



FACULDADE ARI DE SÁ
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MAURÍCIO FERREIRA DO NASCIMENTO

**CONCRETAGEM DE GRANDES VOLUMES E COMO CONTROLAR OS EFEITOS
DA ALTA TEMPERATURA**

FORTALEZA
2021

MAURÍCIO FERREIRA DO NASCIMENTO

CONCRETAGEM DE GRANDES VOLUMES E COMO CONTROLAR OS EFEITOS DA
ALTA TEMPERATURA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Me. Francisca Lilian Cruz Brasileiro.

FORTALEZA

2021

MAURÍCIO FERREIRA DO NASCIMENTO

CONCRETAGEM DE GRANDES VOLUMES E COMO CONTROLAR OS EFEITOS DA
ALTA TEMPERATURA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá, como
requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

APROVADO EM ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Profa. Me. Francisca Lilian Cruz Brasileiro.
Orientadora – Faculdade Ari de Sá

Profa. Dra. Julianne Ribeiro dos Santos.
Examinadora – Faculdade Ari de Sá

Prof. Me. Davi Valente Santos.
Examinador – Faculdade Ari de Sá

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me permitido chegar até aqui;

Aos meus familiares, principalmente aos meus pais, Antônia Ferreira do Nascimento e José da Silva do Nascimento, minha esposa, Laila Rocha e minha filha, Cecília Nascimento, pelo incentivo durante essa jornada;

Ao corpo docente da Faculdade Ari de Sá, em especial à minha orientadora Profa. Me. Francisca Lilian Cruz Brasileiro, pelo apoio e conhecimentos transmitidos para que pudesse concluir esse trabalho monográfico e;

Aos meus colegas de curso pela parceria durante todos esses anos de caminhada no curso de Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá.

À todos o meu muito obrigado!

“Assim como a planta é o projeto de uma construção civil, o sonho é um projeto de construção de vida”.

Wendel Henrique Ferreira

RESUMO

Atualmente o concreto é o elemento estrutural mais utilizado em obras da construção civil, levando em consideração fatores como sua boa resistência à água, a possibilidade de uso em estruturas de diferentes formas e tamanhos e o seu baixo custo quando comparado a outros materiais com função similar. Por outro lado, há uma série de cuidados que precisam ser tomados com o concreto para garantir sua eficiência e durabilidade, incluindo medidas para controlar o calor de hidratação do cimento na mistura do concreto, principalmente em obras de grandes dimensões. O presente estudo teve como objetivo geral analisar os métodos de prevenção e monitoramento de fissuras decorrentes do calor de hidratação na concretagem de grandes volumes. Tratou-se de uma pesquisa exploratória e bibliográfica, realizada a partir de um levantamento bibliográfico envolvendo livros, artigos científicos, monografias e dissertações que abordaram o tema. Para evitar problemas decorrentes do calor de hidratação em elementos estruturais de grandes dimensões, têm sido utilizados vários métodos preventivos, que envolvem desde a escolha do cimento e dos agregados mais adequados para a fabricação do concreto massa até o uso de técnicas de pré e de pós-resfriamento, além da concretagem em camadas. O pré-resfriamento tem sido o método mais empregado na prevenção de problemas de origem térmica em razão do baixo custo e do alto nível de eficácia. O melhor método de prevenção de fissuras decorrentes do calor de hidratação na concretagem de grandes volumes é a técnica de pré-resfriamento com gelo em escamas, embora o cuidado com os materiais utilizados na mistura do concreto também seja importante. O gelo em escamas reduz as tensões térmicas do concreto, diminuindo o calor de hidratação nas primeiras horas após o lançamento, o que evita o surgimento de fissuras e gera uma melhor evolução da resistência à compressão. Também evita a formação de compostos expansivos durante a hidratação do cimento que podem reduzir a durabilidade das estruturas. Já o controle de temperatura deve ser realizado assim que houver autorização para o lançamento do concreto. Via de regra, esse monitoramento se dá através de sensores elétricos, como termômetros e termopares, embutidos na própria massa do concreto. Nos casos em que for verificada uma irregularidade da temperatura ou abatimento do concreto, a correção poderá ser feita com a inserção de aditivos superplastificantes, capazes de reduzir o consumo de cimento da dosagem ou, ainda, com a adição de mais gelo, nos casos em que este tenha sido utilizado como forma de pré-resfriamento.

Palavras-chave: Concreto massa. Elementos estruturais de grandes dimensões. Calor de hidratação. Controle e prevenção.

ABSTRACT

Concrete is currently the most used structural element in civil construction works, taking into account factors such as its good water resistance, the possibility of use in structures of different shapes and sizes and its low cost when compared to other materials with similar function. On the other hand, there are a number of precautions that need to be taken with concrete to ensure its efficiency and durability, including measures to control the heat of hydration of the cement in the concrete mix, especially in large-scale works. The present study aimed to analyze the methods of prevention and monitoring of cracks resulting from the heat of hydration in large-volume concreting. It was an exploratory and bibliographical research, carried out from a bibliographic survey involving books, scientific articles, monographs and dissertations that addressed the topic. To avoid problems arising from the heat of hydration in large structural elements, several preventive methods have been used, ranging from choosing the most suitable cement and aggregates for the manufacture of mass concrete to the use of pre and post- cooling techniques, in addition to layered concreting. Pre-cooling has been the most used method to prevent problems of thermal origin due to its low cost and high level of effectiveness. The best method for preventing cracks resulting from the heat of hydration in large-volume concreting is the pre-cooling technique with ice in flakes, although care with the materials used in mixing the concrete is also important. Flake ice reduces the thermal stresses of the concrete, decreasing the heat of hydration in the first hours after casting, which avoids the appearance of cracks and generates a better evolution of the compressive strength. It also prevents the formation of expansive compounds during cement hydration that can reduce the durability of structures. Temperature control, on the other hand, must be carried out as soon as there is authorization to release the concrete. As a rule, this monitoring takes place through electrical sensors, such as thermometers and thermocouples, embedded in the concrete mass itself. In cases where an irregularity in the temperature or slump of the concrete is verified, the correction can be made with the insertion of superplasticizer additives, capable of reducing the consumption of cement in the dosage, or even with the addition of more ice, in cases where that this has been used as a form of pre-cooling.

Keywords: Concret mass. Large structural elements. Hydration heat. Control and prevention.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição dos resultados de coeficiente de dilatação térmica linear	14
Figura 2 – Usina de Itaipu	19
Figura 3 – Bloco de fundação da Ponte JK	19
Figura 4 – Concretagem de bloco de coroamento do empreendimento Infinity Coast em Balneário Camburiú/SC no ano de 2014	20
Figura 5 – Temperatura do concreto <i>versus</i> tempo	21
Figura 6 – Fissura em bloco de fundação decorrente de calor de hidratação	24
Figura 7 – Fissuras causadas por etringita tardia, indicadas em vermelho.....	25
Figura 8 – Calor de hidratação para os diferentes tipos de cimento.....	27
Figura 9 – Curva diferencial (a)e integral (b) de amostras com substituição de cimento por cinza volante	30
Figura 10 – Gelo em escamas sendo adicionado à massa de concreto.....	31
Figura 11 – Evolução da temperatura para as composições das classes C30 e C70	32
Figura 12 – Esquema de circulação de água através de tubos no interior do concreto	35
Figura 13 – Uso de serpentina no pós-resfriamento do concreto	36
Figura 14 – Temperatura na seção transversal de uma peça de concreto sem pós-refrigeração com 52 horas de idade. Temperatura máxima de 84,92 °C.	36
Figura 15 – Temperatura na seção transversal de uma peça de concreto com pós-refrigeração com 32 horas de idade. Temperatura máxima na região refrigerada de 75,3 °C..	37
Figura 16 – Exemplo de lançamento de concreto por camadas	37
Figura 17 – Relação entre espessura de camadas de concretagem e temperatura máxima adquirida pela estrutura	38
Figura 18 – Relação entre intervalo de concretagem e temperatura máxima adquirida pela estrutura	39
Figura 19 – Exemplo de transmissão de calor em fluxo unidirecional	41
Figura 20 – Transmissão de calor em fluxo direcional via Método de Carlson.....	43
Figura 21 – Detalhe da fixação do termopar e do aquisitor de dados na armação da sapata ...	45
Figura 22 – Instalação dos termopares para monitoramento térmico do bloco de fundação ...	46
Figura 23 – Curvas de temperaturas reais obtidas para os sete pontos internos do bloco e para o ponto externo	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	09
1.1	Objetivos	10
1.1.1	Objetivo geral	10
1.1.2	Objetivos específicos	10
1.2	Metodologia	11
2	CONCRETO	12
2.1	Propriedades térmicas do concreto	13
2.1.1	Coeficiente de dilatação térmica	13
2.1.2	Calor específico	15
2.1.3	Condutividade térmica	16
2.1.4	Difusividade térmica	17
2.2	Concreto massa e elementos estruturais de grandes dimensões	18
2.3	Problemas de origem térmica	20
2.3.1	Calor de hidratação	21
2.3.2	Efeitos do calor de hidratação	23
3	MÉTODOS PREVENTIVOS	26
3.1	Cimento	26
3.2	Água	28
3.3	Adição de minerais	29
3.4	Pré-resfriamento	30
3.4.1	O uso de gelo e água gelada	30
3.4.2	Uso de agregados de grandes dimensões	34
3.5	Pós-resfriamento	35
3.6	Concretagem em camadas	37
4	MONITORAMENTO DA TEMPERATURA	40
4.1	Métodos de cálculo de temperatura	40
4.1.1	Método de Schmidt	40
4.1.2	Método de Carlson	42
4.2	Monitoramento com termopares	44
4.3	Uso de detectores de temperatura resistivos (RTDs)	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o concreto é o elemento estrutural mais utilizado em obras da construção civil, levando em consideração fatores como sua boa resistência à água, a possibilidade de uso em estruturas de diferentes formas e tamanhos e o seu baixo custo quando comparado a outros materiais com função similar (ROCHA, 2018). Por outro lado, há uma série de cuidados que precisam ser tomados com o concreto para garantir sua eficiência e durabilidade, incluindo medidas para controlar o calor de hidratação do cimento na mistura do concreto.

De acordo com Araújo (2013), o processo de hidratação do cimento é classificado como exotérmico, o que significa que o calor é liberado enquanto a reação química acontece. A condutividade térmica do concreto é relativamente baixa e, por isso, o calor gerado faz com que haja uma elevação da temperatura no núcleo do elemento estrutural. Esse processo está diretamente relacionado com o tamanho das estruturas, isto é, quanto maior for o elemento estrutural, maior será a temperatura alcançada em seu interior.

Guto, Helene e Almeida (2016) explicam que estruturas de grande porte como usinas hidrelétricas, barragens, portos, aeroportos e parques industriais, entre outras, acabam demandando a produção de grandes volumes de concreto armado. Essas estruturas necessitam de cuidados especiais para que a temperatura no interior do concreto seja dissipada antes de atingir valores muito altos, o que poderia gerar fissuras e conseqüentemente a perda de resistência.

O nome dado a este fenômeno é calor de hidratação, um problema térmico de natureza intrínseca do chamado concreto massa. Segundo Assioli et al. (2017), o concreto massa diz respeito a qualquer volume de concreto com dimensões que demandem a adoção de medidas para controlar a geração de calor e a variação de volume decorrente. A principal diferença desse tipo de concreto para o concreto “convencional” é a dificuldade de liberar o calor gerado pelas reações químicas exotérmicas de hidratação do cimento, facilitando a formação de fissuras.

O surgimento de fissuras em obras de concreto massa é indesejável porque afeta a permeabilidade, durabilidade, aparência e tensões interna dessas estruturas. As fissuras normalmente ocorrem quando as tensões de tração desenvolvidas excedem a resistência em relação à tração do concreto em razão de cargas impostas à estrutura ou restrições relativas à mudança volumétrica. Nesse sentido, a maior alteração volumétrica em concreto massa é resultado da modificação de temperatura, principalmente pelo calor de hidratação (DAL PONT, 2018).

Araújo (2013) explica que a temperatura do concreto ainda pode ser alterada pelas trocas de calor por radiação solar, convecção e condução, sendo que o calor de hidratação ainda é dominante nesse processo, principalmente nos primeiros anos da construção. A temperatura máxima atingida ainda depende de fatores como o tipo e a quantidade de cimento, da relação água-cimento, da espessura do cimento, da temperatura de lançamento e dos processos de pré e pós resfriamento, quando existentes, entre outros aspectos.

Do ponto de vista da engenharia, essas tensões nas estruturas de concreto massa podem ser evitadas com a adoção de algumas medidas preventivas que tentam reduzir os efeitos térmicos na reação de hidratação do cimento, entre as quais se destacam: a escolha de um material capaz de reduzir a reação de hidratação do cimento e as tensões de retração autógena; a redução da temperatura de lançamento do concreto ou mesmo o controle da espessura das camadas e do intervalo de tempo entre as camadas para permitir a dissipação do calor (GUTO; HELENE; ALMEIDA, 2016).

Na realidade, os cuidados devem ser tomados antes, durante e após a execução da concretagem de grandes volumes. Para obter resultados satisfatórios algumas medidas devem ser tomadas passando pela adoção de dosagens criteriosas, processos de execução bem definidos, redução do consumo de cimento e até mesmo resfriamento através do gelo, entre outros, o que demonstra a relevância do estudo das técnicas de pré e pós-resfriamento do concreto nas estruturas de grande dimensão (ROCHA; SILVA, 2019).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar os métodos de prevenção e monitoramento de fissuras decorrentes do calor de hidratação na concretagem de grandes volumes.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar os fatores que podem resultar no aumento da temperatura no interior do concreto;
- Discutir a eficácia de técnicas de pré-resfriamento do concreto para elementos de grandes volumes, inclusive através de exemplos práticos e;

- Descrever os métodos utilizados para monitorar a temperatura em estruturas de concreto massa.

1.2 Metodologia

Em relação aos procedimentos técnicos adotados, foi utilizada a revisão bibliográfica, caracterizada como um apanhado geral sobre os principais trabalhos já realizados, revestidos de importância, por serem capazes de fornecer dados atuais e relevantes sobre o tema em estudo (MARCONI; LAKATOS, 2017).

Para tanto, foram utilizadas publicações como livros e artigos científicos, respeitando um critério de antiguidade de até 30 anos, considerando a literatura clássica. Para Gil (2008), quando se necessita de qualquer tipo de informação acerca de determinado assunto, deve-se recorrer justamente ao auxílio da bibliografia existente, a fim de se obter respostas, como ocorre no caso do presente estudo.

No que diz respeito aos objetivos, a pesquisa se classifica como exploratória. De acordo com Gil (2008), as pesquisas exploratórias “têm como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores”. A pesquisa exploratória envolve levantamentos bibliográficos e análise de exemplos que estimulem a compreensão do tema abordado, exatamente como se espera deste estudo.

Para melhor atender aos objetivos propostos o estudo foi dividido em cinco capítulos, sendo este o introdutório. O segundo capítulo traz os conceitos relacionados ao concreto e as estruturas de concreto massa, identificando os fatores que contribuem para o aumento da temperatura no interior dessas estruturas. O terceiro capítulo se ocupou em descrever os métodos utilizados para prevenir o aumento da temperatura no interior das estruturas de concreto massa, discutindo a eficácia das técnicas pré e pós-resfriamento. No quarto capítulo buscou-se descrever os mecanismos utilizados para monitorar a temperatura no interior das estruturas. Por fim, no último capítulo encontram-se as considerações finais do autor sobre a temática, com sugestões para a realização de estudos futuros.

2 CONCRETO

O concreto é um material constituído de água, cimento, agregado miúdo (areia) e agregados graúdos, como brita ou pedra. Em alguns casos também se utiliza aditivos como sílica, fibras e pozolanas de acordo com o desempenho desejado no local. Todos esses componentes possuem propriedades térmicas relativas ao processo de preparo do concreto, resultando em reações exotérmicas que liberam calor e influenciam nas características do composto final (LOBATO; RIBEIRO; SILVA, 2018).

O concreto pode ser produzido a partir de vários tipos de cimento, como os cimentos aluminosos e os sulfo-aluminosos, embora na maioria dos casos seja utilizado o cimento do tipo Portland. Trata-se de um pó ultrafino com propriedades ligantes e que endurece sob ação da água, ganhando solidez e resistência. Após a secagem, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o material não se decompõe. A solidez do produto final é comparada às rochas da ilha britânica de Portland, por isso o nome do cimento (ARAÚJO, 2018).

Conforme explicam Couto et al. (2013), a preparação do concreto pode ser realizada manualmente ou em betoneiras comumente utilizadas nos canteiros de obras, recebendo o nome de concreto in loco, normalmente utilizado em canteiros pequenos ou na realização de obras simples. No entanto, a preparação também pode ser realizada em centrais dosadoras, isto é, em usinas de concreto, cujo produto final é conhecido como concreto usinado ou pré-misturado e que geralmente é utilizado em obras de grande porte, cujo volume de concreto é dosado de acordo com a necessidade das estruturas.

Quando o concreto é utilizado como material estrutural, recebe a denominação de concreto estrutural, podendo ser de três tipos, sendo eles o concreto simples, sem qualquer tipo de armadura; o concreto armado, quando existe uma armadura não pré-tracionada e; o concreto protendido, quando há presença de uma armadura que é ativa pré-tracionada. Quando são acrescentadas as ferragens passivas em uma forma, o concreto comum é adicionado com uma armadura de aço, passando a ser denominado de concreto armado, que é utilizado em construções prediais para a confecção de lajes, vigas, fundações e pilares, garantindo sua sustentação (NEVILLE; BROOKS, 2013).

De acordo com Dyer (2020), o uso do concreto, seja ele armado ou protendido, tem sido largamente empregado na construção civil, visto que apresenta diversas vantagens em relação a outros materiais, principalmente no quesito custo. Além disso, o concreto é

moldável à praticamente qualquer forma, apresenta boa resistência à maior parte das solicitações a que é submetido, é durável e resistente à água e ao fogo, entre outras vantagens.

O desempenho do concreto está relacionado basicamente a três propriedades térmicas, sendo elas: o calor específico, a condutividade térmica e o coeficiente de dilatação térmica, principalmente no caso das obras que utilizam concreto massa. De acordo com Neville (2015), o concreto massa é conhecido por conter grandes volumes de concreto em suas peças estruturais. Seu uso é mais comum em estruturas de grande porte, como estacas, comportas, fundações e barragens, entre outras.

No entanto, as estruturas de concreto massa também estão suscetíveis a alguns riscos, sobretudo no que diz respeito à possibilidade de fissuração térmica decorrente do calor de hidratação. O calor de hidratação consiste na energia liberada da reação exotérmica entre a água e cimento e que pode provocar o surgimento de fissuras e etringita tardia, entre outros problemas. Dessa forma, quanto maior for o volume de concreto, maior será a quantidade de energia na forma de calor liberada pela mistura (COUTO; HELENE; ALMEIDA, 2016).

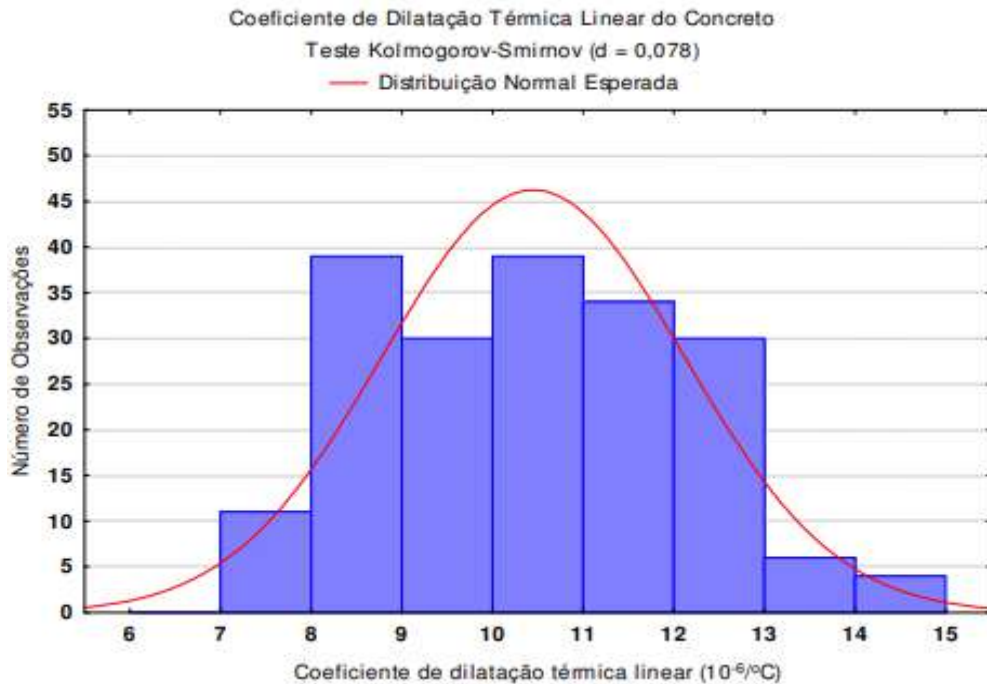
2.1 Propriedades térmicas do concreto

De acordo com Neville (2015), é importante conhecer as propriedades térmicas do concreto e dos materiais que o constituem para compreender o comportamento do material frente a liberação de calor das relações exotérmicas do calor de hidratação do cimento, que são fundamentais em estruturas de concreto. Em outras palavras, o comportamento do concreto e da estrutura por ele constituída, depende dessas propriedades térmicas. Sendo assim, nesta seção do estudo serão apresentados os principais parâmetros térmicos de coeficiente de dilatação térmica, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica.

2.1.1 Coeficiente de dilatação térmica

O coeficiente de dilatação térmica do concreto (α) é uma variação linear de um comprimento causada pela variação unitária da temperatura, sendo expressa como deformação específica em °C. Gambale (2010) explica que o concreto, como qualquer material, se expande quando é aquecido e retrai quando é resfriado. Essa variação de comprimento em relação ao tamanho inicial da estrutura e à variação de temperatura é chamada de coeficiente de dilatação térmica linear, conforme se observa na Figura 1.

Figura 1 – Distribuição dos resultados de coeficiente de dilatação térmica linear.



Fonte: Gambale (2010).

A partir dessa distribuição é possível obter uma média de dilatação linear para o concreto no intervalo de confiança de 95%, entre $10,21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e $10,68 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Do ponto de vista normativo, a ABNT NBR 6118:2014 recomenda, no item 8.2.3, que para efeito da análise estrutural, o coeficiente de dilatação térmica linear deve ser igual a $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. No caso da armadura, o mesmo coeficiente pode ser considerado igual ao concreto em temperaturas entre -20°C e $+150^{\circ}\text{C}$ (ABNT, 2014).

De forma analítica, é possível obter o valor do coeficiente de dilatação térmica a partir da Equação 1 (FURNAS, 1997).

$$\alpha = \frac{E_q * V_p + \alpha * E_a * V_a}{E_q * V_p + E_a * V_a}$$

Onde: p = Coeficiente de dilatação linear da pasta ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$);

a = Coeficiente de dilatação linear do agregado ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$);

E_p = Módulo de elasticidade da pasta (GPa);

E_a = Módulo de elasticidade do agregado (GPa);

V_p = Volume da pasta com ar incorporado (m^3);

V_a = Volume do agregado graúdo e miúdo (m^3).

Os principais fatores que exercem influência sobre o valor do coeficiente de dilatação térmica são o tipo da rocha da qual o agregado foi retirado, o teor da pasta e a idade. A influência do agregado na composição do coeficiente de dilatação térmica é considerável, levando em conta sua parcela majoritária na mistura do concreto. Sendo assim, quando for possível escolher os materiais empregados, deve-se optar por um agregado com menor coeficiente de dilatação térmica possível visando a obtenção de um concreto mais estável. À título de exemplo, os valores desse coeficiente variam de cerca de $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para calcários e gabros a $11-12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para arenitos, seixos naturais e quartzitos (COUTO, 2018).

A pasta de cimento também influencia no coeficiente de dilatação térmica, porque com o aumento da sua porcentagem na mistura diminui-se a porcentagem de agregado gráudo e, conseqüentemente, aumenta-se o diâmetro máximo do agregado. Em outras palavras, o aumento do coeficiente de dilatação térmica da pasta incorre no aumento do coeficiente do concreto. De acordo com Neville (2015), a umidade da pasta de cimento atribui comportamentos diferenciados, tendo em vista que quando o concreto se encontra seco ou molhado seu coeficiente de dilatação térmica é maior do que comparado à situação parcial de saturação.

2.1.2 Calor específico

Calor específico (c) é uma propriedade responsável pela quantidade de calor armazenado por unidade de massa, ou seja, é a variação térmica do material em função de sua massa para elevar a temperatura. Couto (2018) define o calor específico como a quantidade necessária de calor para elevar a temperatura de uma unidade de massa do concreto. Para o pesquisador, o calor específico representa a capacidade térmica e influência na capacidade que o concreto tem de armazenar calor.

Geralmente o calor específico do concreto se situa entre 840 a $1260\text{J/Kg}^{\circ}\text{C}$, é pouco influenciado pelas características litológicas do agregado e tende a aumentar conforme aumenta a temperatura e diminui a massa específica do concreto. A idade do concreto não influencia na determinação do calor específico, mas sim fatores como a temperatura, o grau de saturação, a dimensão máxima característica do agregado gráudo, a composição mineralógica do agregado, a massa unitária do concreto e o volume de agregados (FURNAS, 1997).

De acordo com Gambale (2010), o calor específico não é um fator que varia muito, tendo em vista ser uma característica intrínseca do próprio concreto. Para o autor, não vale

muito à pena tentar controlar o calor específico na tentativa de reduzir os problemas decorrentes do calor de hidratação, já que não ocorrerá muita alteração em seus valores. Mesmo assim, quanto menor for o calor específico, melhor para estrutura, já que o concreto irá armazenar menos calor. A determinação do calor específico normalmente é realizada por meio de métodos elementares da termodinâmica (COUTO, 2018).

2.1.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica representa a capacidade do concreto para conduzir o calor, sendo definida tanto pela velocidade do fluxo de calor através de uma espessura unitária, como pela relação entre o fluxo de calor e o gradiente da temperatura. Conforme conceito trazido por Furnas (1997, p. 1, cap. 13), a condutividade térmica “É definida como a velocidade do fluxo de calor através de uma espessura unitária, sobre uma área unitária, dos materiais submetidos a uma diferença de temperatura unitária entre as duas faces paralelas”.

A condutividade térmica é representada pela letra k . A determinação pode ser feita através da introdução de calor no orifício central de um corpo de prova cilíndrico, mantendo uma temperatura mais baixa em sua superfície e promovendo o fluxo de calor através do material (COUTO, 2018).

De forma analítica, é possível obter o valor da condutividade térmica aplicando a Equação 2 (FURNAS, 1997).

$$k = \delta \cdot c \cdot \gamma$$

Onde: k = condutividade térmica \rightarrow [W.m.K] ou [J/m.s.K];

δ = difusividade térmica \rightarrow [m²/s] ou [m²/dia];

c = calor específico \rightarrow [J/kg.K];

γ = massa específica \rightarrow [kg/m³].

De acordo com Neville (2015), a condutividade térmica do concreto vai variar de acordo com a sua composição. A massa específica pouco influencia nesse parâmetro, exceto no caso do concreto leve, em razão da baixa condutividade térmica do ar. Já as características litológicas dos agregados possuem grande influência nos valores da condutividade térmica do concreto. Os agregados densos, por exemplo, possuem condutividade baixa. Já os agregados com teores elevados de quartzo apresentam condutividade térmica elevada, com fluxo de calor proporcional à cristalinidade (FURNAS, 1997).

Outro fator que também possui grande influência na condutividade térmica do concreto é o grau de saturação, ou seja, o percentual de teor de umidade da pasta de cimento em relação a absorção máxima, pois a condutividade do ar que preenche os vazios de porosidade é menor que a condutividade da água. Esse fator é ainda mais importante no caso do concreto leve, em que um pequeno aumento do grau de saturação poderá causar aumento na condutividade. Por outro lado, a condutividade da água é cerca de 50% menor do que a condutividade da pasta de cimento hidratada, de modo que no concreto para fins estruturais, o valor da condutividade térmica será maior se a quantidade de água na mistura for menor (COUTO, 2018).

Segundo Gambale (2010), a alta condutividade térmica é um fator prejudicial para o concreto, que acaba absorvendo mais calor para si, podendo comprometer as estruturas. Em outras palavras, quanto maior for a condutividade térmica do concreto, mais facilidade terá o calor de mover-se pela estrutura. Em um concreto de peso normal, a condutividade é que controla a difusividade, já que a massa e o calor específicos possuem baixa variação. Sendo assim, deve-se buscar um agregado que apresente menor valor possível, como no caso do basalto, empregado pelo autor em seu experimento.

2.1.4 Difusividade térmica

De acordo com Furnas (1997), a difusividade térmica diz respeito à propriedade do material em difundir calor em todas as direções, evidenciando a facilidade de variação de temperatura que o concreto pode sofrer. Dessa forma, a difusividade térmica pode ser expressa como a relação entre a condutividade térmica e o produto do calor específico e massa específica material, considerando a Equação 3 (NEVILLE, 2015).

$$\delta = \frac{k}{c \cdot \gamma}$$

Onde: δ = difusividade térmica \rightarrow [m²/s] ou [m²/h];

k = condutividade térmica \rightarrow [W/m.K] ou [J.m.s.K)];

c = calor específico \rightarrow [J/kg/K)];

γ = massa específica \rightarrow [kg/m³].

A partir da relação dada na equação acima verifica-se que a difusividade térmica do concreto também é proporcional à variação de sua condutividade térmica e que também sofre

interferência do teor de umidade do concreto, que por sua vez dependerá do nível de hidratação do cimento, teor original de água na mistura e porosidade. Os valores médios de difusividade térmica do concreto variam entre 0,002 e 0,006 m²/h, o que vai depender do tipo de agregado utilizado. Materiais como o basalto, calcário e quartzo possuem difusividade crescente (NEVILLE, 2015).

2.2 Concreto massa e elementos estruturais de grandes dimensões

De acordo com Albuquerque (2009), o concreto massa pode ser definido como qualquer volume de concreto em grandes dimensões e que requeira a adoção de medidas para superar a geração de calor de hidratação em seu interior, como no caso da concretagem dos blocos de pontes e barragens. Em outras palavras, o concreto massa é aquele que, ao ser aplicado em determinada estrutura, requer atenção relativa aos riscos do seu comportamento térmico, principalmente no caso das estruturas de grande porte.

Assim como ocorre com o concreto tradicional, o concreto massa é composto de cimento, agregados e água, além de outras adições, como pozolonas. A dosagem no caso do concreto massa tem como objetivo selecionar e quantificar estes materiais, proporcionando economia e reduzindo o calor de hidratação, sem desconsiderar a obtenção e aspectos como a boa trabalhabilidade, resistência e durabilidade do material, observando o propósito da estrutura na qual será aplicado (SOUZA, 2017).

Na realidade, o concreto massa se difere do concreto estrutural na medida em que é colocado em seções de espessura onde o calor de hidratação dissipa lentamente e o gradiente térmico pode induzir fissuras na estrutura. Essas fissuras são causadas principalmente pelas tensões da tração desenvolvidas como resposta à retração térmica combinada com a restrição de mudança de volume do concreto (BRITZ *et al.*, 2016)

No Brasil, as primeiras obras utilizando concreto massa surgiram no início do século XX, quando foram construídas diversas barragens voltadas ao abastecimento de água e também à geração e energia, entre as quais se destacam as barragens de Lages (1907), Ingá (1916), Jaguari (1917), Ilha dos Pombos (1924), Alberto Torres (1924), Rasgão (1925), Cubatão (1926), Paraguaçu (1930), Pedro Beicht (1932), Gafanhoto (1946), Areal (1949), Macabu (1950) e Santa Cecília (1953) (SOUZA, 2017).

As usinas hidrelétricas inclusive são os principais exemplos de elementos estruturais de grandes dimensões no Brasil. A Usina de Itaipu, por exemplo, começou a ser construída no ano de 1985, em Foz do Iguaçu/PR. Para a sua construção foram consumidos 12,7 milhões de

metros cúbicos de concreto, sendo que em apenas um dia, eram lançados 15 mil metros cúbicos de concreto, totalizando 340 mil metros cúbicos em um mês (ROCHA; SILVA, 2014). A Figura 2 mostra a usina de Itaipu em operação.

Figura 2 – Usina de Itaipu.



Fonte: Rocha e Silva (2019)

Outro exemplo de elemento estrutural de grandes dimensões em que foi necessário o uso de concreto massa é a Ponte Juscelino Kubistchek. A ponte JK, como também é conhecida fica localizada sobre uma falha geológica onde corria o rio Gama, atualmente Lago Paranoá, ligando dois setores habitacionais em Brasília/DF. Os blocos de fundação da ponte medem 23 x 30 x 3,5 metros e foram feitos através de um caixão de concreto massa, executado fora d'água e que depois foi submerso, conforme se observa na Figura 3.

Figura 3 – Bloco de fundação da Ponte JK.



Fonte: Albuquerque (2009).

Os blocos são suportados por estacas com diâmetro de 1,20 metro, cravadas a 50 metros de profundidade. Para a concretagem desses blocos foi necessário adotar a pré-refrigeração, com substituição de parte da água por gelo em escamas, a fim de evitar o aumento do calor de hidratação no interior das estruturas.

Além de obras públicas, como pontes e barragens, os chamados arranha-céus também são exemplos de estruturas de grandes dimensões e que normalmente são construídos para fins residenciais, hospedagem e/ou entretenimento. Um desses empreendimentos é o Infinity Coast, localizado na cidade catarinense de Balneário Camboriú. Contando com 66 andares e 234 metros de altura, atualmente ele é o maior prédio residencial no Brasil (ROCHA; SILVA, 2019). A concretagem da fundação do prédio pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Concretagem do bloco de coroamento do empreendimento Infinity Coast em Balneário Camboriú no ano de 2014.



Fonte: Rocha e Silva (2019).

De acordo com Rocha e Silva (2019), na concretagem da fundação da obra foram utilizados 5.300 m³ de concreto, executados em cinco dias em horários alternados, com o objetivo de diminuir o calor de hidratação. O concreto utilizado obteve duas resistências, uma de 30 Mpa e outra de 45 Mpa. Também foram usados aditivos para retardar a reação do cimento fazendo com que o processo de secagem ocorresse de forma uniforme em toda a estrutura.

2.3 Problemas de origem térmica

De acordo com Rocha (2018), as estruturas empregadas na Construção Civil, principalmente os sólidos, estão sujeitas a deformações de origem térmica. No caso do concreto, o problema normalmente está associado ao calor emitido pela reação de hidratação

do cimento em contato com a água e às condições externas de temperatura, como no caso das altas temperaturas presentes em algumas cidades. Essa situação geralmente se inicia nas primeiras idades pós-concretagem, podendo ocasionar problemas como fissuras e a etringita tardia, entre outros.

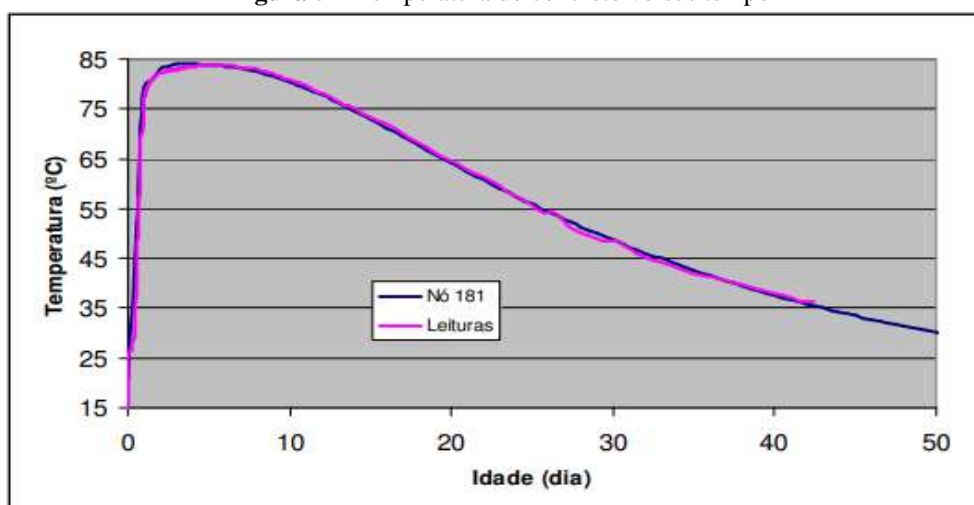
2.3.1 Calor de hidratação

De acordo com Santos (2019), o calor de hidratação consiste no calor liberado pelo concreto por meio de um processo exotérmico, ou seja, de uma reação química em que há transferência de energia do interior de um objeto para o meio exterior. Essa reação libera certa quantidade de produtos de hidratação como hidróxido de cálcio, silicato de cálcio hidratado e etringita, entre outros, provocando aumento da temperatura na massa de concreto, cujo calor é liberado na atmosfera.

Em se tratando de grandes volumes de concreto para a mesma peça, como nos casos dos blocos de fundação, por exemplo, o calor produzido no interior das peças encontra dificuldade em se dissipar para atmosfera, principalmente nas primeiras horas após a aplicação devido a baixa condutividade térmica. Essa dificuldade gera acúmulo de temperatura no interior da massa, acarretando um diferencial de temperatura entre o núcleo e a superfície da peça de concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Na Figura 5 é possível observar a variação de temperatura interna da estrutura de concreto em relação ao tempo, isto é, conforme ocorrem as reações químicas entre a água e o cimento.

Figura 5 – Temperatura do concreto versus tempo



Fonte: Gambale (2009).

A partir da análise da Figura 5, nota-se que a temperatura na peça de concreto em questão variou de 0°C a 85°C nos primeiros dias após a aplicação. No entanto, quando as reações internas acabam, a tendência é que a temperatura interna do concreto comece a se estabilizar em relação à temperatura do ambiente externo.

De acordo com Dyer (2020) o calor de hidratação do concreto é influenciado por vários fatores, como relação entre água/cimento, o processo de cura do concreto, a exposição ao sol, o tipo de cimento e dos demais materiais envolvidos na mistura e as formas e dimensões da peça de concreto, entre outros.

Neville (2015) explica que o calor de hidratação liberado nos primeiros dias após a aplicação da peça de concreto é muito influenciado pela relação água/cimento. Na realidade, a hidratação do cimento Portland ocorre durante anos e quanto maior for a disponibilidade de água, mais rapidamente a hidratação ocorrerá nas idades iniciais da peça de concreto. No entanto, é preciso ressaltar que como o calor específico da água é cerca de cinco vezes superior ao dos demais materiais que compõem o concreto, o aumento da quantidade de água não necessariamente vai gerar elevação adiabática da temperatura.

A cura do concreto consiste em um processo usado para retardar a evaporação a água empregada na preparação da mistura, permitindo que hidratação completa do cimento e ajudando a refrescar o concreto, reduzindo o ganho interno de temperatura. No entanto, uma maior temperatura de cura também pode causar maior liberação de calor pelas reações de hidratação, sobretudo nas primeiras semanas após a aplicação da peça de concreto (COUTO; HELENE; ALMEIDA, 2016).

A temperatura do ambiente externo e a exposição ao sol também são fatores relacionados ao calor de hidratação do concreto. De acordo com Santos (2019), quando exposto ao sol, o concreto poderá absorver calor externo, que somado ao calor produzido no interior, poderá aumentar a temperatura do material. Também é possível que a temperatura decorrente do calor de hidratação seja devidamente calculada e monitorada desde o processo de cura do concreto, mas que devido ao calor absorvido externamente, permaneça em níveis superiores aos adequados.

O tipo de cimento e dos demais materiais empregados na mistura do concreto também são fatores que precisam ser levados em consideração. Segundo Neville (2015), existem cimentos com maior e menor calor de hidratação, dependendo dos componentes utilizados na fabricação. O cimento branco, por exemplo, possui alta liberação de calor em relação aos demais, de modo que a temperatura do concreto de cimento branco pode ser até duas vezes

maior que do que a temperatura do concreto de cimento CII F32 ou CIV nas primeiras 12 horas após a mistura.

2.3.2 Efeitos do calor de hidratação

Entre os principais efeitos do alto calor de hidratação do concreto destacam-se a fissuração em razão da dilatação e contração térmica e a formação de etringita tardia. Segundo Araújo (2013), a fissuração de origem térmica é consequência da dificuldade da resistência a tração superar as tensões causadas pelas quedas de temperatura e pelas restrições a movimentação do concreto.

De acordo com Neville (2015), as fissuras são patologias frequentes em estruturas de concreto, principalmente em obras de grande porte, em que as peças de concreto têm maior dificuldade de liberar todo o calor gerado pela hidratação do cimento. Essas fissuras podem levar a perda de resistência, corrosão da armadura e lixiviação, entre outras manifestações patológicas.

Dyer (2020) explica que as peças de concreto de grande volume, como os grandes panos de laje ou blocos de fundação são as que mais sofrem com a variação e temperatura, principalmente quando existem vínculos que impedem sua livre movimentação. Quando submetidos à retração térmica, esses elementos de concreto sofrem uma redução dos elementos estruturais, gerando tensões de tração que levam ao surgimento das trincas e fissuras, dependendo do grau de deformidade do elemento.

As fissuras ocasionadas pela elevação da temperatura no interior das peças de concreto tendem a reduzir a capacidade de resistência global das peças afetadas, a exemplo dos blocos de fundação, grandes lajes maciças e vigas-parede, além de diminuir a durabilidade do concreto armado, levando em consideração que as fissuras permitem a entrada de agentes agressivos com maior rapidez e facilidade. Essas manifestações patológicas acabam prejudicando toda a segurança da edificação, fugindo das condições pré-estabelecidas em relação aos cálculos estruturais (ARAÚJO, 2013).

Na Figura 6 é possível observar um exemplo de fissura em bloco de fundação decorrente de calor de hidratação.

Figura 6 – Fissura em bloco de fundação decorrente de calor de hidratação.



Fonte: Souza, Silva e Castro (2014).

De acordo com Neville e Brooks (2013), a fissuração do concreto pode ser evitada com a redução da diferença da temperatura entre o centro da peça, que é aquecido basicamente de forma adiabática, e da superfície, que acaba perdendo o calor liberado pela hidratação do cimento de forma muito mais rápida. Os autores ainda citam que um gradiente de temperatura maior do que 20°C já pode ocasionar a fissuração do concreto.

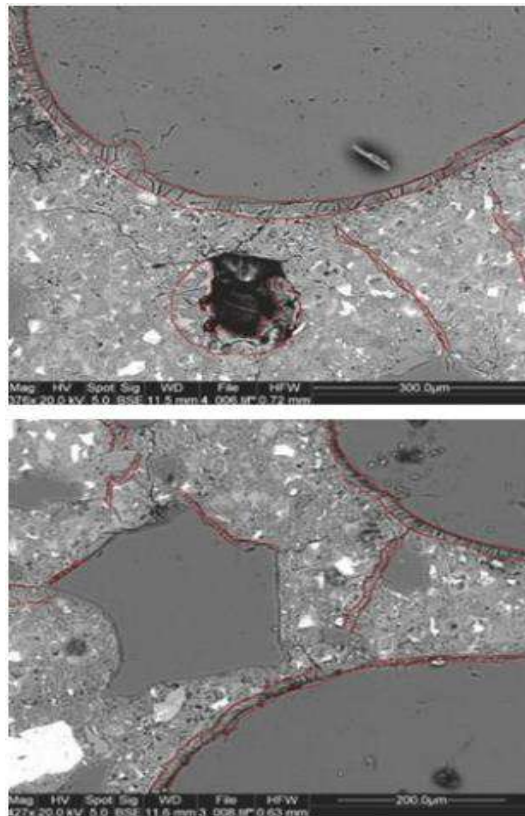
Outro efeito do alto calor de hidratação é a formação de etringita tardia. De acordo com Silva et al. (2017) etringita “é o nome do mineral formado por sulfoaluminato de cálcio que é normalmente encontrado no cimento Portland utilizado em estruturas de concreto”. O autor explica que a formação deste composto tem início nos primeiros momentos após a hidratação do cimento, através da combinação entre os sulfatos disponíveis em solução aquosa e do aluminato de cálcio, sendo essa uma das reações responsáveis pela pega e endurecimento do cimento.

A etringita tardia é uma manifestação patológica que foi descoberta por volta dos anos 1980 e que internacionalmente é conhecida pela sigla DEF (*Delayed ettringite formation*). O primeiro caso de etringita tardia no Brasil foi divulgado nos seminários do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) apenas em 2010, e se referia ao estudo sobre um bloco de fundação que surgiu com várias fissuras e estrutura comprometida na construção de um edifício da cidade de São Paulo/SP (SANTOS, 2019).

Silva et al. (2017) explicam que a formação da etringita primária pode ser inibida tanto pelo calor de hidratação do concreto massa como pela cura térmica inadequada, o que normalmente ocorre em pré-fabricados. Em ambos os casos, é comum que a temperatura no interior da estrutura de concreto atinja valores entre 65°C e 70°C, o que impede a formação

normal de etringita. A etringita tardia não ocorre de forma homogênea em toda a peça de concreto, podendo ocasionar aumento de volume em um determinado ponto e gerar tensões que provocam fissuras no concreto já endurecido. É possível observar exemplos de fissuras causadas por etringita tardia na Figura 7.

Figura 7 – Fissuras causadas por etringita tardia, indicadas em vermelho:



Fonte: Shamaa et al. (2014).

De acordo com Silva et al. (2017), o fenômeno da formação da etringita tardia só ocorre mediante a presença concomitante de três condições específicas: a presença de sulfato no cimento em excesso; a presença de alta temperatura de cura (em torno de 70°C) e suplementação de água. O principal sintoma da DEF é a presença de fissuras multidirecionais entre 20 mm e 50 mm interconectadas entre si e preenchidas com grandes cristais de etringita.

Em razão da possibilidade de ocorrência da DEF alguns países até impuseram limitações para velocidade de aquecimento e resfriamento, bem como em relação à temperatura máxima que a cura térmica pode atingir em fábricas de pré-moldados. No entanto, essas limitações não afetam os riscos de expansão dos elementos de concreto massa, levando em conta que o aquecimento é uma consequência natural das dimensões da peça e do consumo de cimento do concreto utilizado (SHAMAA et al., 2014).

3 MÉTODOS PREVENTIVOS

De acordo com Neville (2015), a primeira medida a ser tomada para evitar os efeitos do calor de hidratação sobre o concreto, como é o caso da fissuração interna das estruturas, é a análise de todos os fatores que possam interferir nesta geração de calor. Essa análise tem como objetivo identificar a viabilidade técnica e econômica de eliminação ou de substituição desses fatores, entre os quais se destacam a quantidade e o tipo de cimento empregados na estrutura, a quantidade e a qualidade da água e a adição de minerais na mistura do concreto.

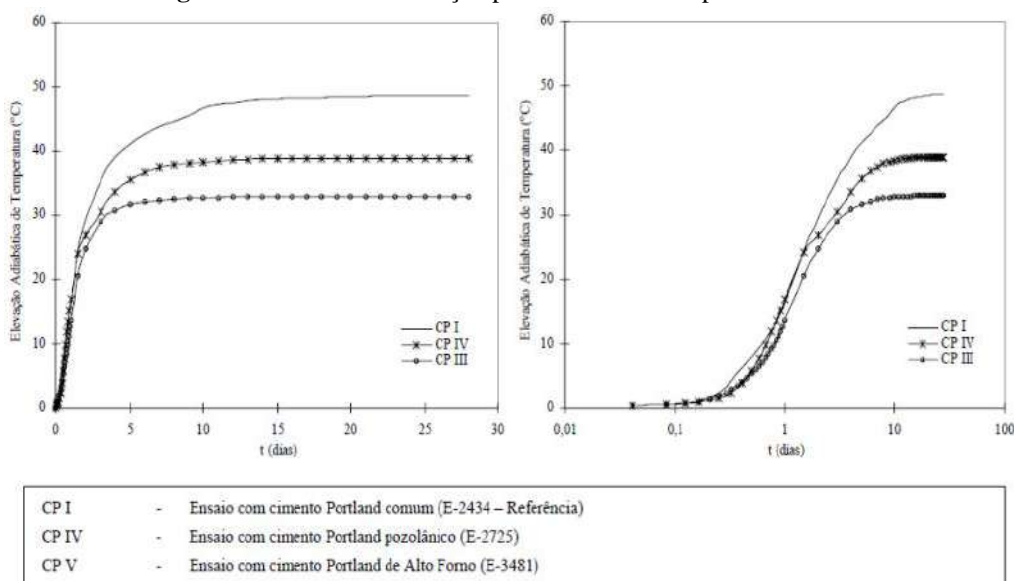
Além dos materiais, há também os métodos preventivos baseados nas técnicas de pré-resfriamento do concreto, com o uso de gelo, de pozolonas e de agregados de grandes dimensões; pós-resfriamento do concreto, concretagem em camadas e; a simulação térmica computacional. Todos esses métodos preventivos serão descritos e exemplificados nesse capítulo.

3.1 Cimento

É possível prevenir os problemas decorrentes do calor de hidratação do concreto a partir da escolha do cimento utilizado em sua composição. Cincotto (2011) explica que o cimento Portland é constituído basicamente por calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Quando esses compostos interagem para a formação do clínquer acabam formando uma série de outros produtos com maior grau de complexidade. Em suma, é possível afirmar os cimentos Portland são compostos caracterizados pela adição e substituição de parte do clínquer por filer calcário, materiais pozolânicos, como cinza volante e sílica ativa e escória de alto forno.

No caso das estruturas de grandes dimensões recomenda-se o uso de cimentos com adições que reagem de forma mais lenta, reduzindo os efeitos térmicos. Segundo Coelho (2011), os cimentos mais recomendados para estruturas de concreto massa são os do tipo CP III, que é um cimento Portland de alto forno, que possui de 35% a 70% de escória e; tipo CP IV, ou seja, cimento Portland pozolânico, em que o nível de materiais pozolânicos secos deve estar entre 15% e 50% da massa total de aglomerante.

Esses tipos de cimento possuem menor teor de compostos que se hidratam mais rapidamente (C3S e C3A), com uma evolução mais lenta da resistência, mas que não altera a resistência final. A Figura 8 mostra a diferença de temperatura adiabática atingida por diferentes tipos de cimento, isto é, a temperatura máxima do concreto sem a ocorrência de trocas térmicas.

Figura 8 – Calor de hidratação para os diferentes tipos de cimento.

Fonte: Coelho (2011).

Segundo Gambale (2008), o cimento branco possui um calor de hidratação mais elevado que o CP II F32, que por sua vez também libera mais calor do que o CP IV, principalmente nos primeiros dias após a aplicação do concreto, conforme se observa no Quadro 1:

Quadro 1 – Elevações adiabáticas de temperatura.

Idade (dia)	Consumos kg/m ³		
	318	315	315
	CP Branco	CP II F	CP IV
0,5	29,20	14,85	12,00
1	36,30	28,20	29,45
2	39,00	32,96	32,65
3	40,00	34,75	33,45
5	40,90	37,02	34,15
7	40,90	38,51	34,55
10	40,90	40,10	35,05
15	40,90	41,42	35,60
28	40,90	42,17	35,80

Fonte: Gambale (2008).

Conforme se observa no Quadro 1, o cimento branco possui uma alta liberação de calor em relação aos demais, sendo que nas primeiras horas chega a liberar mais de duas vezes a quantidade de calor do que o cimento do tipo CP IV. De acordo com Santos (2019), devido ao seu baixo calor de hidratação, o cimento CP IV é um dos mais indicados para a concretagem de grandes volumes ou sob temperaturas elevadas.

3.2 Água

A quantidade e a qualidade da água utilizada no preparo do concreto também são fatores relacionados ao calor de hidratação. Segundo Milagres (2019), a água é um elemento necessário no concreto porque possibilita a ocorrência das reações químicas no cimento, garantindo as propriedades de resistência e durabilidade do concreto. A água também tem a função de lubrificar as demais partículas, possibilitando o manuseio do concreto. Em geral, indica-se o uso de água potável para a preparação do concreto, inclusive no caso da concretagem de grandes volumes.

Na realidade, a água utilizada no preparo do concreto não deve conter impurezas que possam provocar reações entre ela e os compostos de cimento, prejudicando a qualidade do concreto, embora uma baixa quantidade de impurezas seja tolerada. Por isso, sempre que houver dúvida em relação à qualidade de determinada água é necessário realizar ensaios para verificar a influência das impurezas sobre o tempo de pega, resistência mecânica e estabilidade de volume (SCAQUETTI; PIMENTEL, 2019).

Milagres (2019) descreve algumas das principais impurezas encontradas na água e a sua influência sobre a qualidade do concreto, tais como: carbonatos e bicarbonatos de sódio, potássio e magnésio, que aumentam o calor do cimento, alteram o tempo de pega e afetam o nível de resistência do concreto; sódio e potássio dos carbonatos e bicarbonatos, que aumentam o teor de álcalis do cimento, podendo provocar uma reação álcali-agregado; o sulfato e cloreto de magnésio, que prejudicam a resistência dos concretos e; o sulfato de cálcio com a presença de C_3A que forma o sulfoaluminato de cálcio, um composto expansivo que provoca a destruição do concreto.

Scaquetti e Pimentel (2019) realizaram um estudo com o objetivo de analisar a influência da água de reuso na reação de hidratação do cimento a partir do calor de hidratação. A água de reuso consiste em qualquer resíduo líquido gerado nas residências, comércio, fábricas e no agronegócio que é submetido a formas seguras de tratamento para ser reaproveitado em atividades que dispensam o uso de água potável. Quando tratados e acordo com os padrões normativos das agências sanitárias, efluentes industriais e águas pluviais, por exemplo, podem tornar água de reuso.

Para o desenvolvimento do trabalho foram usados os cimentos tipo CP II F32, CP IV 32 E CP V ARI. Também foram utilizadas duas fontes diferentes de água, para comparar os resultados obtidos com cada uma delas, sendo a água da torneira, abastecida com a concessionária SANASA e a outra uma água de reuso proveniente de uma estação produtora

de água de reuso. Nos testes realizados com o cimento tipo CP II F32 a temperatura da mistura com água de reuso foi 8,9% menor do que a mistura com água da torneira. Já nos testes realizados com cimento do tipo CP IV 32, a temperatura da mistura com água de reuso foi 12,7% menor do que com a água da torneira. Por fim, nos testes com o cimento tipo CP V ARI, a temperatura da mistura com água de reuso foi 5,7% menor em relação à mistura com água da torneira (SCAQUETTI; PIMENTEL, 2019).

Os resultados demonstram que o calor de hidratação do cimento foi diretamente influenciado pelo uso da água de reuso, principalmente no caso do cimento tipo CP IV 32, o que pode ser explicado pela adição de pozolanas existente nesse tipo de cimento (SCAQUETTI; PIMENTEL, 2019).

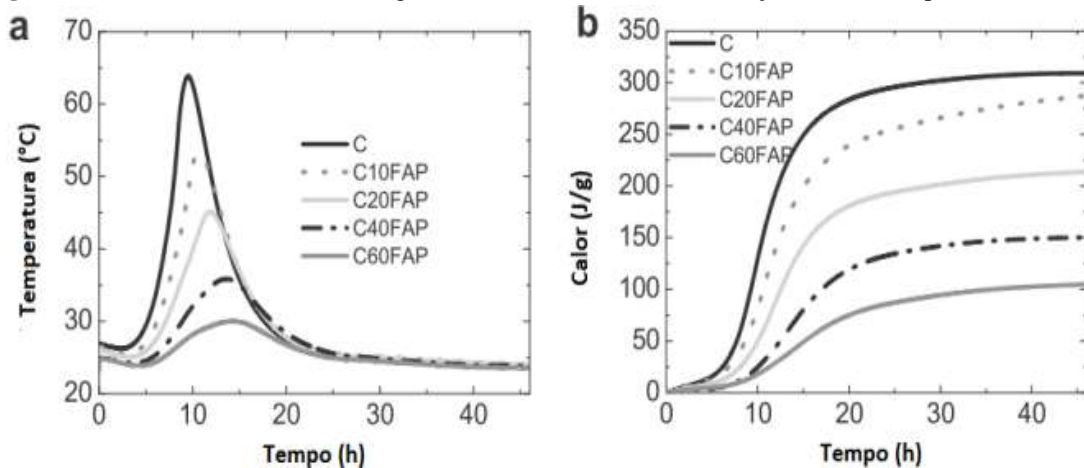
3.3 Adição de minerais

Outra técnica que também tem sido empregada a fim de evitar os problemas decorrentes do calor de hidratação é presença e porcentagem de adições minerais na mistura do concreto. De acordo com Santos (2019), a adição mais empregada tem sido a de cinza volante, que tende a causar redução no calor de hidratação liberado. O autor cita que a redução de temperatura em peças onde houve a substituição de cimento Portland por cinza volante pode variar entre 15% e 25%, diminuindo consideravelmente a temperatura atingida no interior da peça, notadamente nos primeiros dias após a aplicação.

Nili e Salehi (2010) explicam que as cinzas volantes são resíduos fundamentalmente sílico-aluminosos obtidos na geração de energia elétrica a partir do carvão mineral, utilizado pelas usinas termelétricas. Devido as suas propriedades pozolânicas, tendem a ser adquiridas pela indústria de cimento e concreto onde são utilizadas como aditivos ou na substituição parcial do cimento Portland em concretos e argamassa.

O estudo realizado por Šiler et al. (2015) comprovou que a substituição de parte do cimento utilizado na mistura de concreto por diferentes tipos de cinza volante causou uma redução no calor de hidratação liberado. Esse fenômeno pode ser verificado na Figura 9, que apresenta a curva de uma pasta de cimento referência (C) e de diversas outras pastas de substituição de cimento por determinado tipo de cinza volante, em porcentagens que variaram de 10 a 60%.

Figura 9 – Curva diferencial (a) e integral (b) de amostras com substituição de cimento por cinza volante.



Fonte: Šiler et al. (2015).

Em outro estudo Nili e Salehi (2010) também realizaram a substituição de cimento Portland por cinza volante, em teores que variaram entre 15% e 25%, verificando a possibilidade de diminuir a temperatura atingida por um bloco de concreto. Para tanto, foram estudadas duas classes de resistência: 50 e 80 MPa. Com auxílio de um calorímetro semi-adiabático, os autores observaram uma redução na temperatura máxima atingida pelo concreto com adição de cinza volante, com exceção do traço de 50 Mpa com adição de 15% de cinza volante, que apresentou a mesma temperatura final que a mistura de referência.

3.4 Pré-resfriamento

Segundo Araújo (2013), o uso do concreto resfriado se tornou uma necessidade justamente quando surgiram as primeiras construções de grande porte, a exemplo das hidrelétricas, barragens e fundações de grandes dimensões, que necessitam de grandes volumes de concreto. Dessa forma, a principal função do pré-resfriamento do concreto é reduzir as tensões de origem térmica presentes no interior da peça concretada, evitando o aumento da temperatura e, conseqüentemente, o surgimento de trincas e rachaduras que possam comprometer a estrutura.

3.4.1 O uso de gelo e água gelada

A pré-refrigeração do concreto fresco é outra técnica comumente empregada para reduzir a temperatura máxima alcançada no interior das peças. Para tanto, geralmente utiliza-se gelo em escamas, conforme se observa na Figura 10. De acordo com Carneiro, Gil e Campos Neto (2011), esse método é baseado nas leis de equilíbrio térmico da termodinâmica

e consiste em substituir parte da água usada para reagir com o cimento por gelo em escamas com a finalidade de reduzir a temperatura do lançamento do concreto e, conseqüentemente, a temperatura máxima presente no interior da peça.

Figura 10 – Gelo em escamas sendo adicionado a massa de concreto.



Fonte: Carneiro, Gil e Campos Neto (2011).

Os autores ressaltam que também é possível realizar a pré-refrigeração dos materiais agregados a partir da aspersão e água gelada. Na realidade, embora os agregados não reajam quimicamente com a água, sua temperatura inicial também deve ser levada em consideração no momento da mistura. Assim, a pré-refrigeração dos agregados também é indicada quando os mesmos estiverem em temperatura muito superior à de lançamento do projeto, tendo em vista que alguns casos não podem ser resolvidos apenas com a adição de gelo em escamas ou água gelada ao concreto (CARNEIRO; GIL; CAMPOS NETO, 2011).

Entre os exemplos de elementos de grande dimensão em que foi empregado o gelo em escamas na mistura do concreto é possível citar o Bloco 3 da Estação Faria Lima (Linha Amarela), que também apresentou a maior concretagem da história do Metrô de São Paulo (3.700 m³); e os blocos de fundação da Ponte JK, conforme citado anteriormente.

Quando é adicionado gelo na mistura do concreto, a temperatura do cimento e dos agregados acaba sendo reduzida em razão do calor latente deles retirado e que é necessário para que a água (gelo em escamas ou em cubos) atinja seu ponto de fusão. Conforme norma ACI 207.4R-07, a temperatura de lançamento sugerida deve permitir que as deformações do concreto por tração, devido à baixa temperatura, não sejam maiores que a capacidade de deformação do concreto, observando a Equação 4 (SOUSA; SILVA; CASTRO, 2014).

$$T_i = T_f + \frac{C}{\alpha \cdot K} - T$$

Onde: T_i = Temperatura de lançamento do concreto;

T_f = Temperatura final do concreto (estabilizada);

C = Capacidade de deformação por tração do concreto;

α = Coeficiente de dilatação térmica;

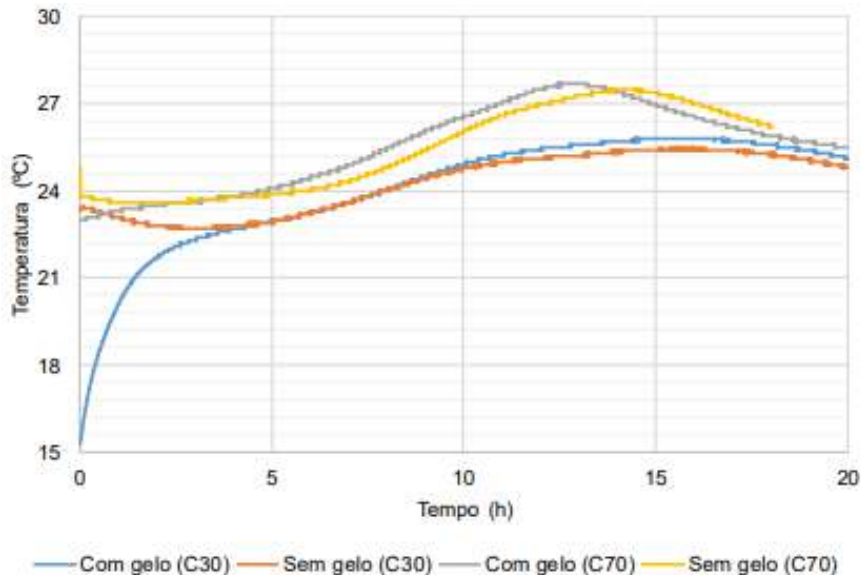
K_r = Grau de restrição;

T_r = Aumento inicial da temperatura do concreto.

Alves *et al.* (2017) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar o comportamento térmico e de resistência mecânica de concretos das classes C30 (convencional) e C70 (alta resistência) com relação à substituição de 50% da água de amassamento por gelo. Em todas as composições foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), além de agregado miúdo médio oriundo de cava e um agregado graúdo granítico. Para garantir a trabalhabilidade e a alta resistência do concreto classe C70 também foi utilizado o aditivo superplastificante TECFLOW 8000 nas duas composições.

A Figura 11 mostra os resultados da análise calorimétrica de ambas as classes.

Figura 11 – Evolução da temperatura para as composições das classes C30 e C70.



Fonte: Alves *et al.* (2017).

O tempo de pega de cada composição está descrito no Quadro 2.

Quadro 2 – Tempo de início e fim de pega para as composições.

Classe	Gelo	Início de pega (h)	Fim de pega (h)
C30	Sem	4,2	14,5
	Com	4,2	15,2
C70	Sem	5,8	12,3
	Com	4,8	13,9

Fonte: Alves *et al.* (2017).

Observa-se que a temperatura inicial da mistura com gelo para a classe C30 foi de 15,3 °C, enquanto que as demais misturas permaneceram em valores próximos a 23 °C. Esses resultados evidenciam que um concreto convencional, com baixo consumo de cimento, pode sofrer resfriamento durante o processo de mistura, o que justificaria o leve aumento de resistência mecânica devido a redução de microfissuras de origem térmica (ALVES *et al.*, 2017).

Já para a classe C70, em que as análises calorimétricas das composições com e sem gelo foram semelhantes, ou seja, a variação entre as temperaturas do instante de pega das composições foi baixa, os ganhos de resistência de ambas as composições foram muito próximo. Nesse sentido, é possível que em razão do alto consumo de cimento e a baixa relação *a/c*, o concreto C70 do gelo acabou permanecendo mais tempo na betoneira até o derretimento do gelo e, com a falta d'água, não resfriou a mistura de forma efetiva (ALVES *et al.*, 2017).

Silva (2019) desenvolveu um estudo com o objetivo de demonstrar a importância do uso de concreto pré-refrigerado na execução de estruturas de concreto massa, a partir da análise de um caso real da execução de dois blocos de fundação com grandes dimensões (10,10m x 7,80m x 2,50m), pertencentes a um empreendimento localizado na cidade de Recife/PE. A fundação do empreendimento foi realizada com 162 estacas em hélice contínua, com profundidades variando entre 6 a 30 metros, totalizando 3.465 metros. As estacas foram executadas com concreto de Fck de 35 Mpa, dosado em concreteira e obedecendo aos procedimentos de execução e qualidade especificados nas normas vigentes.

Na dosagem do concreto pré-resfriado foram substituídos 58% da água de amassamento por gelo em escamas para proporcionar a redução da temperatura inicial do concreto e, conseqüentemente, o pico de temperatura alcançado pela peça. O bloco A foi concretado em duas camadas, nos dias 08 e 09 de janeiro de 2018. As temperaturas foram registradas em um intervalo de 4 horas, desde o início da concretagem até atingirem o pico (SILVA, 2019). As temperaturas médias iniciais e máximas do bloco A estão descritas no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados do monitoramento da temperatura do bloco A.

Bloco A	Altura da camada(m)	Volume (m³)	T. média inicial (°C)	Temperatura máxima (°C)	Tempo para atingir
1º camada	1,30	102,4	22,5°C	58	43 horas
2º camada	1,20	94,6	22,2°C	60,8	35 horas

Fonte: Silva (2019).

Já o bloco B também foi concretado em duas camadas, nos dias 09 e 10 de fevereiro de 2018, sendo executado da mesma forma que o bloco A, com a realização da medição da temperatura média inicial e máxima das camadas do bloco em intervalos de 4 horas (SILVA, 2019). Os resultados estão descritos no Quadro 4.

Quadro 4 – Resultados do monitoramento da temperatura do bloco B.

Bloco A	Altura da camada(m)	Volume (m³)	T. média inicial (°C)	Temperatura máxima (°C)	Tempo para atingir
1º camada	1,30	102,4	23,8°C	62,9	26 horas
2º camada	1,20	94,6	23,2°C	66,1	35 horas

Fonte: Silva (2019).

Os resultados das temperaturas máximas alcançadas pelo concreto nos blocos A e B ficaram abaixo do valor proposto pelo LCPC (70 °C) para o nível de prevenção Cs, sendo que a temperatura máxima foi atingida pela segunda camada do bloco B, de 66,1 °C. Após a desforma dos blocos, antes de serem enterrados, não foi constada a presença de nenhuma fissura térmica em sua superfície (SILVA, 2019).

3.4.2 O uso de agregados de grandes dimensões

A escolha certa do tipo de agregado é outro fator importante para evitar os efeitos do calor de hidratação sobre o concreto. De acordo com Neville (2015), os agregados são fragmentos de material que não possuem reações químicas específicas com a água e que são usados como meio cimentante para formar o concreto ou argamassa de cimento hidráulico. A maior parte dos agregados empregados no concreto é proveniente de rochas britadas, fragmentos rolados dos leitos de curso d'água, cascalho de campo, escórias de alto forno, cinza volante, concreto reciclado e resíduos selecionados de rejeitos urbanos.

O comportamento térmico de concretos usuais é determinado pelos agregados, já que além de ocuparem a maior parte do volume do concreto, também restringem as eventuais contrações e dilatações da pasta de cimento durante o aquecimento. Assim, devido à sua origem, as variações nas propriedades dos agregados podem promover efeitos consideráveis sobre o comportamento do concreto submetido a altas temperaturas (ROCHA, 2018).

Quanto à granulometria, os agregados podem ser classificados como miúdos, como é o caso da areia e do pó de pedra e, em grãos, como a brita, o cascalho rolado e o concreto reciclado, entre outros. A NBR 7211 classifica os agregados de grandes dimensões como aqueles com tamanho maior que 4,8 mm. No Brasil, a pedra britada é o agregado grão mais utilizado, principalmente nos grandes centros urbanos, onde muitas vezes é difícil obter agregados naturais, naturais britados e artificiais resultantes dos processos industriais, como é o caso da escória de alto forno (NEVILLE, 2015).

É válido destacar que, embora os agregados não reajam quimicamente com a água, sua temperatura inicial também é importante, podendo influenciar na temperatura do concreto fresco. Dessa forma, é pertinente a refrigeração dos agregados quando os mesmos estiverem em uma temperatura mais elevada em relação à temperatura de lançamento do projeto, levando em consideração que alguns casos não podem ser resolvidos apenas com a substituição da água de amassamento por água gelada ou gelo em escamas (SILVA, 2019).

3.5 Pós-resfriamento

Também é possível refrigerar o concreto mesmo após o ganho de temperatura devido ao calor de hidratação. No entanto, levando em conta que a maior temperatura se concentra no centro da peça, essa refrigeração não ocorre de maneira simples, já que é preciso refrigerar o interior da estrutura. De acordo com Araújo (2013), essa técnica é empregada com serpentinas que são instaladas em pontos estratégicos no interior das peças de concreto e por onde passa água natural ou gelada, depois que a concretagem é finalizada. Esse processo permite que o entorno da serpentina seja refrigerado e que diminua a temperatura no interior da peça de concreto, conforme se observa nas Figura 12 e 13.

Figura 12 – Esquema de circulação de água através de tubos no interior do concreto.



Fonte: Souza, Silva e castro (2014).

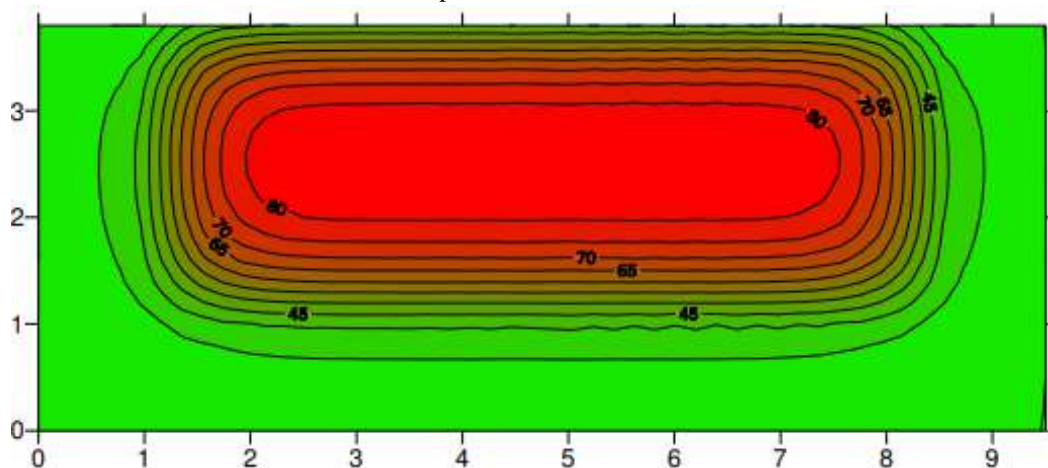
Figura 13 – Uso de serpentina pós-resfriamento de concreto.



Fonte: Souza, Silva e castro (2014).

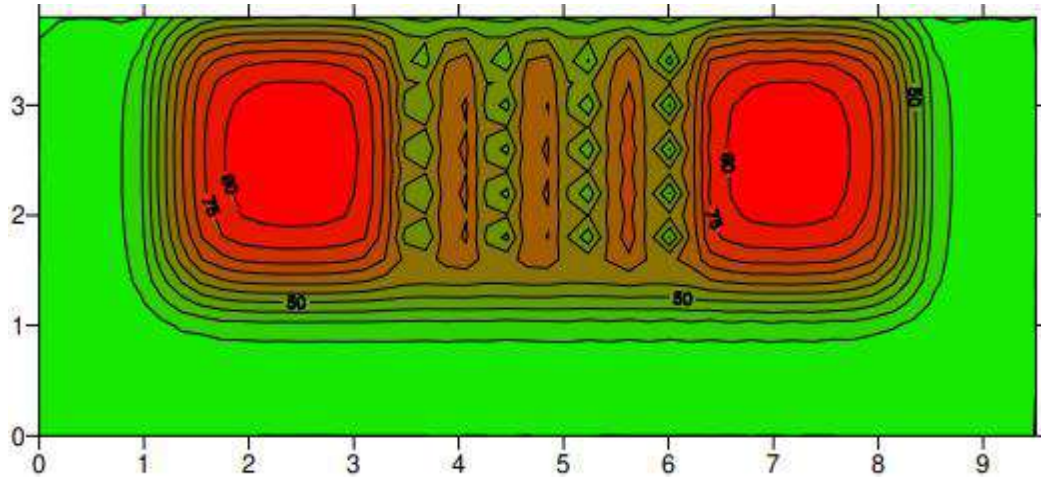
De acordo com Gambale (2009), esse método é recomendado apenas nos casos em que a pré-refrigeração não é suficiente para baixar a temperatura do concreto ao nível desejado, o que corre comumente em obras de grande porte, como usinas e barragens. O autor realizou um estudo que identificou a diferença da temperatura alcançada com pós-refrigeração através da serpentina e sem, na mesma peça de concreto. Conforme se observa nas Figuras 14 e 15, a diferença na região refrigerada pela água que corre no interior das serpentinas chega a ser 10 °C, além de se encontrar em uma área bem menor.

Figura 14 – Temperatura na seção transversal de uma peça de concreto sem pós-refrigeração com 52 horas de idade. Temperatura máxima de 84,92 °C.



Fonte: Gambale (2002).

Figura 15 – Temperatura na seção transversal de uma peça de concreto com pós-refrigeração com 32 horas de idade. Temperatura máxima na região refrigerada de 75,3 °C.



Fonte: Gambale (2002).

De acordo com Souza, Silva e Castro (2014), embora o pós-resfriamento do concreto seja um método eficaz para diminuir os efeitos do calor de hidratação nos blocos e peças, ele possui um alto custo inicial e operacional. Nesse sentido, os autores ressaltam que utilizando o método de pré-resfriamento de forma eficiente para a realização da concretagem, o pós-resfriamento é considerado uma medida somente complementar e facultativa.

3.6 Concretagem em camadas

De acordo com Neville (2015), quando a concretagem é feita por camadas há tempo suficiente para que o concreto massa dissipe o calor ao invés de mantê-lo em seu interior. Essa diferença ocorre em razão da menor espessura das camadas em relação a um bloco inteiro, impedindo a formação de grandes centros de temperatura.

A Figura 16 mostra fotos de camadas de concreto massa sendo aplicadas:

Figura 16 – Exemplo de lançamento do concreto por camadas.

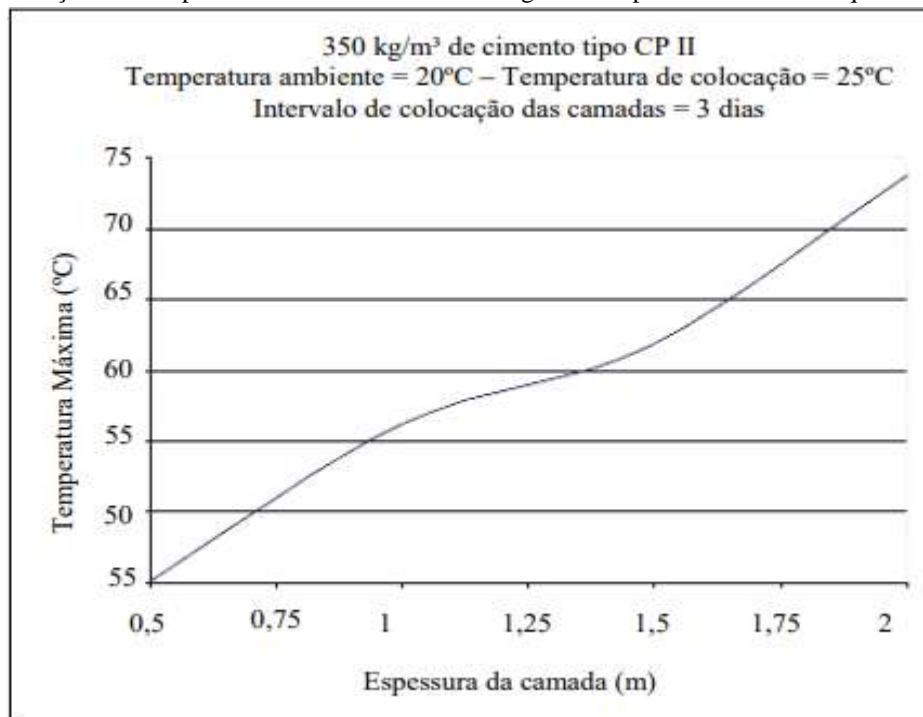


Fonte: Carneiro, Gil e Campos Neto (2011).

Do lado esquerdo, se observa-se a execução do lançamento em camadas sendo feita da forma correta e, do lado direito, da forma incorreta. A diferença está na aderência do concreto entre as camadas e não em relação à temperatura da estrutura. Ressalte-se que a concretagem em camadas precisa respeitar determinada altura, prevista em projeto, e também intervalos de tempo de para o lançamento da camada seguinte (CARNEIRO; GIL; CAMPOS NETO, 2011).

Em seu estudo, Gambale et al. (2013) analisaram a relação entre a espessura de camadas de concretagem e temperatura máxima adquirida pela estrutura e entre o intervalo de concretagem e temperatura máxima adquirida pela estrutura. Os resultados podem ser observados nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Relação entre espessura de camadas de concretagem e temperatura máxima adquirida pela estrutura.



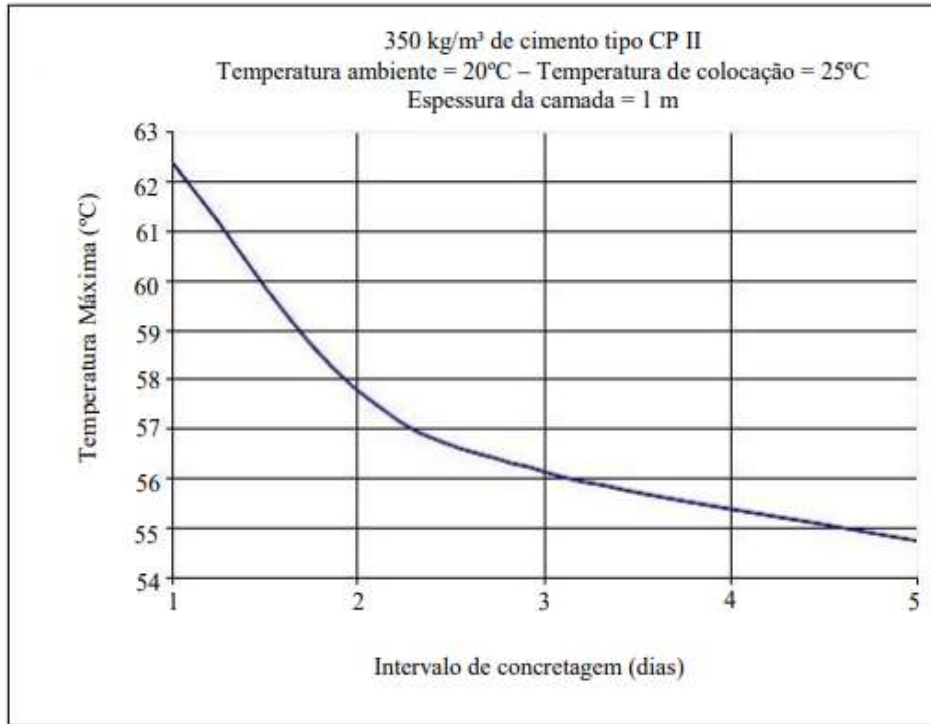
Fonte: Gambale et al (2013).

A figura 17 revela o quanto a concretagem por camadas por influenciar na temperatura máxima que a estrutura adquire pelo fenômeno do calor de hidratação, isto é, diminuindo alturas comuns de blocos de 1,5 metros para 0,5 metros por camada, com os parâmetros adotados pelos pesquisadores, foi possível obter uma redução média de 15 °C a 20 °C, podendo influenciar significativamente a ocorrência de fissuras.

Já na Figura 18 observa-se que até três e quatro dias após a concretagem por camadas a temperatura não decresce muito, de modo que uma boa estimativa de intervalo seria por volta do 5º dia pós-concretagem. Também se nota que essa influência é inversamente

proporcional, ou seja, que a medida que se aumenta o intervalo da colocação da camada, a temperatura máxima a ser adquirida decresce.

Figura 18 – Relação entre intervalo de concretagem e temperatura máxima adquirida pela estrutura.



Fonte: Gambale et al (2013).

Por fim, os autores ainda sugerem que a superfície seja protegida, impedindo a contribuição de cargas térmicas por raios solares, que também podem aumentar a temperatura do concreto. Para tanto, é possível utilizar lonas plásticas elevadas em relação à altura da superfície, permitindo a circulação de ar e evitando que o concreto esquente (GAMBALE et al., 2013).

4 MONITORAMENTO DA TEMPERATURA

O controle e o monitoramento são ações essenciais para impedir o aumento da temperatura do interior do concreto e, conseqüentemente, o surgimento de fissuras. Para o monitoramento da temperatura do ambiente e do concreto podem ser utilizados diversos tipos de sensores, como os termopares e detectores de temperatura resistivos. No entanto, também existem diversas metodologias voltadas ao cálculo da temperatura no concreto massa, com destaque para as aplicações envolvendo o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método das Diferenças Finitas (MDF) (FURNAS, 1997).

Entre os métodos de cálculo implementáveis via MDF há dois relativamente simples, que são o Método de Schmidt e o Método de Carlson. Neles, a estrutura é dividida em elementos de pequeno volume, em que são calculadas as temperaturas em intervalos de tempo diferentes. Sendo assim, esses são métodos em que a precisão dos resultados depende das dimensões estabelecidas e dos respectivos intervalos de tempos adotados.

4.1 Métodos de cálculo da temperatura

Segundo Gambale (2017), a complexidade geométrica das estruturas e a variabilidade dos fatores que influenciam a temperatura no interior das estruturas de concreto, principalmente nas de grandes dimensões, levam à necessidade de utilizar diferentes ferramentas numéricas para a solução de problemas, como no caso da elevação da temperatura no interior das estruturas.

Esses processos normalmente são computacionais, porque requerem um grande volume de cálculos para simular as condições de lançamento e os intervalos de análise. Um dos softwares que pode ser empregado nesse sentido é o ANSYS, que proporciona uma análise rápida e econômica quando comparada a ensaios experimentais. No entanto, alguns processos de cálculo pela MDF podem ser realizados de forma manual, como é o caso dos métodos de Schmidt e Carlson.

4.1.1 Método de Schmidt

O Método de Schmidt foi desenvolvido a partir da Lei de Fourier, que estabelece que o fluxo de calor através de um material é proporcional à diferença de temperatura (gradiente). Quando aplicado em casos de análise de fluxo unidirecional de calor, o Método de Schmidt pode ser definido pela Equação 5 (COUTO, 2018).

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \delta \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\partial T}{\partial t}$$

Onde: θ = temperatura do elemento de volume considerado;

t = tempo;

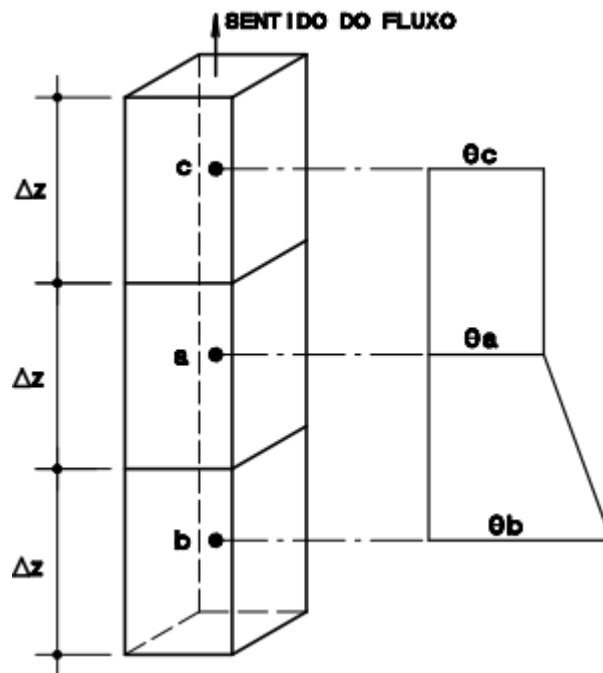
z = coordenada na direção do fluxo;

δ = difusividade térmica do concreto;

T = elevação adiabática da temperatura no elemento de volume considerado.

Para explicar o Método de Schmidt, Couto (2018) toma como exemplo um elemento sujeito a um fluxo unidirecional de calor, conforme Figura 19.

Figura 19 – Exemplo de transmissão de calor em fluxo unidirecional.



Fonte: Couto (2018).

Aplicando a equação de Schmidt via MTD, verifica-se que a temperatura em “a”, após um intervalo de tempo Δt , é obtido a partir da Equação 6 (COUTO, 2018).

$$\theta = \theta_a \cdot \Delta \theta = \frac{\Delta \theta}{\Delta z^2} \cdot \delta \cdot (\theta_b + \theta_c + 2\theta_a) \cdot \theta_a + \Delta T$$

Caso $\Delta \theta$ e Δz forem adotados de modo que:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta z^2} \cdot \delta = \frac{1}{2}$$

Então se tem:

$$\theta = \frac{1}{2} \cdot (\theta_b + \theta_c) + \Delta T$$

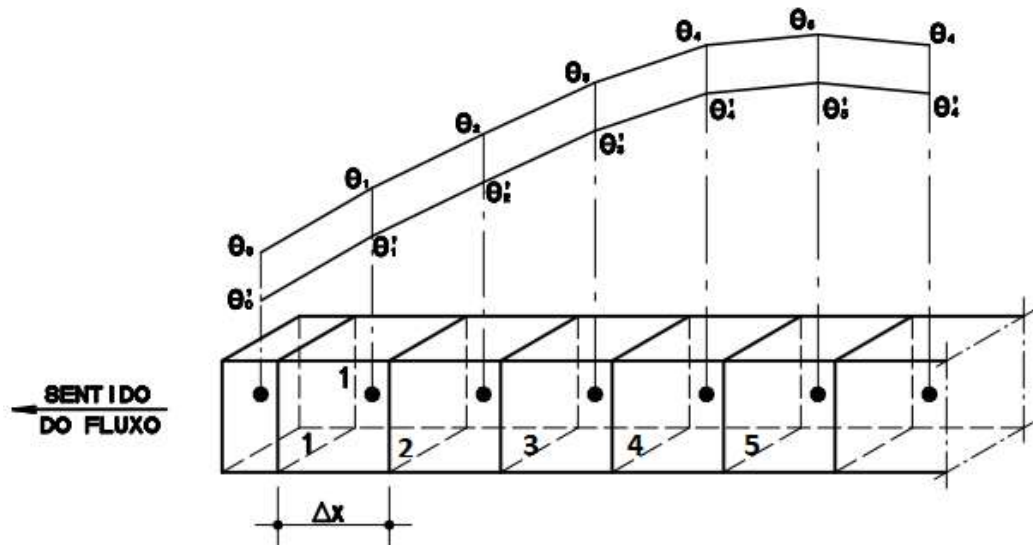
A partir da equação acima, verifica-se que, pelo Método Schmidt, a temperatura de um elemento de volume, decorrido o intervalo de tempo, é equivalente à média aritmética das temperaturas nos elementos adjacentes no instante $t=0$, somada à elevação adiabática de temperatura no elemento durante o intervalo Δt (COUTO, 2018).

4.1.2 Método de Carlson

Roy W. Carlson foi um engenheiro e professor universitário norte-americano, com grandes contribuições na área de tecnologia do concreto, em especial sobre o uso do concreto massa em obras de grandes dimensões em barragens. Entre as obras com participação de Carlson destacam-se as pesquisas sobre os materiais empregados na construção da barragem Hoover, nos Estados Unidos, além da participação nos projetos das barragens brasileiras de Itaipu e Tucuruí. No Brasil, inclusive, Carlson foi por muito anos consultor da Companhia Energética de São Paulo (CESP), tendo recebido a Condecoração da Ordem Nacional do Cruzeiro do Sul, que é a mais importante condecoração conferida a um civil no Brasil (COUTO, 2018).

De acordo com Furnas (1997), o Método Carlson é bastante semelhante ao Método de Schmidt para análise dos fluxos unidirecionais de calor. Na realidade, o Método de Carlson considera um corpo sólido dividido em diversos prismas independentes, com comprimento Δx na direção do fluxo e seção transversal com área unitária, conforme se observa na Figura 20.

Figura 20 – Transmissão de calor em fluxo direcional via Método de Carlson.



Fonte: Adaptado de Furnas (1997).

Em seguida, assume-se que, em um intervalo de tempo Δt , a temperatura de cada prisma “n” varie de θ'_n para θ_n . Considera-se que o tamanho do prisma seja pequeno, de modo a assumir simplificadamente que a temperatura no seu centro corresponda a temperatura média de todo o prisma, considerando ainda que o desenvolvimento de calor seja constante e a variação de temperatura seja linear em função do tempo (COUTO, 2018).

Observando a Figura 20, nota-se que não há fluxo de calor no prisma nº 5, o que pode ser demonstrado pela Equação 7 (COUTO, 2018).

$$\theta_5 = L_5 + Z_5 \cdot \theta_4$$

$$L_5 = \frac{C_5 \cdot Z_5}{2}$$

$$C_5 = 2\theta_4 + (2s - 2) \cdot \theta_5 + 2S \cdot \Delta T$$

$$Z_5 = \frac{1}{S + 1}$$

$$S = \frac{\Delta x^2}{\delta \cdot \Delta t}$$

De maneira análoga, demonstra-se, para qualquer outro prisma onde haja fluxo de calor que:

$$\theta_n = L_n + Z_n \cdot \theta_{n-1}$$

Onde a partir da Equação 8 (COUTO, 2018), tem-se que:

$$L_n = (C_n = L_{n+1}) \cdot Z_n$$

$$C_n = \theta_{n-1} + (2S - 2) \cdot \theta_n + \theta_{n-1} + 2S \cdot \Delta T$$

$$Z_n + \frac{1}{2S + 2 - Z_{n+1}}$$

Para pontos localizados fora da área do concreto lançado, utiliza-se a Equação 9 (COUTO, 2018).

$$C_n = 2S \cdot \theta_n$$

$$Z_n = \frac{1}{2S + 2 - Z_{n-1}}$$

$$L_n = \theta_n (1 - Z_n)$$

$$\theta_n = L_n + Z_n \cdot \theta_{n-1}$$

De acordo com Couto (2018), o Método de Carlson pode ser resolvido de forma tabular, com o uso de planilhas eletrônicas, resolvendo repetidamente as equações para cada intervalo de tempo e determinando os parâmetros C_n , L_n e θ_n .

4.2 Monitoramento com termopares

Em relação ao monitoramento da temperatura propriamente dito, é comum o uso de termopares. Os termopares são sensores de temperatura simples e de baixo custo, amplamente utilizados para medição de temperatura nos canteiros de obras. Normalmente o aparelho é constituído de dois metais distintos que, quando unidos pelas extremidades, formam um circuito fechado (SANTOS, 2019). Dessa forma, o termopar gera uma força eletromotriz (FEM), que ao ser conectada a um instrumento específico de leitura consegue registra as temperaturas dos processos destes termopares.

Em um estudo de caso que contemplou os procedimentos e problemas envolvidos na concepção e execução de uma sapata de fundação de um shopping center na cidade de São Paulo/SP, Couto, Helene e Almeida (2016), utilizaram cinco termopares distribuídos em pontos estratégicos da sapata, para observar a evolução da temperatura interna nas diferentes

regiões da peça e comparar com o modelo de simulação computacional *b4cast*. A Figura 21 mostra a fixação do termopar e do aquisitor de dados na armação da sapata.

Figura 21 – Detalhe da fixação do termopar e do aquisitor de dados na armação da sapata.



Fonte: Couto, Helene e Almeida (2016).

Os termopares foram desligados da estrutura após sete dias, de modo que os cinco equipamentos registraram as leituras na primeira camada, durante o instante $t=0$ ao instante $t=171h$, e na segunda camada o registro dos dados ocorreu entre os instantes $t=167$ a $t=339h$. Em cada termopar também estava acoplado um sensor de temperatura ambiente, registrando uma leitura a cada hora durante esse período. O pico de temperatura da primeira camada ocorreu no instante $t=50h$, com valor de $60,9^{\circ}C$, registrado no Termopar número 1. O pico de temperatura da segunda camada ocorreu no instante $t=237h$, com valor de $66,5^{\circ}C$ (COUTO; HELENE; ALMEIDA, 2016).

Em um experimento realizado por Rocha e Silva (2019) com o objetivo de investigar diferentes técnicas de pré e pós-resfriamento do concreto massa, os autores utilizaram termopares para monitorar a evolução da temperatura do concreto lançado em um bloco de fundação de $420 m^3$ de um edifício de 25 andares na cidade de Torres/RS. No caso em tela, o monitoramento foi realizado com o uso de termopares tipo J bi-metálico, instalados em 7

pontos do bloco de fundação, além de um ponto de temperatura ambiente, conforme se observa na Figura 22.

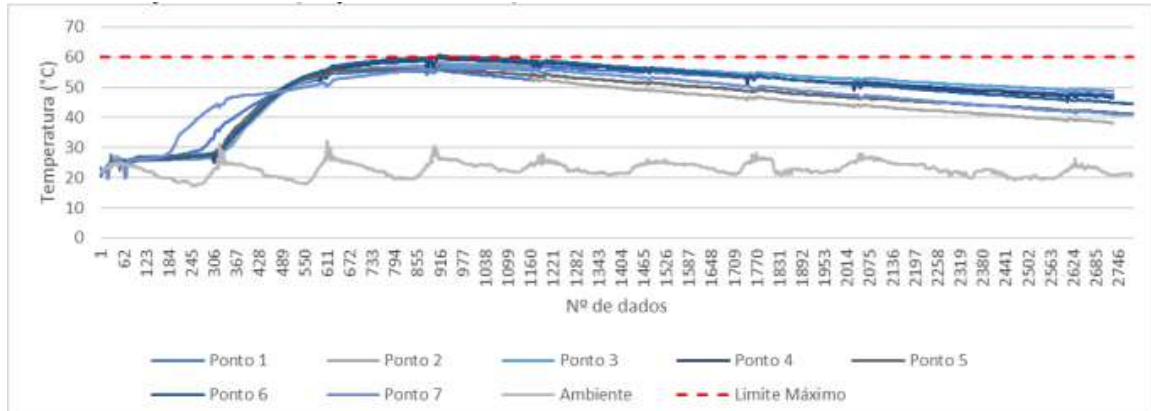
Figura 22 – Instalação dos termopares para monitoramento térmico do bloco de fundação.



Fonte: Rocha e Silva (2019).

A evolução da temperatura foi monitorada pelos termopares durante 11 dias, até que se estabilizasse. Na Figura 23 é possível observar as curvas de calor obtidas durante o monitoramento, sendo que a linha vermelha representa o limite estabelecido de 60 °C para a evolução da temperatura.

Figura 23 – Curvas de temperaturas reais obtidas para os sete pontos internos do bloco e para o ponto externo.



Fonte: Rocha e Silva (2019).

É válido ressaltar que, no caso em tela, foi utilizado o pré-resfriamento da estrutura com a substituição de 50% do teor da água de amassamento por gelo em escamas. Com base nas curvas de temperatura observadas na Figura 23, é possível notar que as temperaturas não excederam o valor de 60 °C estabelecido pelos pesquisadores para o bloco de fundação em questão. Os resultados mostram que a quantidade de gelo empregada no pré-resfriamento atendeu as expectativas de baixar a temperatura para, no máximo, 60 °C, considerando a elevação adiabática causada pela hidratação do cimento. Logo, pode-se concluir que os problemas com reações químicas de origem térmica estão prevenidos, uma vez que o limite de temperatura está dentro do limite máximo estabelecidos para a formação de etringita tardia (ROCHA; SILVA, 2019).

4.3 Uso de detectores de temperatura resistivos (RTD)

De acordo com Silva (2009), os detectores de temperatura resistivos (RTD) são sensores de temperatura obtidos a partir de um metal puro ou ligeiramente dopado, como platina, níquel e cobre, cuja resistência aumenta conforme o aumento da temperatura e que apresentam alteração da resistência com de acordo com a Equação 10 (SILVA, 2009).

$$R = R_0 (1 + \alpha_1 T^2 + \alpha_n T^n)$$

Onde:

R_0 = resistência a °C;

α = coeficiente de temperatura °C⁻¹ e;

T (°C) = temperatura à qual o RTD se encontra submetido.

Conforme se observa na equação acima, a temperatura do metal aumenta ou diminui conforme o aumento ou diminuição da temperatura. A platina tem sido o metal mais utilizado em RTDs devido à sua alta estabilidade, por ser quimicamente inerte e por ser possível trabalhar com esse metal exposto a temperaturas elevadas. Até pouco tempo, havia preferência pelo uso dos sensores resistivos na construção civil, mas atualmente prefere-se utilizar os termopares em razão do preço mais acessível.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo abordou o uso do concreto massa em elementos estruturais de grandes dimensões e, partindo desse pressuposto, teve como objetivo geral analisar os métodos de prevenção e monitoramento de fissuras decorrentes do calor de hidratação na concretagem de grandes volumes. Tratou-se de uma pesquisa exploratória e bibliográfica, realizada a partir de um levantamento bibliográfico envolvendo livros, artigos científicos, monografias e dissertações que abordaram o tema.

Para atingir o objetivo central do estudo foi preciso abordar outros três objetivos específicos. O primeiro deles consistiu em identificar os fatores que podem resultar no aumento da temperatura no interior de um bloco de concreto, sendo eles o tipo de cimento, a quantidade e a qualidade da água e o tipo de agregado utilizados na mistura, a temperatura do ambiente, a temperatura de lançamento do concreto e a espessura das camadas de concreto. Todos esses fatores estão relacionados com o aumento do calor de hidratação do concreto e, conseqüentemente, com o surgimento de problemas de origem térmica.

O calor de hidratação é o calor liberado pelo concreto através de um processo exotérmico e que ocorre ainda nas primeiras horas de aplicação, quando começa o processo de endurecimento. A reação química que ocorre entre os elementos que constituem o concreto, como a água e o cimento, faz com que seja liberada certa quantidade de produtos de hidratação, como o hidróxido de cálcio e etringita, entre outros, provocando um aumento da temperatura da massa, cujo calor será liberado na atmosfera.

Quando se utiliza um grande volume de concreto para a mesma peça, à exemplo do que ocorre na construção de elementos de grandes dimensões, como pontes, barragens, usinas hidrelétricas e complexos esportivos, o calor produzido no interior da peça encontra maior dificuldade em se dissipar para atmosfera. Essa dificuldade gera grande acúmulo no interior da massa, acarretando um diferencial térmico entre o núcleo e a superfície do bloco, cuja principal consequência é o surgimento de fissuras e da etringita tardia, que colocam em risco a segurança e durabilidade da estrutura.

Para evitar problemas dessa natureza têm sido utilizados vários métodos preventivos, que envolvem desde a escolha do cimento e dos agregados mais adequados para a fabricação do concreto massa até o uso de técnicas de pré e de pós-resfriamento, além da concretagem em camadas. O segundo objetivo específico do estudo foi discutir a eficácia das técnicas de pré-resfriamento do concreto na construção de elementos de grandes volumes, citando

exemplos práticos. O pré-resfriamento tem sido o método mais empregado na prevenção de problemas de origem térmica em razão do baixo custo e do alto nível de eficácia.

Os principais materiais utilizados no pré-resfriamento do concreto são a água gelada e o gelo em escamas, embora em alguns casos também seja possível aplicar nitrogênio diretamente nos silos em que o coque é armazenado. A literatura evidenciou que o uso do gelo em escamas ainda é o mais indicado, levando em conta que o material possui uma capacidade oito vezes maior de reduzir a temperatura do concreto comparado com a água em temperatura ambiente. O gelo em escamas pode ser adicionado diretamente na betoneira, o no balão do caminhão betoneira, podendo ser adquirido em fábricas especializadas presentes em praticamente todos os centros urbanos.

No estudo foi possível citar alguns elementos estruturais de grandes dimensões cujos blocos de concreto foram realizados com o auxílio da técnica de pré-resfriamento com gelo em escamas, como é o caso dos blocos de fundação da usina de Itaipu, da Ponte JK em Brasília, e das obras da Linha 3 do Metrô de São Paulo. Até mesmo obras de fundação de edifícios residenciais têm empregado esta técnica, substituindo, em média, 50% da água de amassamento por gelo em escamas com o objetivo de evitar o surgimento de fissuras e garantir a segurança do empreendimento.

Diante dos achados, observa-se que o método de prevenção de fissuras decorrentes do calor de hidratação na concretagem de grandes volumes a partir da técnica de pré-resfriamento com gelo é o mais utilizado, embora o cuidado com os materiais utilizados na mistura do concreto também seja importante. O gelo em escamas reduz as tensões térmicas do concreto, diminuindo o calor de hidratação nas primeiras horas após o lançamento, o que evita o surgimento de fissuras e gera uma melhor evolução da resistência à compressão. Também evita a formação de compostos expansivos durante a hidratação do cimento que podem reduzir a durabilidade das estruturas.

O estudo ainda se ocupou em descrever os métodos utilizados para monitorar a temperatura em estruturas de concreto massa. Conforme aponta a literatura, o controle de temperatura deve ser realizado assim que houver autorização para o lançamento do concreto. Via de regra, esse monitoramento se dá através de sensores elétricos, como termômetros e termopares, embutidos na própria massa do concreto. Nos casos em que for verificada uma irregularidade da temperatura ou abatimento do concreto, a correção poderá ser feita com a inserção de aditivos superplastificantes, capazes de reduzir o consumo de cimento da dosagem ou, ainda, com a adição de mais gelo, nos casos em que este tenha sido utilizado como forma de pré-resfriamento.

O presente estudo encontrou algumas limitações em seu desenvolvimento, sobretudo no que diz respeito a escassez de estudos empíricos sobre determinados pontos abordados, como é o caso da adição de minerais e agregados de grandes dimensões para reduzir a temperatura de lançamento do concreto e, conseqüentemente, os riscos associados ao calor de hidratação, além do uso de detectores de temperatura resistivos para o monitoramento da temperatura do concreto. Sendo assim, sugere-se que outros estudos sejam desenvolvidos com o objetivo de analisar o uso específico desses elementos como métodos de prevenção dos problemas decorrentes do calor de hidratação e monitoramento da temperatura na concretagem de grandes volumes.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. C. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu.** Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. 259 fls.
- ALVES, M. H. *et al.* **Efeito da substituição da água de amassamento por gelo nas propriedades de concretos C30 e C70.** Anais do 59º Congresso Brasileiro de Concreto, Bento Gonçalves, p. 1-17, 2017.
- ANDRADE, M. M. **Introdução à metodologia do trabalho científico:** elaboração de trabalhos na graduação. 10. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- ARAÚJO, J. M. Tensões térmicas em blocos de concreto armado. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 22, p. 1-14, 2013.
- ASSIOLI, D. et al. Concreto resfriado: o conceito, sua função e emprego nas obras de construção civil. **Revista Conexão Eletrônica**, Três Lagoas, v. 14, n. 1, p. 784-791, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento.** Rio de Janeiro, 2014. 256 fls. Disponível em: https://www.galaxcms.com.br/up_arquivos/1149/NBR61182014-20190807180913.pdf. Acesso em: 02 nov. 2021.
- BRITEZ, C. et al. Concreto e concretagem de blocos de fundação em concreto autoadensável e de alta resistência (70Mpa). **Revista ALCONPAT**, v. 6, n. 1, p. 28-40, 2016.
- CARNEIRO, G. V. H. S; GIL, L. K. S; CAMPOS NETO, M. P. C. **Calor de hidratação do concreto.** Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011, 67 fls.
- CINCOTTO, M. A. Reações de Hidratação e Pozolânicas. In: ISAIA, G. C. et. al. **Concreto: Ciência e Tecnologia v.1.** Cap. 11, p.381-413. São Paulo: Ibracon, 2011.
- COELHO, N. A. **Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa.** Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2012. 173 fls.
- COELHO, N. A; NEPOMUCENO, A. A.; PEDROSO, L. J. **O concreto massa e seus efeitos térmicos.** São Paulo: Novas Edições Acadêmicas, 2014.
- COUTO, D. A. **Considerações sobre a temperatura em elementos de fundação em concreto de grandes dimensões.** Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018. 145 fls.
- COUTO, D; HELENE, P; ALMEIDA, L. C. Monitoramento de temperatura em sapata de fundação de grande porte: estudo de caso “Parque da Cidade” – SP. **Revista IBRACOM de estruturas e materiais**, v. 9, n. 6, p. 953-968, 2016.

COUTO, J. A. S. et al. O concreto como material de construção. **Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas**, Sergipe, v. 1, n. 17, p. 49-58, 2013.

DAL PONT, P. A. Estudo de caso envolvendo concretagem de elementos estruturais de grande porte – estação de tratamento de esgoto – Balneário Piçarras – SC. **Especialize**, Goiânia, v. 1, n. 15, p. 1-16, 2018.

DYER, T. **A durabilidade do concreto**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2020.

FURNAS. **Concreto: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

GAMBALE E. A. **Execução do concreto bombeado nas ogivas dos vãos rebaixados do vertedouro de lajeado**. Instituto Brasileiro do Concreto, 2002.

_____. A. Análise do fenômeno térmico em concretos de cimento Portland branco. **Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto**, Salvador, 2008.

_____. Simulação numérica e verificação in loco das temperaturas da viga munhão da UHE foz do Chapecó. **Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto**. Ibracon, 2009.

_____. Análise Estatística dos Parâmetros que intervêm no Fenômeno Térmico do Concreto Massa. **Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto**. Ibracon, 2010.

_____; et al. **Efeito da temperatura sobre o concreto**. Goiânia, GO. Palestras: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS, 2013.

_____. **Estudo do calor de hidratação do concreto massa e contribuição ao cálculo térmico e à previsão de fissuras e retração**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017. 122 fls.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

LOBATO, M. S; RIBEIRO, M. L; SILVA, A. M. Análise físico-química de diferentes amostras de cimento comercializados na cidade de São Luís – MA. **Revista Ceuma Perspectivas**, v. 31, 148-159, 2018.

MILAGRES, E. A. **Retração e secagem do concreto: estudo da retração do concreto e o aparecimento de patologias**. Monografia apresentada ao curso de Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. 66 fls.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NILI, M.; SALEHI, A. M. Assessing the effectiveness of pozzolans in massive high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 145-161, 2010.

PEREIRA, J. M. **Manual de metodologia da pesquisa científica**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

ROCHA, H. M; SILVA, M. S. **Investigação do uso de diferentes técnicas de resfriamento de concreto massa como prevenção para problemas de origem térmica**. Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2019. 48 fls.

ROCHA, R. A. Efeito da alta temperatura em concretos: uma revisão da literatura. **Inter Scientia**, João Pessoa, v. 6, n. 1, p. 211-227, 2018.

SANTOS, S. B. **Fenômeno térmico do concreto: fundamentos e aplicações práticas**. Rio de Janeiro: Interciência, 2019.

SCAQUETTI, C. C. F; PIMENTEL, L. L. **Influência da água de reuso no calor de hidratação do cimento**. Anais do III Simpósio Brasileiro Online de Gestão Urbana, São Carlos, 2019.

SHAMAA, A. M. et al. Influence of relative humidity on delayed ettringite formation. **Cement and Concret Composites**, v. 58, 2014.

ŠILER, P. et al. Effects of high-temperature fly ash and fluidized bed combustion ash on the hydration of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v.78, p. 586-598, 2015.

SILVA, A. M. B. M. Utilização do concreto pré-refrigerado: estudo de casos em blocos de fundação com grandes dimensões. **Revista Especialize Online IPOG**, Goiânia, v. 1, n. 17, p. 1-24, 2019.

SILVA, D. L. et al. Considerações sobre a formação de etringita tardia (DEF). **Revista Constituinte**, Belo Horizonte, v. 9, n. 2, p. 36-46, 2017.

SILVA, J. G. **Monitoração e controle de umidade e temperatura em secadores de massas alimentícias**. Dissertação apresentada ao Centro Universitário do Instituto Mauá de tecnologia, São Caetano do Sul, 2009. 87 fls.

SOUZA, A. L; SILVA, I. R. R; CASTRO, P. H. M. **Retração térmica e fissuração em concreto por calor de hidratação**. Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014. 108 fls.

SOUZA, G. T. **Dosagem experimental de concreto massa com adição de sílica ativa aplicado em barragem**. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2017.

TOMAZELI, A. **Estruturas paralisadas de concreto armado em edifícios – inspeção, análise e aceitação**. Guarulhos: LEUD, 2019.