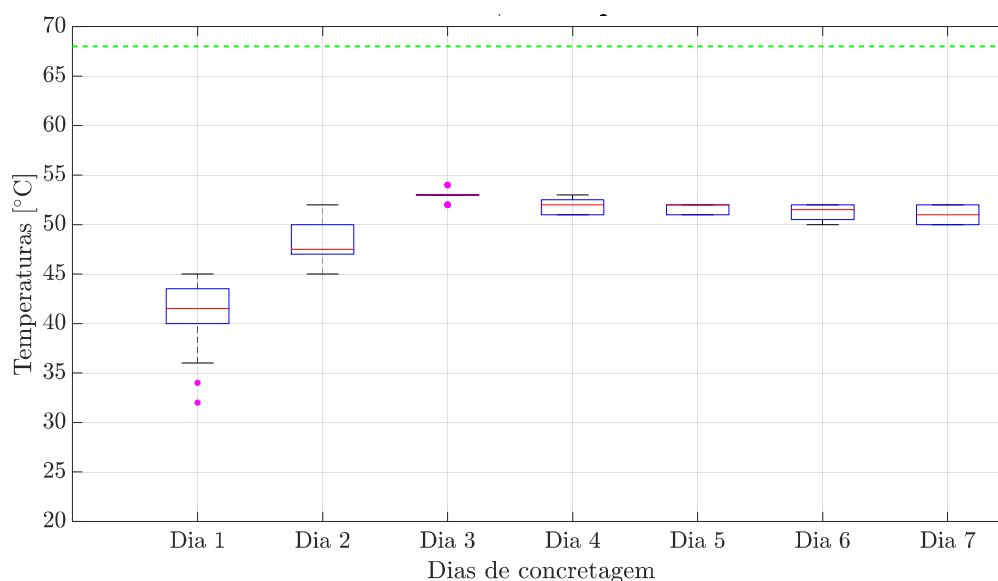
As mesmas análises foram realizadas para o termopar B, sendo a base 1 apresentada na Figura 4-15 a seguir. Para esta região destaca-se as interferências caloríficas das duas camadas contíguas, sendo elas a camada A e C.

Figura 4-15 - *Boxplot* do termopar B - Base 1.

Fonte: Autor, 2023.

A partir da verificação do comportamento das bases, observa-se um desempenho similar ao termopar A, com uma maior variação térmica no primeiro dia, contudo, a proximidade com outras camadas de grande coeficiente térmico impede que haja a dissipação de calor, logo, pode ser verificado um resfriamento reduzido quando comparado a primeira camada.

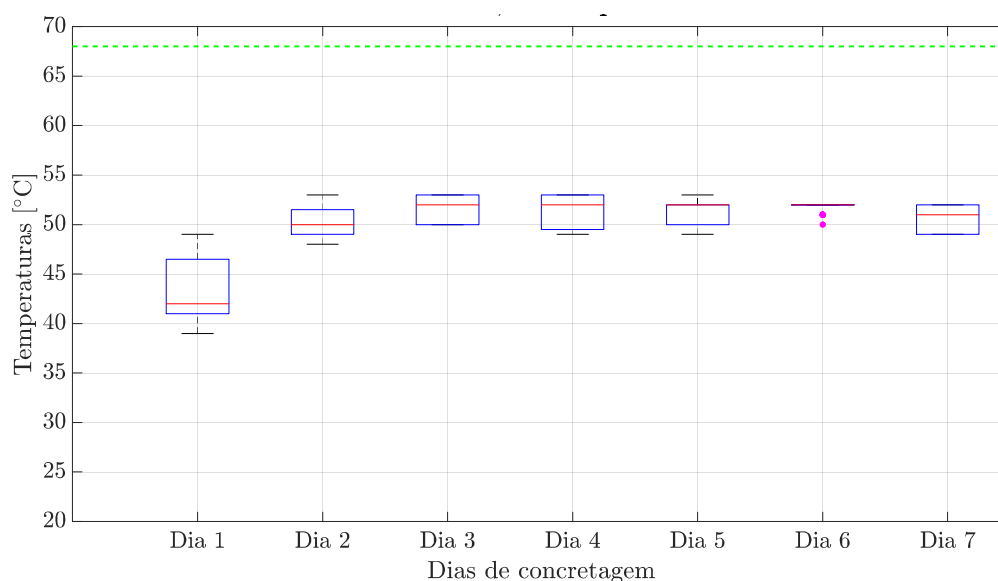
Embora o processo de resfriamento seja crítico, não houve a superação do limite máximo de temperatura. A exposição dos dados para a base 02 é verificada na Figura 4-16.

Figura 4-16 - *Boxplot* do termopar B - Base 2.

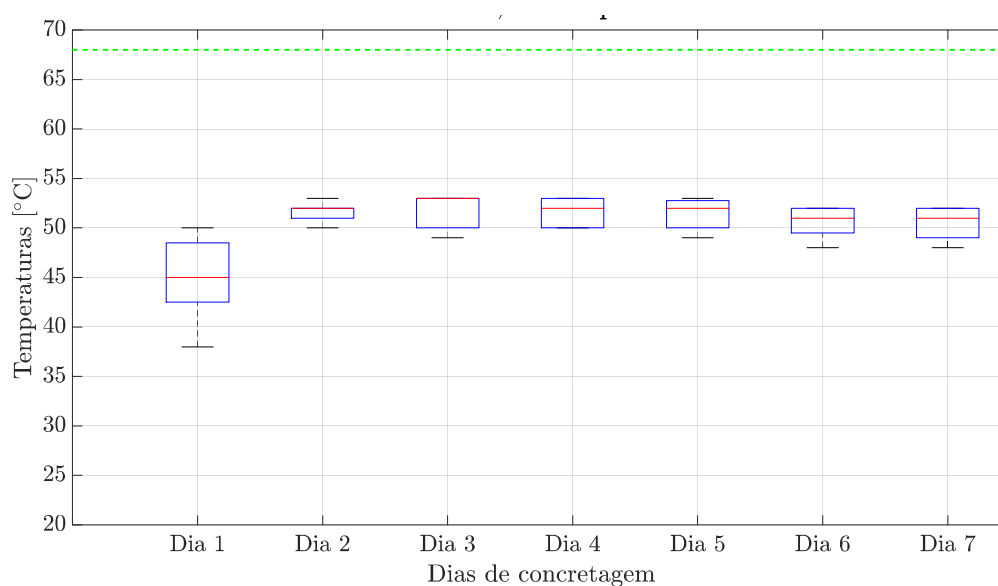
Fonte: Autor, 2023.

Para essa base é possível verificar temperaturas máximas relativamente menores do que as evidenciadas na análise anterior, dentre os possíveis fatores destaca-se a temperatura ambiente do dia, assim como as demais condições que as fundações estão sujeitas. Alguns *outliers* também podem ser verificados, sendo estes presentes no primeiro e terceiro dia.

Para o dia 03 é possível verificar a redução das variações térmicas, com uma aproximação do limite inferior e superior do *boxplot*, dada a semelhança das temperaturas que se mantiveram na faixa de 52°C e 53 °C. Os dados de temperatura para o termopar B das bases 03 e 05 apresentam grande similaridade, sendo expressas pela Figura 4-17 e Figura 4-18, respectivamente.

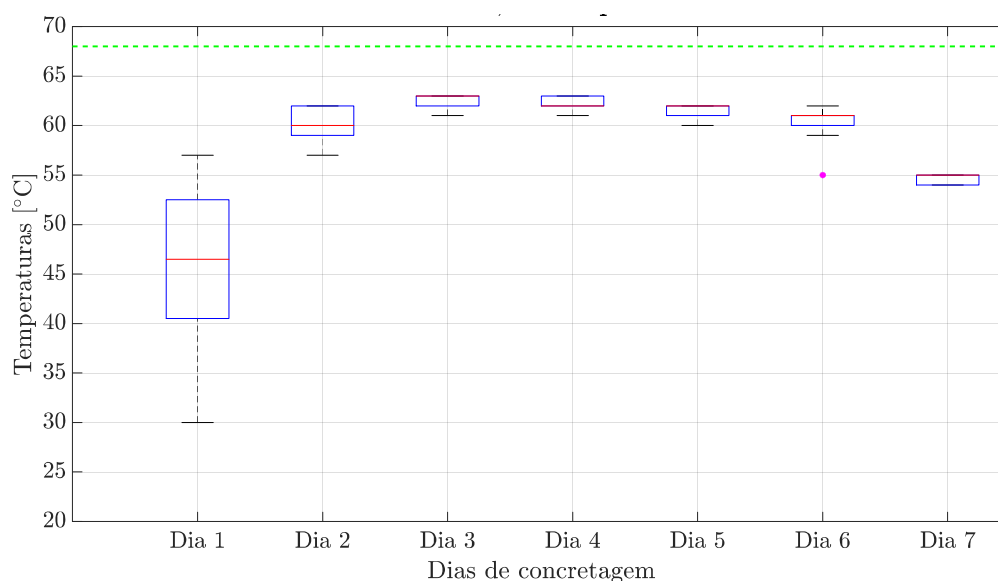
Figura 4-17 - *Boxplot* do termopar B - Base 3.

Fonte: Autor, 2023.

Figura 4-18 - *Boxplot* do termopar B - Base 5.

Fonte: Autor, 2023.

Observa-se uma maior variação térmica no primeiro dia e picos menores de temperatura, não superando os 55°C. Além disso, o resfriamento ocorre lentamente, com pouca variação ao longo dos dias. O sexto dia da Base 3 apresenta uma redução considerável das variações térmicas. A Figura 4-19 apresenta o comportamento da camada B para a última base.

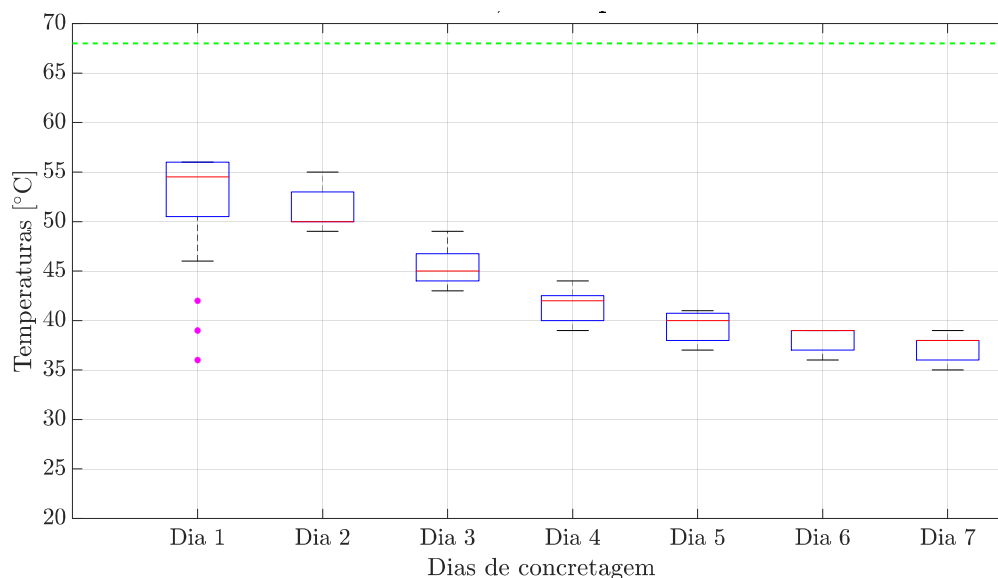
Figura 4-19 - *Boxplot* do termopar B - Base 4.

Fonte: Autor, 2023.

Para a Base 04 é possível verificar o alcance de maiores temperaturas quando comparada as demais, com período de aquecimento e resfriamento semelhantes. O termopar C possui grande semelhança ao termopar B, já que apresenta duas regiões concretadas de interferência calorífica, sendo assim, os gráficos desse termopar serão expostos nos Anexo B - E, dispensando maiores explicações para ele.

A última camada, na qual o termopar D está instalado, conta com influência interna da camada adjacente C e externa do ambiente, sendo assim, o contato com o ambiente externo provoca um resfriamento mais acelerado do que as outras camadas já discutidas. A Figura 4-20 revela as informações do termopar D na Base 01.

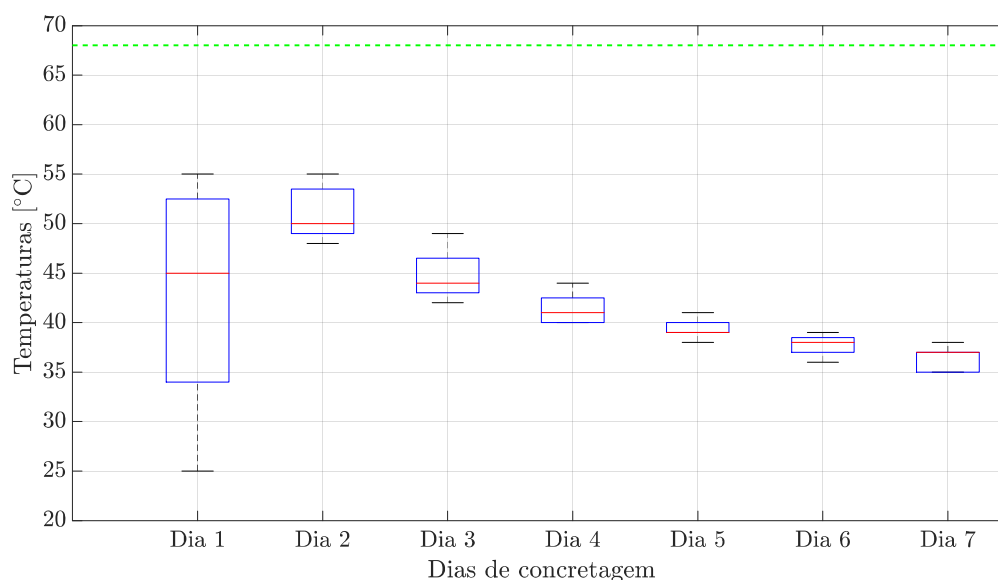
Figura 4-20 - Boxplot do termopar D - Base 1.



Fonte: Autor, 2023.

É possível notar que, para esse termopar não temos período de aquecimento, apenas resfriamento, isso se deve a contribuição do ambiente externo na diminuição de temperatura devido as trocas caloríficas da base com o meio. Evidenciamos também a rapidez de resfriamento, com redução de cerca de 20°C no período analisado. A base 02 é exposta na Figura 4-21.

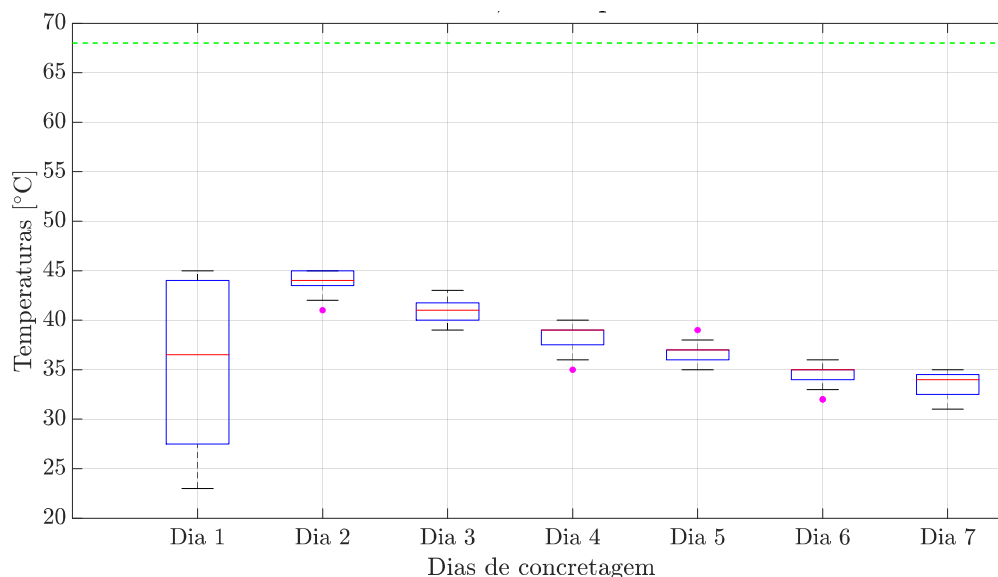
Figura 4-21 - Boxplot do termopar D - Base 2.



Fonte: Autor, 2023.

Para a base 02 notamos uma sutil elevação de temperatura do primeiro ao segundo dia, seguido pelo rápido resfriamento já esperado. Também é possível observar uma grande variação térmica no primeiro dia. A Figura 4-22 expõe as informações do termopar D para a base 03.

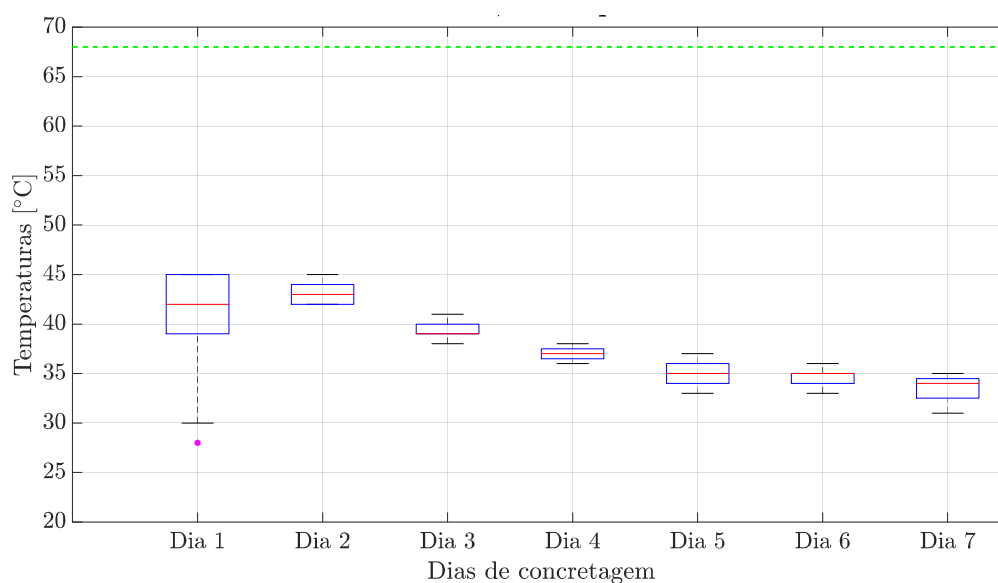
Figura 4-22 - *Boxplot* do termopar D - Base 3.



Fonte: Autor, 2023.

Com picos de temperatura relativamente menores, observamos um comportamento muito semelhante a base 02, com grande variação térmica no primeiro dia e resfriamento acelerado a partir do segundo dia. A análise da última base é evidenciada a partir da Figura 4-23.

Figura 4-23 - *Boxplot* do termopar D - Base 4.



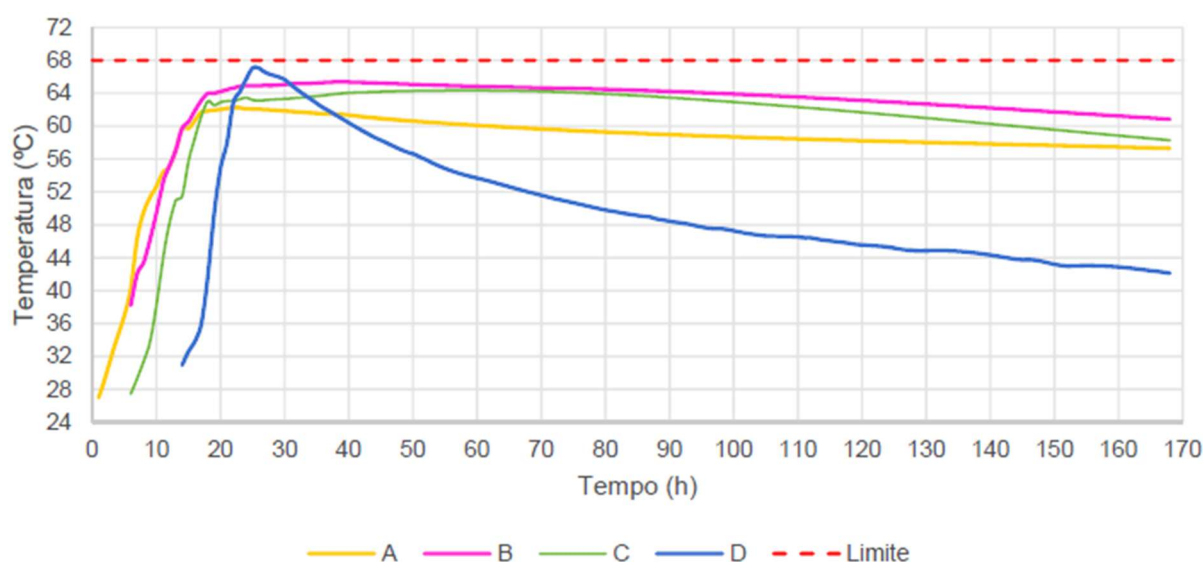
Fonte: Autor, 2023.

O comportamento esperado se confirma para a base 04, com resfriamento acelerado desde o primeiro dia. Diante do exposto é possível confirmar a eficiência da análise de amostras aleatórias, o atendimento à limitação de temperatura se comprovou pelas análises comportamentais, se mantendo dentro dos resultados previstos e confirmando a eficiência do método de resfriamento utilizado. As divergências de desempenho das bases devem-se às diferentes condições as quais estão submetidas.

4.3 COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS CAMADAS DE CONCRETAGEM

Diante da realização do estudo termomecânico, considerando os fatores de temperatura, incidência de ventos e volume das concretagens, foi definido o comportamento esperado pelas bases dos aerogeradores, conforme evidenciado pela Figura 4-24, que apresenta os valores médios por base e camada.

Figura 4-24 - Evolução esperada para as temperaturas em cada camada.



Fonte: CATEC CONSULTORIA E ASSESSORIA TÉCNICA EM ENGENHARIA LTDA, 2022.

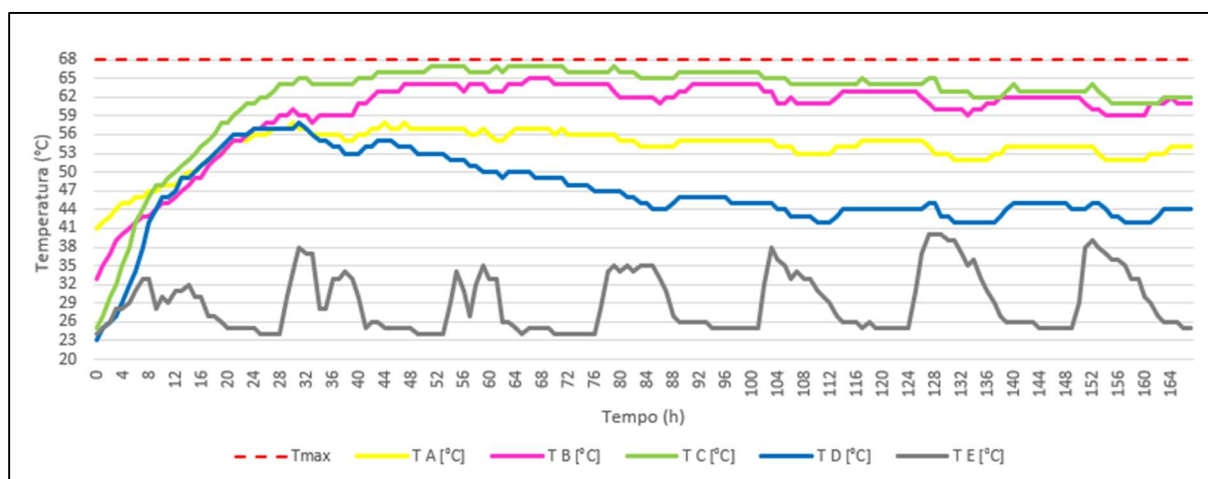
Verifica-se que o ponto D é o que apresenta o maior pico de temperatura, chegando próximo ao limite de 68 °C. Isso pode ser justificado pelo fato de ele estar no volume V4, conforme

mostrado pela Figura 3-2, o qual é composto pelo traço de 40 MPa e, consequentemente, tem o maior consumo de cimento (452 kg/m^3 contra 357 kg/m^3 para o concreto de 30 MPa).

Além disso, após o pico de temperatura, o ponto D sofre um resfriamento mais acelerado, isso devido a sua proximidade com a superfície e a maior facilidade no processo de troca de calor com o ambiente. Após o lançamento do volume V4, nenhum outro volume de concreto foi lançado, não existindo, portanto, influência de um novo volume de concreto sobre ele, apenas da temperatura ambiente.

De forma a verificar o comportamento térmico esperado, foi plotado o desempenho de uma base escolhida aleatoriamente, como é possível verificar a partir da Figura 4-25.

Figura 4-25 - Comportamento de concretagem de base LEI 04-12.



Fonte: Autor, 2023.

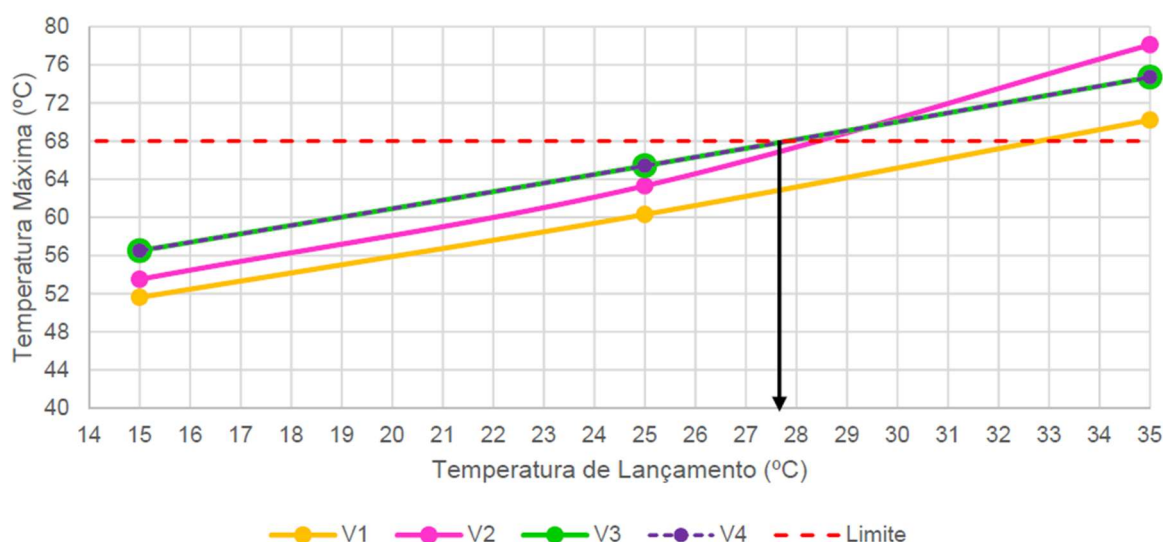
A partir da verificação do comportamento da base LEI 04-12, é possível verificar que, diferentemente do modelo proposto, a temperatura máxima é atingida pelo termopar localizado na camada C, isso se deve ao fato de estar localizado em uma das regiões centrais e sofrer as maiores influências do calor de condução das camadas adjacentes.

A queda de temperatura mais acentuada para a camada D segue os princípios do modelo apresentado, sendo devido as interferências do ambiente externo, cujas oscilações de temperatura podem ser verificadas a partir da curva “T E [°C]”.

Outra análise de extrema importância é a verificação das temperaturas máximas alcançadas pelo concreto massa, apresentada na Figura 4-26. A partir dessa observação é possível evidenciar as

camadas que atingem as maiores temperaturas nas simulações realizadas, e consequentemente, demandam maiores atenções.

Figura 4-26 - Temperaturas máximas alcançadas em V1, V2, V3 e V4 com a variação de temperatura de lançamento em 15°C (S1), 25°C (S2) e 35°C (S3).

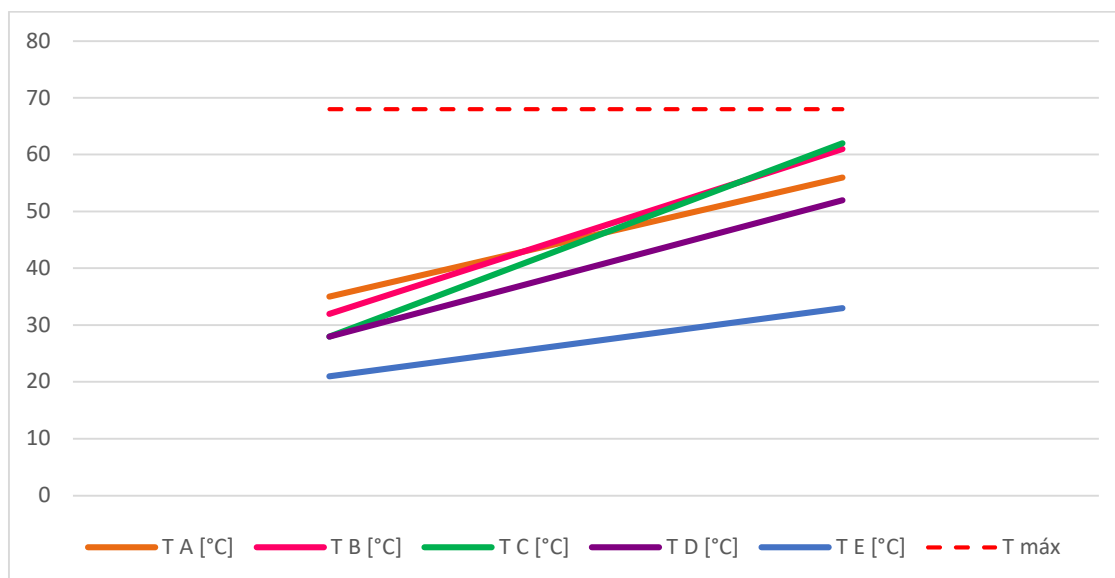


Fonte: CATEC CONSULTORIA E ASSESSORIA TÉCNICA EM ENGENHARIA LTDA, 2022.

Apesar de o volume V3 ser composto por concreto de 30 MPa, ou seja, com menor consumo de cimento, sua curva de elevação térmica coincide com a curva do volume V4, composto por concreto de 40 MPa e, consequentemente, maior consumo de cimento. Isso ocorre devido à influência que a elevação térmica do V4 exerce sobre o V3, uma vez que um está sobre o outro e suas espessuras são relativamente pequenas, menores que 50 cm.

A verificação das temperaturas máximas e mínimas foi realizada a partir das médias dos valores atingidos. Como o objetivo central deste estudo é a verificação do calor de hidratação das bases, foi analisado os dados em conjunto com o objetivo de obter dados representativos de seus picos, sendo assim, os resultados são expressos a partir da Figura 4-27.

Figura 4-27 - Temperaturas médias máximas e mínimas por camada de concretagem.



Fonte: Autor, 2023.

As temperaturas médias de lançamento do concreto para a base em questão podem ser verificadas a partir da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Temperatura médias de lançamento do concreto.

Camada	Temperatura de lançamento [°C]
Camada A	17,1
Camada B	18,0
Camada C	22,4
Camada D	22,4

Fonte: CATEC CONSULTORIA E ASSESSORIA TÉCNICA EM ENGENHARIA LTDA, 2022.

A partir da observação da Figura 4-27 em conjunto com as informações de temperatura, é possível esclarecer que, embora as camadas C e D apresentem valores idênticos mínimos, a menor temperatura de pico da Camada D revela uma menor exigência de intervenções a fim de diminuir a sua temperatura, já que o contato com o meio externo se apresenta como importante

fator para a diminuição da temperatura da base. Vale ressaltar que, por ser a camada externa, foi submetida a cura úmida e aplicação de manta de bidim⁷, auxiliando em seu processo de cura. Por fim, os valores máximos de temperatura foram atingidos pelas camadas C e B, respectivamente. Por apresentarem uma localização mais interna da fundação, não conseguem liberar calor tão facilmente para o meio externo e apresentam um consequente aumento dos valores de temperatura.

⁷ Manta do tipo geotêxtil que dentre suas funções, destaca-se o retardamento da evaporação de água durante o processo de cura do concreto.

5. CONCLUSÃO

Ao analisar as condições de instalação de Usinas Eólicas é possível evidenciar que a escolha dos materiais das torres é fundamental para o processo como um todo, já que os carregamentos influenciam diretamente nas dimensões e especificações das fundações, sendo assim, bases de menores dimensões resultam em menores temperaturas no interior das concretagens, no entanto tal redução é inviabilizada pelo comprometimento estrutural dos aerogeradores.

A partir da revisão bibliográfica evidenciou-se os métodos de resfriamentos mais utilizados, o processo de cura e os efeitos do calor de hidratação, relacionando-os com os dados das fundações executadas.

Diante do aquecimento do concreto massa, o método de resfriamento utilizado (substituição de água por gelo), comprova-se como intervenção de sucesso, já que, em geral, proporcionou a limitação do alcance da temperatura máxima estabelecida, sendo esta de 68°C, evitando assim eventuais fissurações patológicas, segundo o Estudo Termomecânico.

Diante da validação do comportamento das fundações foi proposta a análise dos dados em conjunto, objetivando traçar o comportamento das fundações em geral, contudo, tal análise mostrou-se insatisfatória pela variação das condições submetidas as concretagens, não sendo possível traçar um padrão claro para as amostras.

De tal forma, a análise obedeceu a determinação aleatória, sendo que o comportamento das fundações seguiu o modelo proposto pelo Estudo Termomecânico, comprovando assim a eficácia da análise numérica realizada e do método de resfriamento utilizado, bem como a escolha do consumo de cimento proposto a partir do traço especificado.

6. REFERÊNCIAS

ABDUL AWAL, A. S. M.; WARID HUSSIN, M. Effect of Palm Oil Fuel Ash in Controlling Heat of Hydration of Concrete. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 2650–2657, 1 jan. 2011.

ABEEÓLICA. Boletim Anual. 2021.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ARAÚJO, A. A.; MOURA, G. J. B. DE. A literatura científica sobre os impactos causados pela instalação de parques eólicos: análise cienciométrica. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 13, n. 28, p. 207, 1 maio 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento portland. v. 7 ed, p. 28, dez. 2002.

BALLIM, Y. A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 6, p. 695–703, 1 ago. 2004.

CATEC CONSULTORIA E ASSESSORIA TÉCNICA EM ENGENHARIA LTDA. **RELATÓRIO Nº 63/22. ESTUDO TERMOMECAÂNICO DO CONCRETO DOS BLOCOS DE FUNDAÇÃO DOS AEROGERADORES DO COMPLEXO EÓLICO RIO DOS VENTOS EXPANSÃO, EM CAIÇARA DO RIO DO VENTO/RN**. [s.l: s.n.].

CEBECI, O. Z. Strength of concrete in warm and dry environment. **Materials and Structures**, v. 20, p. 270–272, 1987.

CHASTRE, C.; LÚCIO, V. Evolução histórica, desenvolvimento atual e potencial futuro das torres de concreto pré-moldado para suporte de aerogeradores. **Concreto&Construções**, p. 24–112, 2014.

CONOVER, W. J. **Practical Nonparametric Statistics**. [s.l: s.n.]. v. 3 rd

FERRARIS, C. F. **Alkali-Silica Reaction and High Performance Concrete**. [s.l: s.n.].

GAJDA, J.; VANGEEM, M. Controlling temperatures in mass concrete. **Concrete International**, p. 59–62, jan. 2002.

GAMBALE, E. A. **Efeito da temperatura sobre o concreto**. Anápolis. Universidade Estadual De Goiás, , 2019a.

GAMBALE, E. DE A. **O fenômeno térmico do concreto massa. XVII Semana de Engenharia Civil.** Universidade Federal de Goiás, , 2019b.

GAMBALE, P. G. Temperature and stress development in ultra-high performance concrete during curing. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 63–71, 30 set. 2016.

GAMBALE, P. G. **ESTUDO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CONCRETO MASSA E CONTRIBUIÇÃO AO CÁLCULO TÉRMICO E À PREVISÃO DE FISSURAS DE RETRAÇÃO.** Mestrado em Geotecnia—Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2017.

GÖRTZ, J. et al. Aperture and permeability of aged concrete joints. **Construction and Building Materials**, v. 307, 8 nov. 2021.

HA, J. H.; JUNG, Y. S.; CHO, Y. G. Thermal crack control in mass concrete structure using an automated curing system. **Automation in Construction**, v. 45, p. 16–24, 2014.

HARITH, I. K.; HASSAN, M. S.; HASAN, S. S. Liquid nitrogen effect on the fresh concrete properties in hot weathering concrete. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 7, n. 1, 1 fev. 2022.

HOOBS, D. W. Alkali Silica reaction in concrete. **Thomas Telford**, 1988.

HUANG, Y. et al. Experimental and finite element investigations on the temperature field of a massive bridge pier caused by the hydration heat of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 240–252, 20 dez. 2018.

HUBERT, M.; VANDERVIEREN, E. An adjusted boxplot for skewed distributions. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 52, n. 12, p. 5186–5201, 15 ago. 2008.

INMET. Disponível em: <<https://clima.inmet.gov.br/temp>>. Acesso em: 19 out. 2022.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61400-12-1 (Wind energy generation systems –Part 1: Design requirements).** , 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Technology roadmap - wind energy. **China wind energy development roadmap 2050**, p. 51, 2011.

KIHARA, Y. **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: ASPECTOS MINERALÓGICOS.** [s.l: s.n.].

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, BEATRIX.; PANARESE, W. C. **Design and control of concrete mixtures.** [s.l.] Portland Cement Association, 2002. v. 14 th edition

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estructura, propiedades y materiales**. 2nd. ed. [s.l.] IBRACON, 2014.

MILLER, A.; LI, R. A Geospatial Approach for Prioritizing Wind Farm Development in Northeast Nebraska, USA. **ISPRS International Journal of Geo-Information** 2014, Vol. 3, Pages 968-979, v. 3, n. 3, p. 968–979, 17 jul. 2014.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. [s.l.: s.n.]. v. 5ª Edição

NETO, J. V. et al. Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. **Rev Odontol Bras Centra**, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª Edição ed. Porto Alegre: [s.n.].

NGUYEN, T. C.; LUU, X. B. Reducing temperature difference in mass concrete by surface insulation. **Magazine of Civil Engineering**, v. 88, n. 4, p. 70–79, 2019.

NOVUS. **Datasheet: Registrador LogBox-AA**. Registrador eletrônico de dados - Manual de Instruções V1.1x, , [s.d.].

PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. C.; KOTHARI, S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 3, p. 1513–1524, 1 abr. 2011.

PEREIRA, M. M.; ABIB, M. L. V. DOS S. Relações entre ensino e aprendizagem de conhecimento científico escolar: O caso da dilatação anômala da água. **Latin American Journal of Science Education**, v. 2, p. 22003, 2015.

PESSANHA, J. F.; FRAGOSO, V.; BELTRÃO, G. **ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REGISTROS ANEMOMÉTRICOS E SELEÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS: UM ESTUDO DE CASO**. XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. **Anais...Bento Gonçalves - RS: 2010**.

RAMPINELLI, G. A.; JUNIOR, C. G. DA R. Analysis of Wind Power Generation in Brazilian PowerElectric Matrix. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, 2012.

SAEED, M. K.; RAHMAN, M. K.; BALUCH, M. H. Influence of steel and polypropylene fibers on cracking due to heat of hydration in mass concrete structures. **Structural Concrete**, v. 20, n. 2, p. 808–822, 1 abr. 2019.

SATOH, I. **A scheme for carbon offsetting products and services**. Proceedings - 13th IEEE International Conference on Commerce and Enterprise Computing, CEC 2011. **Anais...2011**. . Acesso em: 27 out. 2022

SHABAB, M. E. et al. Synergistic Effect of Fly Ash and Bentonite as Partial Replacement of Cement in Mass Concrete. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 5, p. 1987–1995, 2016.

TANG, S. W. et al. **Recent durability studies on concrete structure**. **Cement and Concrete Research** Elsevier Ltd, , 1 dez. 2015.

TOPHAM, E. et al. Recycling offshore wind farms at decommissioning stage. **Energy Policy**, v. 129, p. 698–709, 1 jun. 2019.

TRAN, M. VAN; CHAU, V. N. Mass Concrete Placement of the Offshore Wind Turbine Foundation: A Statistical Approach to Optimize the Use of Fly Ash and Silica Fume. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 15, n. 1, 1 dez. 2021.

WANG, L. et al. Hydration, mechanical property and C-S-H structure of early-strength low-heat cement-based materials. **Materials Letters**, v. 217, p. 151–154, 15 abr. 2018.

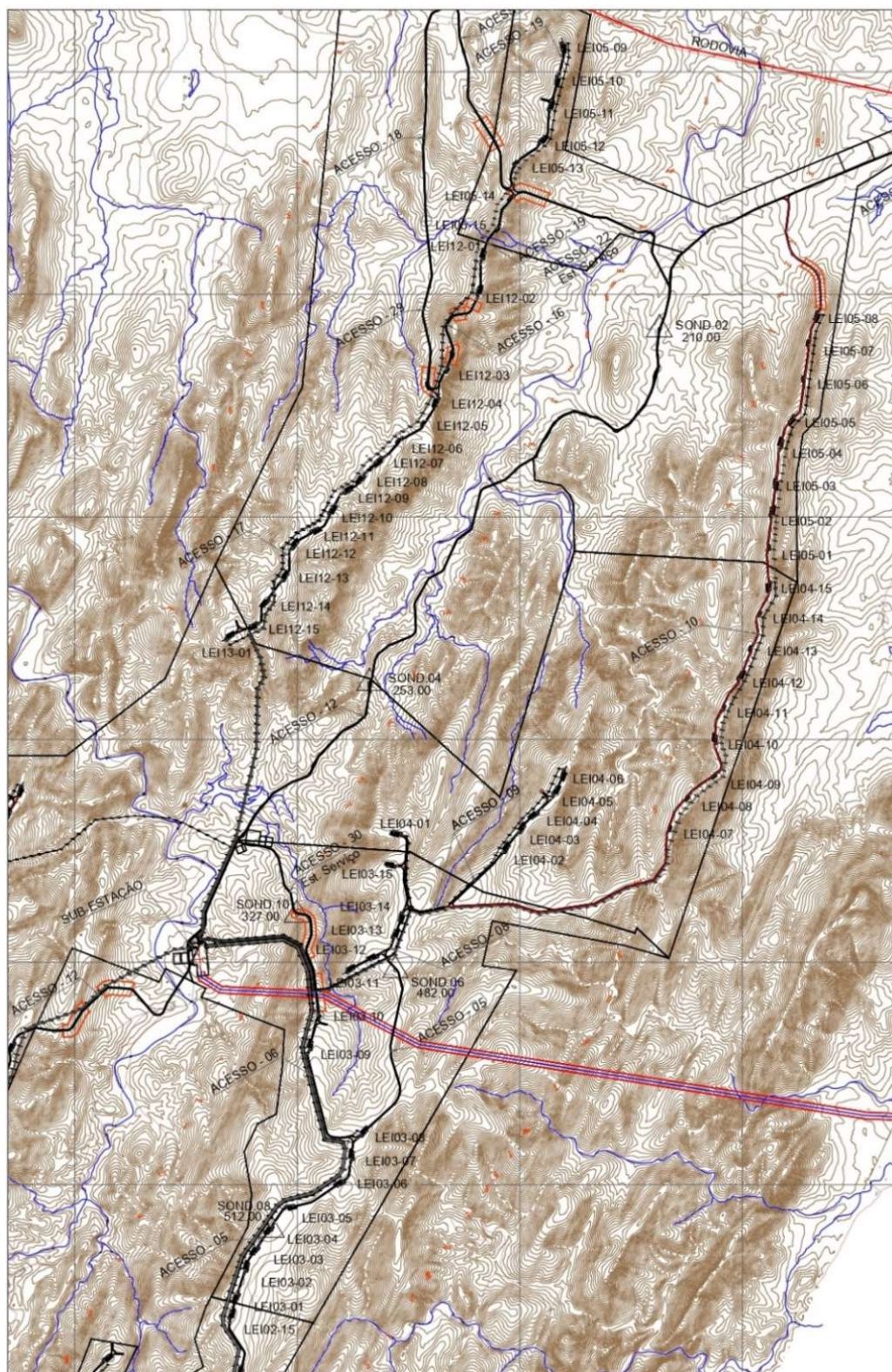
WINDBOX. **Componentes dos aerogeradores: conheça toda a sua estrutura**. Disponível em: <<http://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>>. Acesso em: 30 out. 2022.

XU, G. et al. Early-age hydration and mechanical properties of high volume slag and fly ash concrete at different curing temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 367–377, 15 set. 2017.

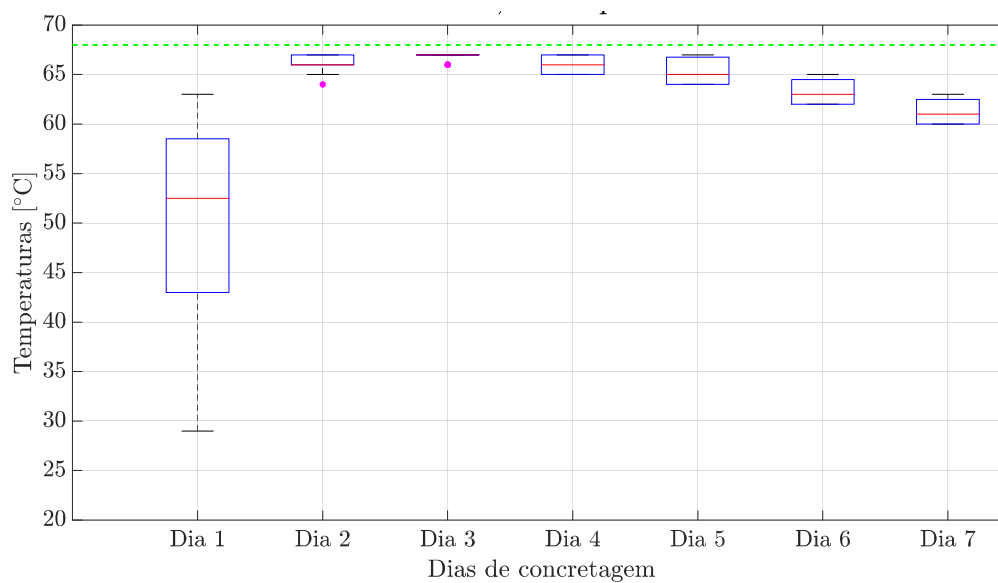
YIKICI, T. A.; SEZER, H.; CHEN, H. L. Modeling Thermal Behavior of Mass Concrete Structures at Early Age. **Transportation Research Record**, v. 2676, n. 6, p. 536–548, 1 jun. 2022.

7. ANEXOS

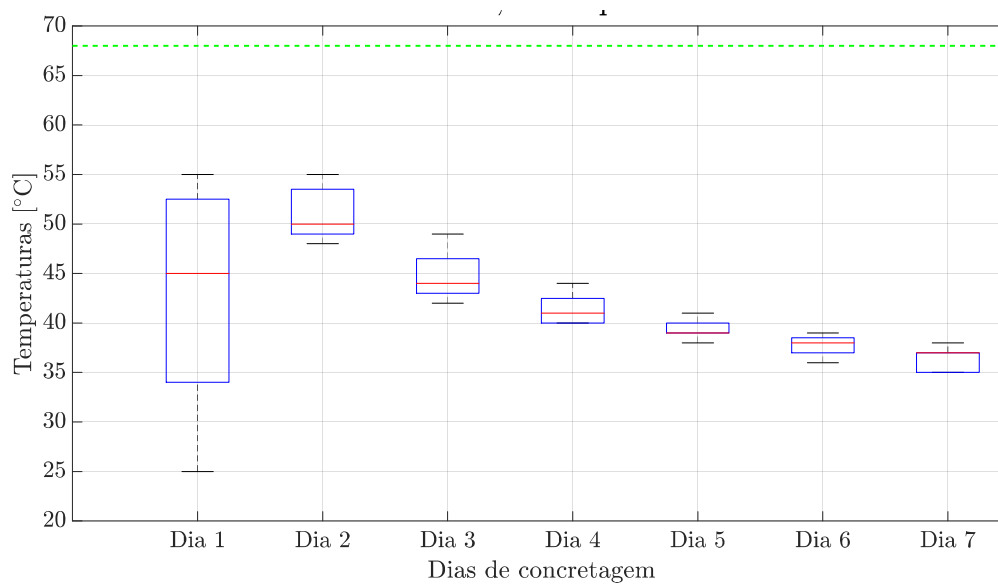
Anexo A - Planta do Parque Eólico



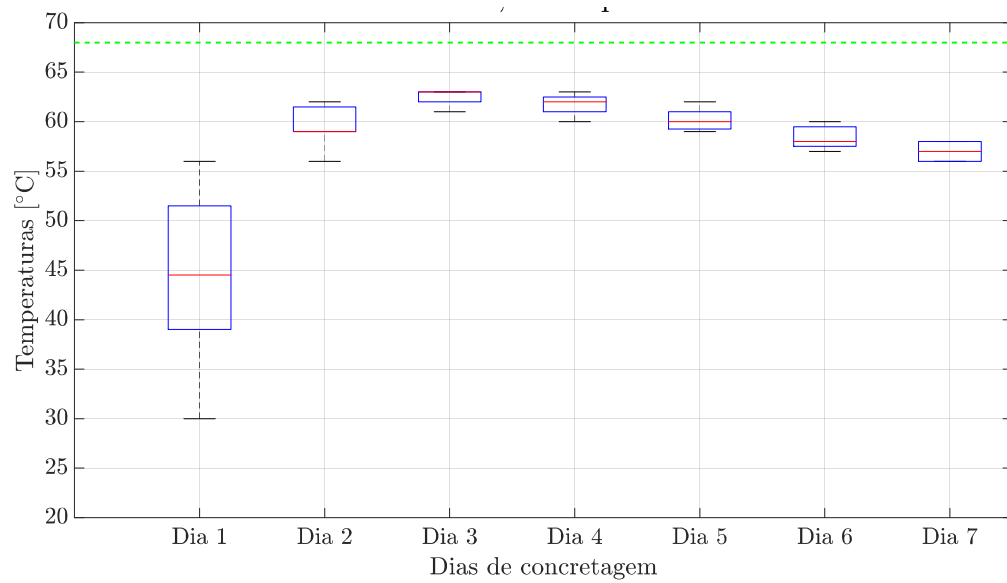
Anexo B – Boxplot do termopar C – Base 1.



Anexo C - Boxplot do termopar C - Base 2.



Anexo D - Boxplot do termopar C - Base 3.



Anexo E - Boxplot do termopar C - Base 4.

