



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
CENTRO MULTIDISCIPLINAR - PAU DOS FERROS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FRANCISCO KLEBER DANTAS DUARTE

## **AVALIAÇÃO TÉRMICA DO CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES**

PAU DOS FERROS

2018

FRANCISCO KLEBER DANTAS DUARTE

**AVALIAÇÃO TÉRMICA DO CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES:  
ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Matheus Fernandes de Araújo Silva, Prof. Me.

PAU DOS FERROS

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D192a Dantas Duarte, Francisco Kléber.  
Avaliação Térmica do Concreto nas Primeiras  
Idades. / Francisco Kléber Dantas Duarte. - 2018.  
46 f. : il.

Orientador: Matheus Fernandes de Araújo Silva.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,  
2018.

1. Calor de Hidratação. 2. Temperatura . 3.  
Manifestações Patológicas. I. de Araújo Silva,  
Matheus Fernandes , orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

**AVALIAÇÃO TÉRMICA DO CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES:  
ESTUDO DE CASO**

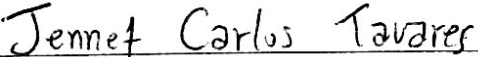
Monografia apresentada a Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido como requisito  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Defendida em: 18 / 04 / 2018.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Matheus Fernandes de Araujo Silva, Prof. Me. (UFERSA)  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
José Flávio Timóteo Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador

  
\_\_\_\_\_  
Jennef Carlos Tavares, Prof. Bel (UFERSA)  
Membro Examinador

## AGRADECIMENTOS

Fazendo uma analogia a construção civil apresento meus sinceros agradecimentos: Nessa grande obra que é a vida, estou a construir minha carreira como engenheiro civil, hoje gostaria de começar a agradecer as pessoas que compõe minha base, ou seja, a fundação de minhas conquistas, primeiramente a Deus, que abriu meus olhos e fez com que eu volta-se aos estudos; aos meus pais, que de forma ininterrupta trabalharam dia e noite para que eu pudesse permanecer a estudar fora de casa; a Mayara Laisse, que durante esses cinco anos esteve me apoiando e me convencendo da minha capacidade; aos meus estimados professores, que deles muitos posso chamar de amigos, arriscarei citar alguns, começando pelo meu antigo e orientador do Bacharel em Ciência e Tecnologia, Lino Holanda, um homem de grande coração que abriu muitas oportunidades no meio acadêmico; meu atual orientador Matheus Fernandes, ele que me fez enxergar a beleza da engenharia estrutural, mostrando que apesar de complicada, é um fator determinante para o conhecimento de um engenheiro, como também a Jennef Carlos, Daniel Jales, Alisson Gadelha, Wesley de Oliveira, Eder Leonardo, Marília Cavalcante, Rogério de Jesus e etc. A vocês meus sinceros agradecimentos pelos ensinamentos e por serem bons amigos.

Ao falar dos professores não só fico em minha fundação, mas agora parto para uma superestrutura, onde essa me ajudará a engrandecer e embelezar minha obra.

Gostaria de agradecer também a meus colegas de universidade que com grande parceria se tornaram parte fundamental da pessoa que me tornei, e estarão para sempre em minhas memórias, entre eles estão: Vitor Souza, Caio Abrantes, Henrique Maciel, Janailson Maciel, Romário Ribeiro, Victor Vinicius, Ravi Linhares, Felipe Lira, Jorge Alves, Domingos Alves, William Vieira, obrigado meus amigos, com toda certeza eu sou apenas o fruto do meu esforço pessoal e da boa vontade de cada um de vocês.

## RESUMO

A análise de temperatura no núcleo do concreto é um estudo necessário para que seja evitado manifestações patológicas devido ao calor de hidratação. Esse trabalho procurou analisar de forma prática o desenvolvimento de temperatura no núcleo do concreto nas idades iniciais, para que, mas a frente seja analisada por métodos numéricos a dissipação de calor no concreto massa. Os fatores que influenciam na temperatura do concreto são o calor de hidratação, os efeitos de transmissão de calor, condução, radiação e convecção, assim como as condições iniciais e de contorno do concreto. Para grandes concretagens a principal causa de preocupação é o gradiente térmico atingido, ou seja, a diferença entre as temperaturas máxima e mínima que o concreto está sujeito.

Para ser possível a aferição de temperaturas suficientes para ser gerado as curvas, foi confeccionado um caixa com propriedades isolantes, como também foi utilizado termômetro digital com auxílio de termopar, fixado no centro da caixa, para que coincidissem com o núcleo do concreto.

A análise desse trabalho foi dada como satisfatório para as condições impostas, quando comparado a resultados de outros trabalhos semelhantes, foram plotadas curvas para um ponto de medição, gerado gráficos e comparado com outras literaturas, como também foi proposto trabalhos futuros com análises de transiente de temperatura por MEF (Método dos Elementos Finitos).

**Palavras-chave:** Calor de Hidratação. Temperatura. Manifestações Patológicas.

## **ABSTRACT**

The analysis of temperature in the concrete core is a necessary resource to avoid pathological manifestations due to the heat of hydration. This work sought to analyze the temperature configuration in the concrete core in the initial dates, so that it is analyzed by numerical methods in the distribution of heat in the concrete mass.

The factors influencing the temperature are the heat of hydration, the effects of heat, conduction, radiation and convection, as well as the initial and contour conditions of the concrete. For large concretes the main cause of concern is the thermal gradient, that is, a difference between the maximum and minimum means of the concrete is subject.

For the possibility of a sufficient energy generation to be generated as a curve, a box with insulation was made, as well as a digital thermometer with thermocouple aid, fixed in the center of the box at a medium height, to coincide with the core of the concrete.

The formation of this work was given as satisfactory for the needs, generating curves for a point of analysis and generated graphs with other literatures.

**Keywords:** Heat of Hydration. Temperature. Pathological Manifestations.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Vista em planta.....                                                                   | 13 |
| Figura 2: Vista lateral. ....                                                                    | 14 |
| Figura 3: Modelo 3D da caixa, em vista sem tampa.....                                            | 14 |
| Figura 4: Camada externa de madeira sem tampa. ....                                              | 15 |
| Figura 5: Camada externa de madeira com tampa.....                                               | 15 |
| Figura 6: Montagem das placas de isopor laterais. ....                                           | 16 |
| Figura 7: Placas laterais e de fundo prontas. ....                                               | 16 |
| Figura 8: Montagem de placa de isopor na tampa, sem acabamento. ....                             | 17 |
| Figura 9: Montagem de placa de isopor na tampa, com acabamento. ....                             | 17 |
| Figura 10: Assentamento das folhas de papel alumínio. ....                                       | 18 |
| Figura 11: Corpos de prova. ....                                                                 | 19 |
| Figura 12: Canteiro de Obras, bloco C. ....                                                      | 19 |
| Figura 13: Cordões de auxílio para o termopar. ....                                              | 20 |
| Figura 14: Termômetro digital MT-455 .....                                                       | 20 |
| Figura 15: Termopar Universal tipo K. ....                                                       | 21 |
| Figura 16: Fluxograma de atividades. ....                                                        | 22 |
| Figura 17: Concretagem de fundação de torre eólica. Volume de concreto de 400m <sup>3</sup> . .. | 23 |
| Figura 18: Taxa de liberação de calor em função do tempo. ....                                   | 28 |
| Figura 19: Influência agregado no coeficiente de dilatação térmica do concreto. ....             | 31 |
| Figura 20: Elemento infinitesimal com fluxo na direção x .....                                   | 33 |
| Figura 21: Evolução de temperatura no concreto em situação adiabática.....                       | 37 |
| Figura 22: Curva granulométrica do agregado miúdo. ....                                          | 39 |
| Figura 23: Curvas Granulométricas.....                                                           | 40 |
| Figura 24: Concretagem da caixa .....                                                            | 41 |
| Figura 25: Primeira aferição de temperatura .....                                                | 41 |
| Figura 26: Gráfico de temperatura por tempo .....                                                | 42 |
| Figura 27: Gráfico de temperatura por tempo em um dia .....                                      | 42 |
| Figura 28: Ajuste da curva adiabática .....                                                      | 43 |
| Figura 29: Resultados de Koo et al. (2014) .....                                                 | 44 |

## SUMÁRIO

|       |                                                         |    |
|-------|---------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....                                        | 11 |
| 1.1   | OBJETIVOS .....                                         | 11 |
| 1.1.1 | GERAL .....                                             | 11 |
| 1.1.2 | ESPECÍFICOS .....                                       | 12 |
| 1.2   | PROBLEMATIZAÇÃO .....                                   | 12 |
| 1.3   | METODOLOGIA .....                                       | 12 |
| 1.4   | JUSTIFICATIVA .....                                     | 22 |
| 2     | REVISÃO TEÓRICA .....                                   | 24 |
| 2.1   | CALOR DE HIDRATAÇÃO NO CONCRETO .....                   | 25 |
| 2.2   | TENSÕES TÉRMICAS .....                                  | 28 |
| 2.3   | AUMENTO ADIABÁTICO DE TEMPERATURA .....                 | 29 |
| 2.4   | PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO MASSA .....           | 30 |
| 2.5   | DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO CONCRETO MASSA .....     | 32 |
| 2.6   | DESENVOLVIMENTO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO<br>34 |    |
| 2.7   | TAXAS INTERNAS DE GERAÇÃO DE CALOR DE CONCRETO .....    | 35 |
| 3     | ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....                | 38 |
| 3.1   | CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO .....                  | 38 |
| 3.1.1 | MASSA ESPECÍFICA REAL E MASSA UNITÁRIA .....            | 38 |
| 3.1.2 | ENSAIO DE GRANULOMETRIA .....                           | 38 |
| 3.2   | CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO .....                 | 39 |
| 3.2.1 | MASSA ESPECÍFICA REAL E MASSA UNITÁRIA .....            | 39 |
| 3.2.2 | ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....                            | 40 |
| 3.3   | ANÁLISE DE TEMPERATURA .....                            | 41 |
| 3.4   | ENSAIO DE COMPRESSÃO AOS 28 DIAS .....                  | 44 |
| 4     | CONCLUSÃO .....                                         | 45 |

# 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, com o avanço da construção civil ele vem sendo produzido em larga escala, como também vem sendo melhorado suas propriedades com a implementação de novas tecnologias. No Brasil a maioria das obras utilizam concreto, sejam elas de grande ou pequeno porte, pois o concreto traz uma série de benefícios e economia para a obra, como por exemplo a fácil obtenção de mão de obra, é resistente a intempéries, tem boa resistência a reagentes químicos, grande vida útil, entre várias outras vantagens em relação a outros materiais, como por exemplo os metais.

Fissuras em estruturas de concreto são indesejáveis, pois a partir dessa exposição podem surgir várias manifestações patológicas, prejudicar a permeabilidade, aparência e modificar as tensões internas da estrutura. Essas fissuras podem ocorrer devido à restrição de mudanças volumétricas da estrutura, provocadas por solicitações que gerem tensões de tração no elemento. O concreto resiste bem a compressão, mas apenas 10 % a tração. Logo quando exposto a tensões de tração superiores à resistência à tração do concreto, surgem fissuras nas direções perpendiculares as tensões de tração.

De acordo com o American Concrete Institute – ACI (2005), podemos definir o concreto massa como um grande volume de concreto, volume esse que torne suas dimensões grandes o suficiente para que sejam necessárias medidas mais sofisticadas para reduzir a temperatura interna dessa estrutura. Em peças estruturais de grande volume, a geração de calor pela reação exotérmica de hidratação do cimento provoca tensões internas, gerando trincas e rachaduras.

O controle da temperatura interna provocado pela reação exotérmica é importante para controlar o aparecimento de fissuras (Townsend, 1981).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 GERAL

O presente trabalho tem como objetivo analisar e ajustar leis que regem o desenvolvimento de temperatura no núcleo do concreto massa, por meio de processos adiabáticos.

### **1.1.2 ESPECÍFICOS**

- Realizar ensaio em calorímetro em condições aproximadamente adiabáticas, ideais para analisar a evolução de temperatura do concreto nas primeiras idades;
- Caracterização dos agregados miúdo e graúdo.
- Realizar ensaio de evolução de temperatura de concreto em ambiente fechado e em forma termicamente isolada para análise de temperatura do núcleo do concreto;
- Analisar de forma qualitativa e quantitativa os resultados obtidos dos experimentos;
- Construir equipamento que controle de forma quantitativa a troca de calor com o meio.

## **1.2 PROBLEMATIZAÇÃO**

O presente trabalho tem como intuito estudar a distribuição e geração de energia interna de calor de hidratação do concreto, decorrido ao longo do processo de endurecimento do concreto.

O concreto mais utilizado no Brasil usa como produto cimentício (ligante) o cimento Portland. Em qualquer produção de concreto desse tipo será observado reações exotérmicas, ou seja, que libera calor. Com essa geração de calor é gerado um gradiente térmico que dependendo da variação desse gradiente pode provocar manifestações patológicas nas estruturas de concreto. Sendo assim, não só a liberação de calor interna será responsável por o aparecimento de fissuras, mas também as condições de ambiente onde esse concreto está sendo produzido.

Segundo a agência EMBRAPA 2017, o Semiárido apresenta elevada temperatura com média anual em torno de 26° C a 27,5° C. Nos meses mais secos a temperatura do solo atinge 60° C. Devido a essa alta temperatura pela manhã e o resfriamento abrupto a noite, o concreto produzido no semiárido brasileiro tem uma maior probabilidade de sofrer com o aparecimento de fissuras devido ao gradiente térmico.

Existem várias formas de combater o gradiente térmico nas primeiras idades do volume de concreto: uma delas é substituir parte da água de amassamento do concreto por raspas de gelo, diminuindo a temperatura provocada pelos produtos de hidratação e consequentemente reduzindo o gradiente térmico.

## **1.3 METODOLOGIA**

Para a concretização deste trabalho realizou-se primordialmente uma pesquisa bibliográfica no que tange as reações de hidratação, e a influência da temperatura no concreto

massa, analisando como é feito experimentos para determinação da distribuição de temperatura, como também detalhes técnicos do calorímetro que foi utilizado para os ensaios.

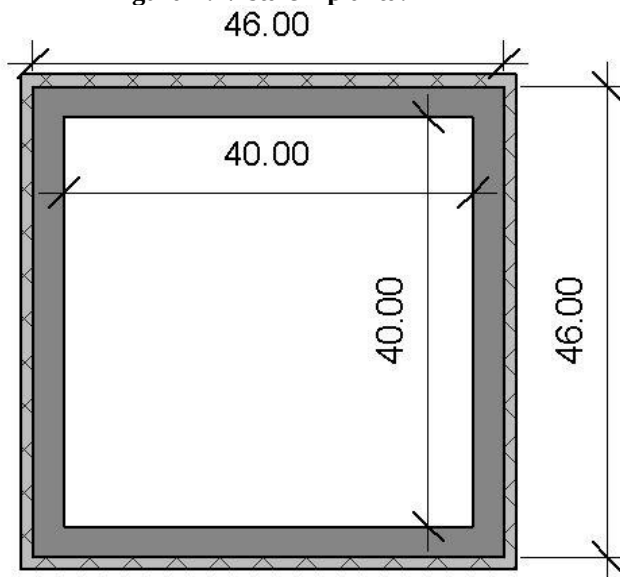
O fluxograma 1 mostra resumidamente como prosseguiu a metodologia da pesquisa.

**Fluxograma 1**



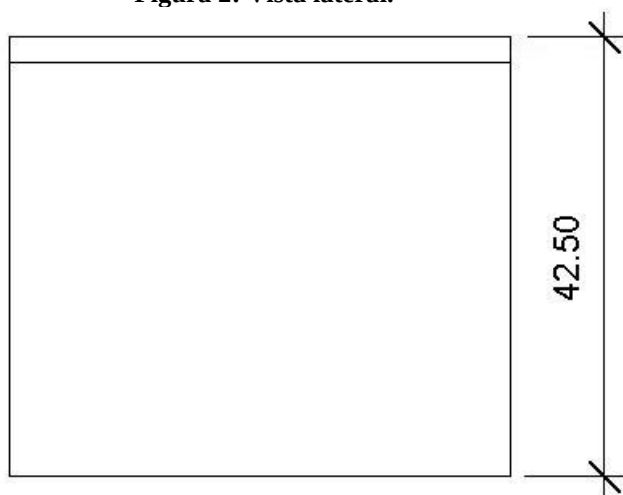
Antes de tudo foi feito um projeto, especificando as dimensões e materiais que seriam utilizados na confecção da caixa. Nas figuras 1, 2 e 3 é mostrado em detalhes as medidas de projeto, cotadas em centímetros.

**Figura 1: Vista em planta.**



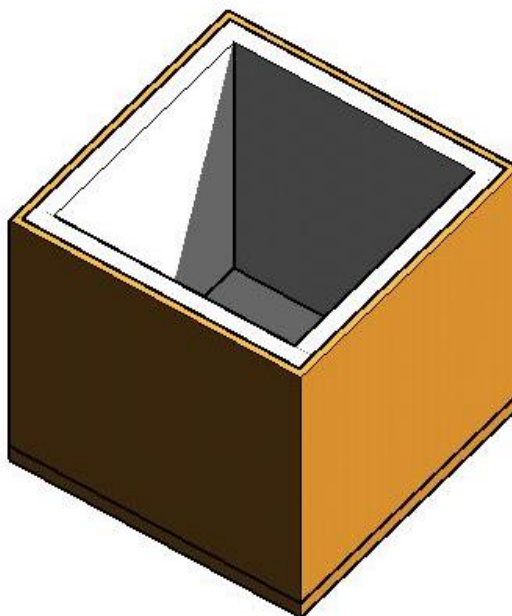
**Fonte:** autor (2018).

**Figura 2: Vista lateral.**



**Fonte:** autor (2018).

**Figura 3: Modelo 3D da caixa, em vista sem tampa.**



**Fonte:** autor (2018).

A caixa é composta pelos seguintes materiais: Madeira compensada, EPS de 30mm e papel alumínio. A disposição desses materiais segue essa mesma sequência, de fora para o interior de caixa.

A camada externa de madeira foi montada por um marceneiro da cidade de Pau dos Ferros, onde com supervisão e auxílio do projeto foi fiel as medidas e qualidade dos materiais utilizados.

As figuras 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 mostram etapas da confecção da caixa térmica.

**Figura 4: Camada externa de madeira sem tampa.**



**Fonte:** autor (2018).

**Figura 5: Camada externa de madeira com tampa.**



**Fonte:** autor (2018).

Após a camada externa de madeira estar confeccionada, o próximo passo foi colocar uma camada de isopor de 30 mm, no interior da caixa, para que assim o isolamento térmico fosse mais efetivo.

**Figura 6: Montagem das placas de isopor laterais.**



**Fonte:** autor (2018).

**Figura 7: Placas laterais e de fundo prontas.**



**Fonte:** autor (2018).

**Figura 8: Montagem de placa de isopor na tampa, sem acabamento.**



**Fonte:** autor (2018).

**Figura 9: Montagem de placa de isopor na tampa, com acabamento.**



**Fonte:** autor (2018).

Após essa etapa, foi colocado as folhas de papel alumínio para auxiliar ainda mais no isolamento térmico.

**Figura 10: Assentamento das folhas de papel alumínio.**



**Fonte:** Autor (2018).

Posteriormente foi escolhido um traço, para os experimentos, como também o tipo de cimento de acordo com pesquisa feita no comércio local, foi identificado o cimento mais utilizado na região como sendo o cimento Portland CP-II-Z, para uma maior contribuição dos resultados, visto a possibilidade que esse trabalho possa servir de base para cuidados tecnológicos em concretagens, foi utilizado o traço em volume de 1:2:3, onde os materiais do traço são respectivamente cimento, areia e brita, com consumo de cimento de 300 quilograma, por metro cúbico.

O motivo do uso do traço citado é que dentro UFRSA, Campus Pau do Ferros, estavam sendo utilizados traços de igual dosagem para concretar a fundação do bloco de salas C (Figura 12), com isso poderíamos contribuir para dar maior garantia da qualidade do concreto. Após definirmos o traço, fizemos ensaios de caracterização do material, junto a esses foram confeccionados 3 corpos de prova, mostrados na Figura 11.

**Figura 11: Corpos de prova.**



**Fonte:** Autor (2018).

**Figura 12: Canteiro de Obras, bloco C.**



**Fonte:** Autor (2018).

As medições de temperatura foram realizadas utilizando o termômetro digital MT-455, associado a um termopar tipo K, uma das pontas do termopar foi fixado no centro da caixa, com auxílio de cordões, Figuras 13, 14 e 15.

**Figura 13: Cordões de auxílio para o termopar.**



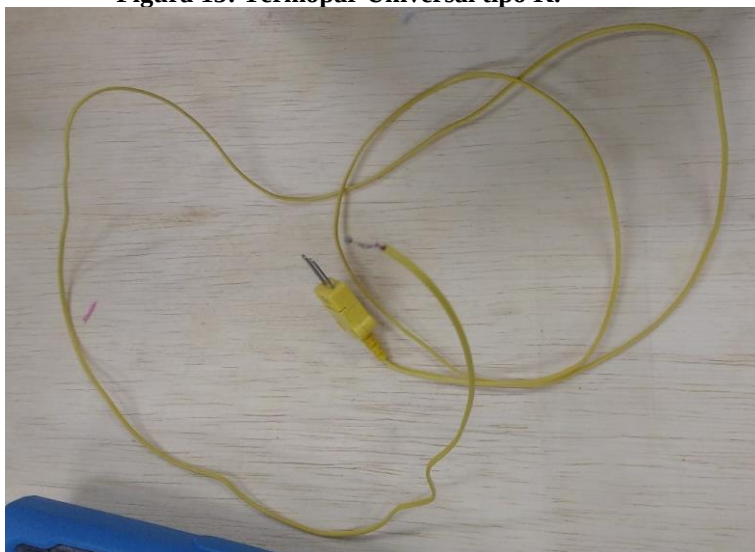
**Fonte:** Autor (2018).

**Figura 14: Termômetro digital MT-455**



**Fonte:** Autor (2018).

**Figura 15: Termopar Universal tipo K.**



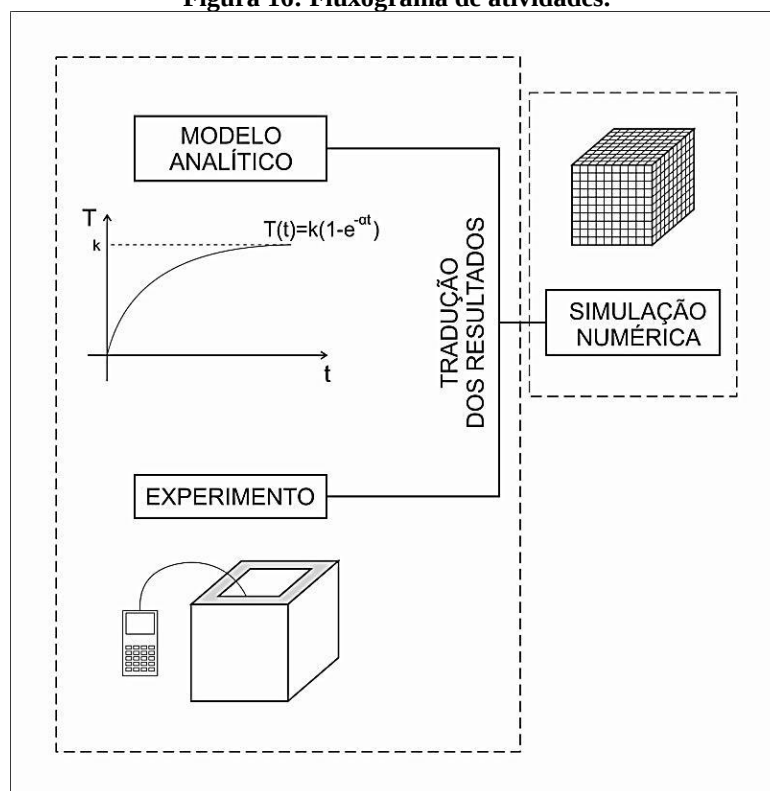
**Fonte:** Autor (2018).

Terminada a confecção do calorímetro artesanal foi feito a concretagem e as medições de temperatura, tomado os resultados e analisados.

Em seguida foi usado uma metodologia quantitativa, para analisar de forma comparativa os resultados colhidos pelos equipamentos, para essa comparação foram gerados gráficos que facilitam a análise e o entendimento.

A sequência é ilustrada resumidamente na Figura 16, mostrando como foi desenvolvido este projeto e como será continuado a pesquisa. Nesse primeiro momento, será feito a modelagem analítica e realizado o experimento e em seguida a tradução dos resultados, para trabalhos subsequentes será elaborado uma simulação numérica a fim de que os resultados desse trabalho sejam ampliados para casos mais reais.

**Figura 16: Fluxograma de atividades.**



**Fonte:** Autor (2018).

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Em grandes concretagens é de fundamental importância o estudo da variação de temperatura do concreto, para que assim seja evitada a fissuração. Um exemplo de grande concretagem são as bases de torres eólicas, que podem ser feitas com sapatas, ou com estacas. Na Figura 17 é apresentada a concretagem de fundação de uma torre eólica na cidade de João Câmara; o volume de concreto utilizado foi de 400m<sup>3</sup>. Sem controle da evolução de calor no interior da peça nas primeiras idades, devido a essa negligência podem surgir fissuras que comprometam a vida útil da fundação. Não há conhecimento sobre mais cuidados tomados na concretagem desta fundação.

**Figura 17: Concretagem de fundação de torre eólica.**



**Fonte:** <http://piniweb17.pini.com.br/construcao/tecnologia-materiais/parque-eolico-235222-1.aspx>

Os cimentos do tipo Portland CP IV (Pozolânico) e os cimentos de escória de alto forno (CP III) são os cimentos que apresentam o menor calor de hidratação, logo são os preferíveis para a produção do concreto massa (ABCP, 2013). Como exemplo, foi utilizado na concretagem das bases das torres do parque eólico de Casa Nova, na Bahia, o cimento CP IV-32 RS MIZU.

Por motivo dessas grandes concretagens e levando em consideração os problemas provocados por fissurações no concreto massa, surge a importância da investigação do fenômeno da variação de temperatura não só em estruturas de grande porte, mas também em estruturas que demandem grande consumo de cimento, como é o caso de fundações das bases de torres eólicas, que consomem em média  $305\text{kg/m}^3$  de cimento.

O ensaio para se determinar a geração de calor no concreto é feito por um equipamento chamado calorímetro, que usa processos adiabáticos para verificar a geração de calor ao longo do tempo. Existem dificuldades inerentes na realização deste ensaio, principalmente pela questão da aparelhagem utilizada que tem elevado preço, dificultando o acesso. Por esse motivo, será feito nesse trabalho ensaios em um calorímetro confeccionado de forma artesanal com materiais que são comumente encontrados em centros urbanos. Logo após, serão analisados os resultados.

Serão calibradas leis de geração de calor para futuras simulações numéricas, o que permitirão que os resultados sejam extrapolados para peças estruturais com maiores volumes e com diferentes isolamentos térmicos em suas faces.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

As obras que utilizam concreto massa normalmente tem custos muito elevados e caso aconteça sua ruptura provocam grandes desastres. Logo torna-se indispensável a investigação a fim prevenir possíveis falhas nessas estruturas.

Segundo Fairbairn et al. (2003) grandes estruturas de concreto podem estar sujeitas a fissurações em suas primeiras idades provocada por tensões térmicas e a indução da retração autógena. Existem algumas formas de se prevenir essas fissuras que tentam reduzir os efeitos térmicos na reação de hidratação do cimento Portland. Desses métodos, podemos citar:

- Controlar a espessura das camadas e o intervalo de tempo entre as camadas para permitir a dissipação do calor;
- Escolha de um material capaz de reduzir a reação de hidratação do cimento e as tensões de retração autógena;
- Redução da temperatura de lançamento do concreto ou fazer uso dos tubos de resfriamento.

O principal aspecto do concreto massa é seu comportamento térmico. Os projetos para esses tipos de estruturas buscam evitar o aparecimento de fissuras. É de conhecimento que o concreto massa tem restrições, que podem ser de origem interna ou externa. Para grandes concretagens a restrição mais relevante é a interna, devido a hidratação do cimento.

Segundo o International Commission on Large Dams (2009) o concreto massa difere do concreto estrutural, assim que é lançado em locais onde suas dimensões fazem com que suas seções fiquem com grandes espessuras, no qual o calor de hidratação dissipa lentamente e o gradiente térmico pode induzir aberturas no concreto.

Para uma melhor análise e entendimento do processo de fissuração do concreto massa, é necessário conhecer as propriedades físicas e mecânicas do concreto.

- Resistência a compressão: Segundo Metha Monteiro (2008), a resistência a compressão depende de vários fatores que influenciam na porosidade do concreto. Dentre esses fatores podemos destacar, a relação água/cimento, o teor de ar incorporado, a característica do agregado, o tipo de cimento utilizado para confeccionar o concreto, as condições de cura, o uso de aditivos e a evolução da idade de hidratação do concreto.

No Brasil, geralmente, é usado para ensaios de compressão, a utilização de corpos de provas cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, e a idade de referência de 28 dias, pois com o aumento da idade o concreto endurecido vai aumentando a resistência a esforços mecânicos e aos 28 dias de idade já adquiriu cerca de 75 a 90% de sua resistência total. É na

resistência mecânica apresentada pelo concreto endurecido 28 dias após a sua execução que se baseia o cálculo dos elementos de concreto.

- Resistência a tração: A resistência a tração está ligada a alguns fatores, como a aderência do agregado com a argamassa (ALMEIDA (2002)). Para o estudo da resistência a tração existem alguns ensaios, os mais conhecidos são, ensaio de tração direta, ensaio de tração por compressão diametral (NBR 7222 (2011)) e Tração por flexão, normatizada pela norma NBR 12142 de 2010.

## 2.1 CALOR DE HIDRATAÇÃO NO CONCRETO

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, em sua composição o seu principal componente é o clínquer, que por sua vez é constituído predominantemente por aluminatos e silicatos. Os aluminatos apresentam-se na forma  $C_3A$  e o  $C_4AF$  e os silicatos se apresentam na forma  $C_3S$  e  $C_2S$ . O processo de hidratação do cimento Portland se divide basicamente na hidratação dos aluminatos e silicatos, e nada mais são do que reações químicas que ocorrem entre os compostos anidros e a água. Essas reações simultaneamente, porém em velocidades diferentes e originam compostos resistentes e estáveis.

A hidratação de cada componente do cimento interfere de maneira distinta no processo de formação da pasta de cimento. Por exemplo, os primeiros a se hidratarem são os aluminatos, devido a isso, interferem diretamente no processo de pega, dando início ao enrijecimento da pasta de cimento, provocando a perda da trabalhabilidade. Os silicatos formam cerca de 75% do cimento Portland, esse grupo é responsável pelo desenvolvimento da resistência que se inicia ao término do processo de pega (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Segundo Neville (1997) e Odler (1991 apud CENTURIONE; KIHARA, 2005), a velocidade de hidratação inicial de cada composto é proporcional à área específica do cimento, ou seja, a velocidade de hidratação irá variar dependendo do quanto maior for a área específica de um composto.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) é o primeiro composto do cimento Portland a se hidratar, a reação com a água é imediata e o processo de pega é instantâneo. Para retardar esse processo é utilizado sulfato de cálcio (gesso) como atenuador da pega do cimento. É importante que a quantidade de gesso deve ser especificada de acordo com o tipo de cimento a ser utilizado, pois além do efeito retardador sobre os aluminatos, o gesso também produz um efeito acelerador na hidratação dos silicatos.

Em síntese, diversos autores (NEVILLE, 1997, SCANDIUZZI; ANDRIOLO, 1986; AITICIN, 2000; COUTINHO, 2006;) confirmam que dos processos de hidratação dos silicatos

tricálcico ( $C_3S$ ) e dicálcico ( $C_2S$ ) resultam os compostos portlandita ( $Ca(OH)_2$ ) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sendo este último o que mais contribui para o desenvolvimento da resistência mecânica do cimento.

Aiticin (2000, p.363) acrescenta ainda que:

[...] o  $C_3A$ , na presença do sulfato de cálcio e da água, é transformado em etringita,  $C_3A.CaSO_4.32H_2O$ , e mais tarde no monossulfoaluminato  $C_3A.CaSO_4.12H_2O$ , quando não existir mais sulfato de cálcio. Quanto ao  $C_4AF$ , ele sempre se hidrata como  $C_3A$ , porém mais lentamente.

Assim, logo que os compostos do cimento entraram em contato com a água é gerada uma reação exotérmica, ou seja, ocorre uma liberação de energia na forma de calor, para esse fenômeno é dado o nome de calor de hidratação. Nos elementos estruturais delgados, ou seja, que tem menor espessura, há maior facilidade de dissipação deste calor para o ambiente devido ao menor caminho a percorrer, principalmente por condução na peça. Já em peças de grandes volumes como blocos de fundação de torres eólicas essa facilidade não ocorre, pois são longas as distâncias entre o núcleo e a superfície do material. Toda essa energia liberada em forma de calor tem como resultado um aumento da temperatura do concreto. A quantidade de calor liberado no cimento irá depender da quantidade de cada composto presente no preparo do cimento Portland, ou seja, para cada tipo de cimento Portland existirá um potencial de geração de calor diferente. Na tabela abaixo, segundo Verbeck e Foster (1950 apud COUTINHO, 2006) é apresentado o aumento progressivo dos valores do calor de hidratação de cada composto em diferentes idades.

**Tabela 1: Valores do calor de hidratação (a 21°C) dos principais compostos do cimento Portland, em calorias por grama.**

| Compostos (cal/g) | 3 dias       | 7 dias       | 28 dias      | 90 dias      | 1 ano        | 6,5 anos     |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $C_3S$            | $58 \pm 8$   | $53 \pm 11$  | $90 \pm 7$   | $104 \pm 5$  | $117 \pm 7$  | $117 \pm 7$  |
| $C_2S$            | $12 \pm 5$   | $10 \pm 7$   | $25 \pm 4$   | $42 \pm 3$   | $54 \pm 4$   | $53 \pm 5$   |
| $C_3A$            | $212 \pm 28$ | $372 \pm 39$ | $329 \pm 23$ | $311 \pm 17$ | $279 \pm 23$ | $328 \pm 25$ |
| $C_4AF$           | $69 \pm 27$  | $118 \pm 37$ | $118 \pm 22$ | $98 \pm 16$  | $90 \pm 22$  | $111 \pm 24$ |

Observa-se nos dados aludidos na Tabela 1, uma ausência na continuidade do aumento gradativo dos valores do calor de hidratação de cada composto do cimento Portland em diferentes idades apresentadas, esse fato é justificado devido a margem de erro exibida nas medidas do calor de hidratação de cada composto.

Neville (1997), a Tabela 2, mostra alguns valores típicos do calor de hidratação nos compostos aproximadamente puros.

**Tabela 2: Calor de hidratação de compostos puros, em J/g.**

| Composto (J/g)      | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>3</sub> AF |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Calor de Hidratação | 502              | 260              | 867              | 419               |

Fonte: Neville, 1997.

Logo se fizemos uma transformação de unidade (considerando  $1\text{cal} = 4,18\text{J}$ ), dos valores apresentados na Tabela 2, obtemos a comparação entre os valores totais aproximados para o calor de hidratação dos compostos do cimento Portland, apresentados por Coutinho (2006) e Neville (1997), como mostra a Tabela 3 abaixo.

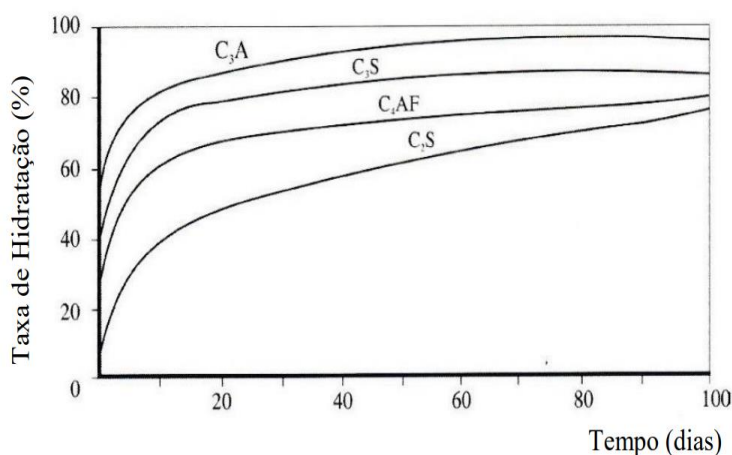
**Tabela 3: Comparação entre os valores de calor de hidratação dos compostos do cimento Portland apresentados por Coutinho (2006) e Neville (1997), em cal/g.**

| Compostos (cal/g) | Neville (1997) | Coutinho (2006) |
|-------------------|----------------|-----------------|
| C <sub>3</sub> S  | 120            | $117 \pm 7$     |
| C <sub>2</sub> S  | 62             | $54 \pm 4$      |
| C <sub>3</sub> A  | 207            | $279 \pm 23$    |
| C <sub>3</sub> AF | 100            | $90 \pm 22$     |

Fontes: Verbeck e Foster, (1950 apud COUTINHO, 2006) e Neville (1997).

Segundo Neville (1997), o valor total do calor liberado, em uma razoável aproximação, podendo ser obtido pela soma dos valores do calor liberado por cada composto hidratado isoladamente. Esses processos de liberação de calor dos compostos do cimento também podem ser representados pela taxa de liberação de calor em função do tempo, conforme é mostrado na Figura 18.

**Figura 18: Taxa de liberação de calor em função do tempo.**



Desse modo, ao analisar os dados apresentados na Tabela 3 e na Figura 18 pode-se observar que o aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) é o componente do cimento Portland que mais libera calor, seguido do silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), portanto são constituintes importantes e que possuem influência direta na velocidade de hidratação. Logo, é importante que se analise a proporção que cada componente irá ter no cimento.

Ainda com base nos dados supracitados e corroborando com Bougue (1955 apud NEVILLE, 1997), podemos observar que metade do calor total dos cimentos Portland de uso corrente são liberados até o terceiro dia, aproximadamente 75% até o sétimo dia e entre 83% a 91% do total em seis meses.

## 2.2 TENSÕES TÉRMICAS

As reações de hidratação dos compostos do cimento induzem a um aumento de temperatura nos primeiros dias; ao alcançar o pico máximo de temperatura, o concreto tende a se estabilizar com a temperatura ambiente, gerando tensões térmicas de tração que resultam na fissuração e, eventualmente, na perda de monoliticidade da estrutura.

A deformabilidade térmica das estruturas de concreto depende de vários fatores como o coeficiente de dilatação térmica do material, como também o gradiente térmico a que estarão submetidas. Em peças estruturais finas de concreto as mudanças de temperatura pouco influenciam, já as peças estruturais de grande porte são acometidas com maior intensidade por essas mudanças, pela grande influência do calor de hidratação associada à baixa quantidade de dissipação de calor, propriedades do concreto massa.

A análise das tensões pode ser realizada através de um método numérico de resolução direta da Equação 2.1, levando em consideração o comportamento viscoelástico linear com envelhecimento do concreto, e com emprego do modelo logarítmico para descrever o efeito da fluência do concreto. Admitindo a aplicabilidade do princípio da superposição de Boltzmann-

McHenry, a equação constitutiva do modelo viscoelástico linear com envelhecimento do concreto, apresenta-se da seguinte forma (GAMBALE, et al., 2011)

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t f(z, t - z) \cdot \sigma \text{ para } (t \geq z) \quad (2.1)$$

onde  $\varepsilon(t)$  é a história das deformações de origem térmica.

A resolução numérica da equação 2.1 pode ser feita da seguinte forma:

$$\varepsilon_j = \sum_{i=1}^j f_{ij} \cdot \Delta\sigma_i, \text{ para } (t \leq z) \quad (2.2)$$

Pode-se ainda representar a equação 2.2 na forma matricial:

$$[\varepsilon_j] = [f_{ij}] \cdot [\Delta\sigma_j] \quad (2.3)$$

onde  $[\varepsilon_j]$  = o vetor (n) de deformações de origem térmica =  $\alpha \cdot \delta T = \alpha \cdot (T_i - T_l)$ ;

$[f_{ij}]$  = matriz (n,n) cujo elemento da linha  $j$  e da coluna  $i < j$  é respectivamente a fluência do concreto na idade  $t_j$ , com seu nascimento na idade  $z_i$ .

Para se determinar a origem térmica, podemos isolar a parcela  $\Delta\sigma$  na idade  $t_j$  da seguinte forma:

$$[\Delta\sigma_j] = [f_{ij}]^{-1} \cdot [\varepsilon_j] \quad (2.4)$$

Fazendo a superposição das tensões ( $\sigma$ ) nos leva ao cálculo das tensões em qualquer tempo  $t_n$ :

$$\sigma(t_n) = \sum_{j=1}^n \Delta\sigma_j \quad (2.5)$$

## 2.3 AUMENTO ADIABÁTICO DE TEMPERATURA

A relação entre volume e superfície do concreto, favorece o aumento adiabático de temperatura, quanto maior for essa relação maior será facilidade de dissipação de calor, já quanto menor for a relação entre volume e superfície menor será a dissipação de calor,

favorecendo o aumento da temperatura, ou seja, no concreto massa provavelmente apresentará valores expressivos de aumento adiabático de temperatura.

Cimentos Portland finamente moídos ou cimentos com teores de  $C_3A$  e  $C_3S$  relativamente altos apresentam calores de hidratação superiores aos dos cimentos mais grossos ou cimentos com baixos teores de  $C_3A$  e  $C_3S$ , consequentemente geram um maior gradiente adiabático da temperatura.

## 2.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO MASSA

Para entender como funciona o gradiente de temperatura no concreto é necessário ter o conhecimento das propriedades térmicas do concreto. O estudo da massa, do calor específico, da condutividade e da difusividade térmica são importantes para o desenvolvimento de gradientes de temperatura, deformações térmicas, empenamento e fissuração nas primeiras idades do concreto e também para a isolamento térmica proporcionada pelo serviço do concreto. A seguir apresentam-se algumas definições resumidamente:

a) **CONDUTIVIDADE TÉRMICA ( $k$ )** - capacidade de o material conduzir calor, é definido como a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura. A condutividade térmica depende da composição do concreto e o aumento da umidade também eleva o seu valor (Neville, 1997). Mehta e Monteiro (2008) diz que a condutividade térmica fornece o fluxo de calor transmitido através de uma unidade de área de um material sob uma unidade de gradiente de temperatura unitária. É influenciada pelas características mineralógicas do agregado e pelo teor de umidade, densidade e temperatura do concreto.

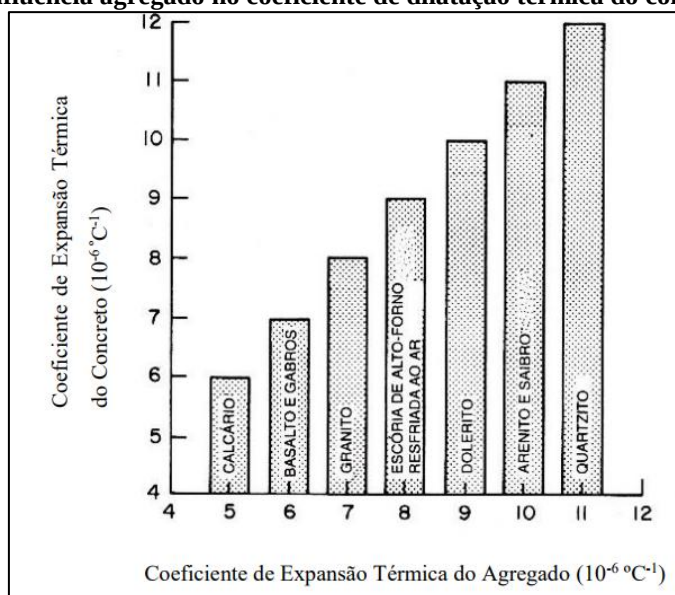
b) **COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA ( $\alpha$ )**- O coeficiente de dilatação térmica é definido como sendo o quanto de variação linear ocorre em um comprimento unitário devido a uma variação unitária de temperatura. O coeficiente de dilatação térmica tem sua grandeza diretamente proporcional às variações volumétricas decorrentes de gradientes térmicos que a estrutura possa chegar a ter. E somado com a propriedade de capacidade de deformação, pode-se definir limites de gradientes de temperatura, cuja possível extrapolação pode ter como consequência a fissuração do concreto, logo é um dos parâmetros que definem as tensões de tração na fase de resfriamento do maciço de concreto massa (FURNAS, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Segundo L'Hermite (1962 apud FURNAS, 1997), a estimativa do coeficiente de dilatação térmica do concreto pode ser encontrada através da equação abaixo, conhecendo-se as propriedades dos componentes do concreto. Já segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) adota o valor do coeficiente de dilatação térmica como sendo  $1 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  em análises estruturais.

$$\alpha = \frac{p \cdot E_q \cdot V_p + a \cdot E_a \cdot V_a}{E_q \cdot V_p + E_a \cdot V_a} \quad (2.6)$$

Dentre os vários fatores que influenciam no coeficiente de dilatação térmica, está o tipo do agregado. A influência do agregado na composição do coeficiente de expansão térmica do concreto é considerável, pois é perceptível a sua parcela majoritária no volume da mistura do concreto, logo, quando houver opções de escolha com antecedência dos materiais, deve-se priorizar por um agregado cujo coeficiente de dilatação térmica seja o menor possível para obtenção de concretos menos instáveis. Abaixo é mostrado alguns valores de dilatação térmica para diferentes tipos litológicos de agregado.

**Figura 19: Influência agregado no coeficiente de dilatação térmica do concreto.**



**Fonte:** Mehta e Monteiro, 1994.

c) **CALOR ESPECÍFICO ( $c$ )** - é um parâmetro físico que expressa a capacidade de um material armazenar calor. O calor específico corresponde à quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa. Valores típicos do calor específico para concretos normais estão 0,27-0,31 kcal / kg·°C, de acordo com a JCI, e 0,22-0,24 kcal / kg·°C, de acordo com o ACI 207.2R-07. Os valores específicos que serão adotados nesta análise são 0,23 kcal / kg·°C.

Dentre os vários fatores que influenciam a temperatura, o calor específico é o que mais contribui para esse aumento. Porém, devido ao problema de se determinar o calor específico em qualquer temperatura, é necessário medir o calor cedido e a temperatura em intervalos frequentes e calcular o calor específico médio para cada intervalo (FURNAS, 1997).

d) **MASSA ESPECÍFICA ( $\rho$ )** – A massa específica é a relação entre a massa de um corpo sobre o volume que esse mesmo corpo ocupa. Desta forma pode-se dizer que a densidade mede o grau de concentração de massa em determinado volume. É influenciada pelo teor de água e de finos, pelos agregados utilizados e pelo índice de vazios. Quanto menor a quantidade de água e teor de pasta na mistura maior será a massa específica.

## 2.5 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO CONCRETO MASSA

As formulações matemáticas para distribuição de temperatura no concreto massa em situações práticas podem ser bastante úteis para inibição do problema do calor de hidratação, onde seria possível determinar previamente o gradiente térmico gerado, para essa análise é adaptada uma simplificação de forma adiabática para elaborações de equações.

Desenvolvida por Fourier, a equação fundamental de distribuição de temperatura em um elemento sólido submetido à geração interna de calor é a base para todo o desenvolvimento e determinação da equação que representa a distribuição de temperatura no concreto massa. A soma da mudança de fluxo de calor nas direções x, y e z, adotando k como coeficiente de condutividade e um material homogêneo é apresentada da seguinte forma:

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dx dy dz \quad (2.7)$$

onde:

$T$  = temperatura;

$k$  = condutividade térmica;

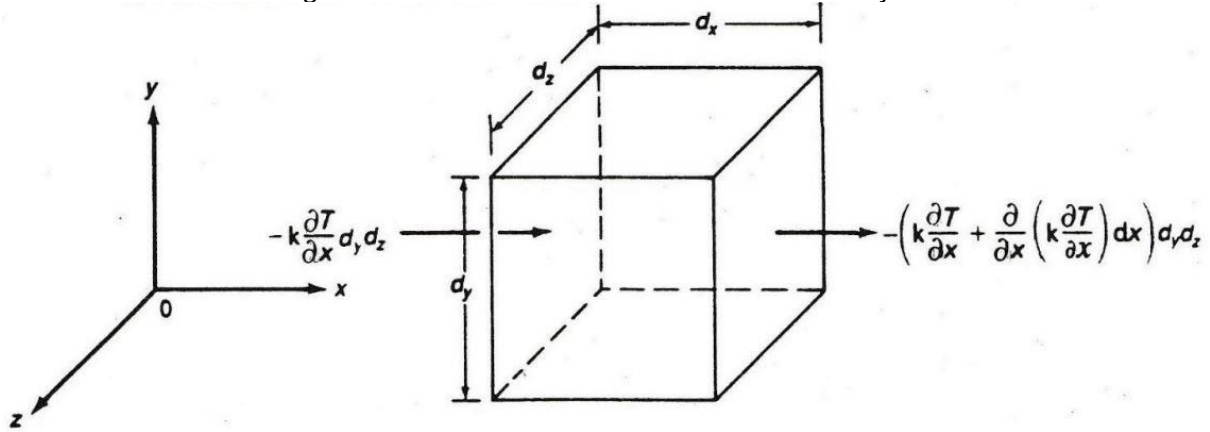
$x$  = direção do eixo X;

$y$  = direção do eixo Y;

$z$  = direção do eixo Z.

A figura 20 representa um elemento apenas na direção x utilizado para a formulação do fluxo.

Figura 20: Elemento infinitesimal com fluxo na direção x



Fonte: Mehta e Monteiro, 1994

Para um material que tenha massa específica ( $\rho$ ) e o calor específico ( $c$ ), o aumento de energia interna do elemento é dado por:

$$\rho c dx dy dz \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

Existindo geração de calor dentro do material, a Equação (2.7) e somada à quantidade de calor gerada no interior do elemento ( $w$ ) por unidade de tempo, pode ser igualada ao incremento de energia interna do elemento:

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + w = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

onde,

$w$  = quantidade de calor gerado no interior do elemento;

Logo reescrevendo-se a Equação (2.9) de maneira resumida:

$$k \nabla^2 T + w = \rho c T \quad (2.10)$$

Para regime permanente,  $T$  e  $w$  não são função do tempo, consequentemente tem-se da Equação (2.11):

$$k \nabla^2 T + w = 0 \quad (2.11)$$

Para a determinação da quantidade de calor gerada no interior do elemento ( $w$ ), considera-se um concreto com massa específica ( $\rho$ ) e um consumo de cimento ( $\beta$ ), a relação entre a elevação de temperatura adiabática ( $T_a$ ) e o calor de hidratação ( $Q_h$ ). Após algumas deduções matemáticas pode-se chegar na Equação 2.12.

$$w = \rho c \frac{dT_a}{dt} \quad (2.12)$$

onde:

$T_a$  = elevação da temperatura adiabática.

## 2.6 DESENVOLVIMENTO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

Um dos estudos mais recentes, sobre a barragem de Três Gargantas na China, realizado por Liu et al., (2010) afirma que o calor desenvolvido pela hidratação do cimento pode ser representado pela equação 2.13, obtida por meio de dados experimentais levando em consideração a temperatura adiabática em diferentes idades do concreto.

$$\dot{q} = q_i(1 - e^{\alpha t^\beta}) \quad (2.13)$$

Onde:

$\dot{q}$  = calor de hidratação;

$q_i, \alpha, \beta$  = constantes obtidas experimentalmente (calibração); dependem da composição do cimento; sendo  $q_i$  o calor inicial do concreto.

Para diferentes valores de resistência (em MPa) os autores elaboraram a tabela abaixo com os parâmetros da Equação 2.13:

**Tabela 4: Coeficientes da equação 14 de aumento da temperatura adiabática dos concretos usados na represa de Três Gargantas.**

| Concreto | $q_i(^{\circ}\text{C})$ | $\alpha$ | $\beta$ |
|----------|-------------------------|----------|---------|
| C15      | 19,51                   | 0,0900   | 0,1287  |
| C20      | 21,31                   | 0,2282   | 0,977   |

|            |       |        |       |
|------------|-------|--------|-------|
| <b>C25</b> | 23,51 | 0,3190 | 0,849 |
| <b>C30</b> | 27,83 | 0,3542 | 0,908 |

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), para a distribuição do calor no concreto massa, a geração de calor,  $\dot{q}$ , é associada à elevação de temperatura adiabática,  $T_a$ . Tendo esse concreto um consumo de cimento  $C_c$ , um calor específico  $c$  e também massa específica  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ), a relação entre a temperatura adiabática e o calor interno gerado pelo concreto,  $Q$ , é dada pela equação 2.14:

$$T_a = \frac{C_c}{c\rho} Q \quad (2.14)$$

O calor interno criado pelo concreto,  $Q$ , é obtido por unidade de massa do cimento, logo, o fator  $\frac{C_c}{\rho}$  deve ser usado para calcular o calor de hidratação por unidade de massa do concreto.

Com isso, a taxa de geração de calor  $\dot{q}$ , pode ser expressa conforme a equação 2.15:

$$\dot{q} = C_c \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2.15)$$

Substituindo na equação 2.15, chega-se na equação 2.16:

$$\dot{q} = \rho c \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (2.16)$$

Com isso, caso a composição do concreto em massa for representada na proporção 1 (uma) parte de cimento,  $x$  partes de água,  $ar$  partes de areia e  $b$  partes de brita (traço= 1: $x$ : $ar$ : $b$ ), o aumento de temperatura sofrida pelo concreto, em regime adiabático, será dada pela equação 2.17:

$$\dot{q} = mc \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (2.17)$$

Onde :  $m = 1 + x + ar + b$

## 2.7 TAXAS INTERNAS DE GERAÇÃO DE CALOR DE CONCRETO

A distribuição de temperatura produzida no concreto pelo calor de hidratação são analisados utilizando condições de contorno, condições iniciais e geração de calor interna

adquirida pela Equação 2.13. Estes valores são obtidos a partir do tempo após a temperatura de colocação do concreto, o padrão de geração de calor depende exclusivamente do tempo.

A geração interna de calor pode ser calculada pelo aumento da temperatura adiabática (2.18) pois a temperatura perto do centro do concreto massa é aproximadamente igual à temperatura adiabática. A magnitude do aumento da temperatura adiabática e a forma da curva podem variar significativamente dependendo da mistura específica de concreto. A equação de aumento de temperatura adiabática é exibida como uma função exponencial sugerida por Sukiya.

$$T(t) = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (2.18)$$

Onde,

$T$  é a quantidade de aumento de temperatura adiabática no tempo ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\alpha$  é o coeficiente de aumento de temperatura (taxa de reação)

$K$  é a quantidade final do aumento de temperatura adiabático adquirido pelo teste ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t$  tempo (dia)

A quantidade total de geração de calor por unidade de volume pode ser obtida a partir da equação:

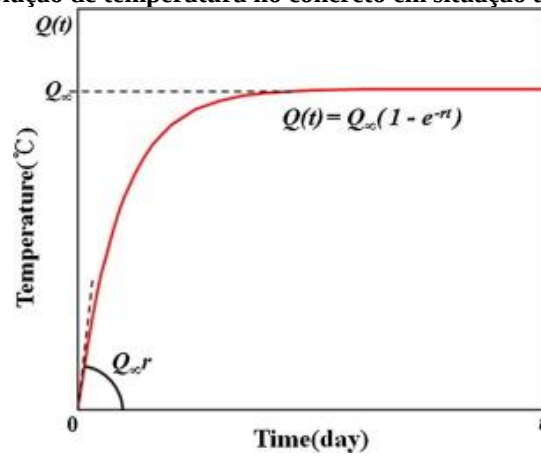
$$Q(t) = C_p \rho T(t) = K C_p (1 - e^{-\alpha t}) \quad (2.19)$$

Onde,

$C_p$  é o calor específico do concreto, ( $\text{Kcal} / \text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

Na figura 21 é representado um gráfico de desenvolvimento de temperatura no concreto massa.

Figura 21: Evolução de temperatura no concreto em situação adiabática



Fonte: Mehta e Monteiro, 1994.

### 3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A primeira etapa deste trabalho foi confeccionar a caixa para que nela fosse colocado o concreto e analisada a temperatura de maneira aproximadamente adiabática. Foi feito a caracterização dos materiais que foram utilizados no concreto.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

##### 3.1.1 MASSA ESPECÍFICA REAL E MASSA UNITÁRIA

São mostrados na Tabela 5 os valores obtidos no ensaio de massa específica e massa unitária.

**Tabela 5: Dados do ensaio de massa específica e massa unitária.**

| <b>Amostras</b> | <b>Massa específica<br/>real (kg/dm<sup>3</sup>)</b> | <b>Massa unitária<br/>(kg/dm<sup>3</sup>)</b> |
|-----------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Amostra 1       | 2,614                                                | 1,463                                         |
| Amostra 2       | 2,608                                                | 1,484                                         |
| <b>Média</b>    | <b>2,611</b>                                         | <b>1,473</b>                                  |

**Fonte:** Autor (2018).

##### 3.1.2 ENSAIO DE GRANULOMETRIA

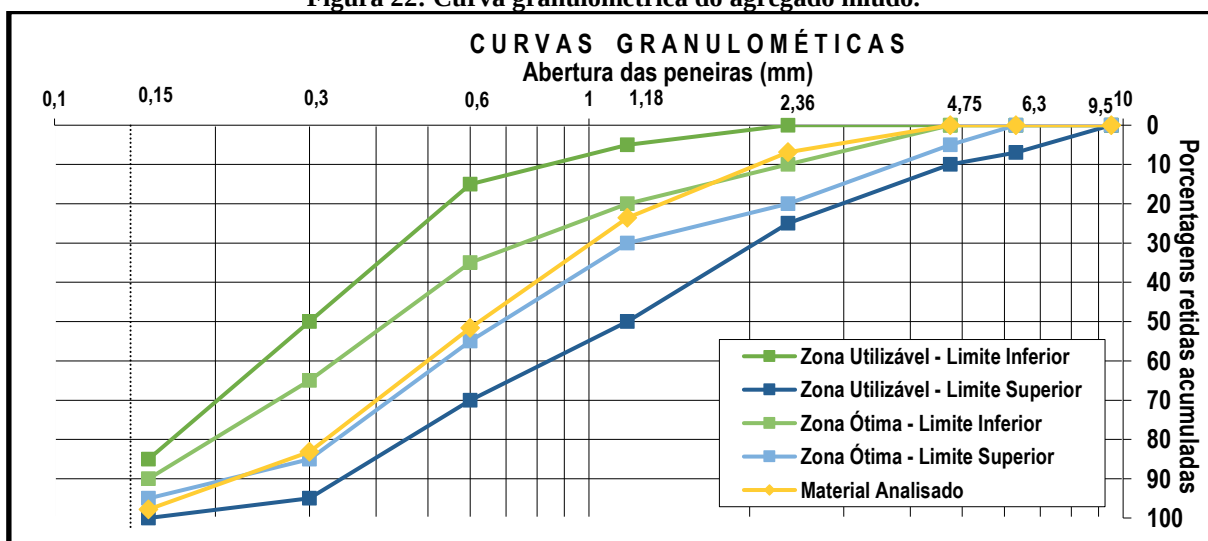
Na Tabela 6 é mostrado o resultado do ensaio de granulometria feito através de ensaio normatizado conforme a NBR NM 248/2003. Neste ensaio foi possível obter a composição granulométrica, o módulo de finura e a dimensão máxima do agregado miúdo.

**Tabela 6: Composição granulométrica do agregado miúdo.**

| <b>Abertura das<br/>peneiras (mm)</b> | <b>Massa retida (g)</b> |                  | <b>Percentagem média (%)</b> |                  |
|---------------------------------------|-------------------------|------------------|------------------------------|------------------|
|                                       | <b>Amostra 1</b>        | <b>Amostra 2</b> | <b>Retida</b>                | <b>Acumulada</b> |
| 9,5                                   | 0                       | 0                | 0                            | 0                |
| 6,3                                   | 0                       | 0                | 0                            | 0                |
| 4,75                                  | 0                       | 0                | 0                            | 0                |
| 2,36                                  | 32,6                    | 36,7             | 6,9                          | 6,9              |
| 1,18                                  | 81,8                    | 85,0             | 16,7                         | 23,6             |
| 0,6                                   | 144,0                   | 135,2            | 28,0                         | 51,6             |
| 0,3                                   | 159,9                   | 156,6            | 31,5                         | 83,2             |
| 0,15                                  | 70,9                    | 75,4             | 14,7                         | 97,8             |
| <0,15                                 | 10,8                    | 11,1             | 2,2                          | 100,0            |
| <b>TOTAL</b>                          | <b>500,0</b>            | <b>500,0</b>     | <b>100,0</b>                 |                  |

**Fonte:** Autor (2018).

Figura 22: Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Autor (2018).

No ensaio foi possível verificar que o agregado miúdo possui um módulo de finura igual 2,64 e um diâmetro máximo característico igual a 4,75 mm. Logo, segundo recomendações da NBR 7211/2009, que define o intervalo do módulo de finura da zona ótima entre os valores de 2,20 a 2,90, e observando o gráfico apresentado na Figura 22 é possível ver que a curva granulométrica do material analisado encontra-se dentro da faixa utilizável e quase inteiramente inserida na zona ótima, estabelece a norma.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

### 3.2.1 MASSA ESPECÍFICA REAL E MASSA UNITÁRIA

Na Tabela 7 verifica-se os valores médios correspondentes aos dois ensaios de massa específica. Foi constatado que o agregado graúdo apresentou uma massa específica real de 2,643 kg/dm<sup>3</sup> e uma massa unitária de 1,369 kg/dm<sup>3</sup>.

Tabela 7: Dados do ensaio de massa específica e massa unitária.

| Ensaio       | Massa específica real (kg/dm <sup>3</sup> ) | Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> ) |
|--------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| Amostra 1    | 2,642                                       | 1,367                                |
| Amostra 2    | 2,644                                       | 1,372                                |
| <b>Média</b> | <b>2,643</b>                                | <b>1,369</b>                         |

Fonte: Autor (2018).

### 3.2.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A Tabela 8 expõe a composição granulométrica do agregado graúdo empregado nas concretagens das fundações do bloco C. Os resultados a seguir foram alcançados com a realização do ensaio granulométrico.

**Tabela 8: Composição granulométrica do agregado graúdo.**

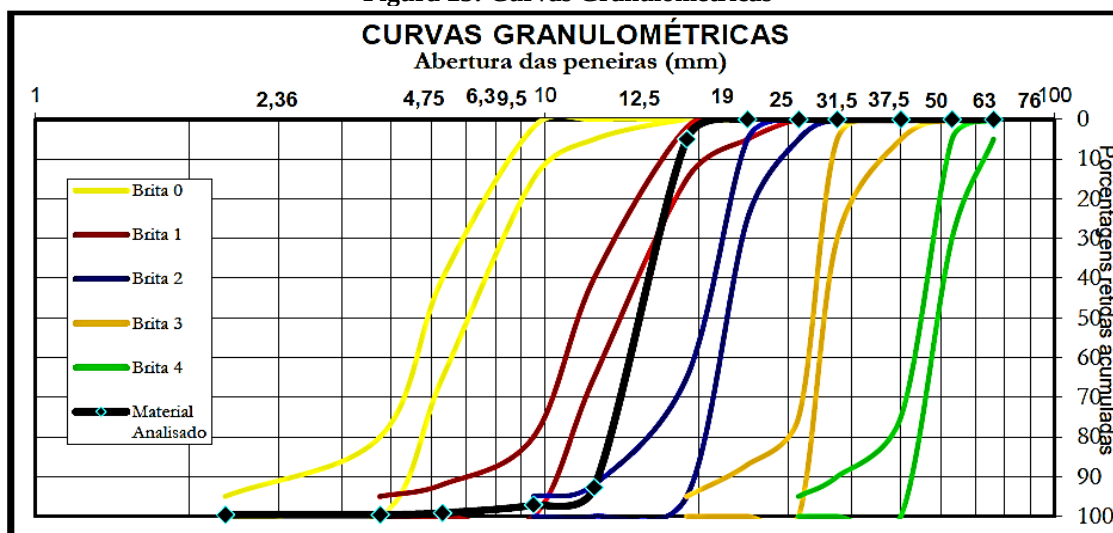
| Abertura das peneiras (mm) | Massa retida (g) |           | Percentagem média (%) |           |
|----------------------------|------------------|-----------|-----------------------|-----------|
|                            | Amostra 1        | Amostra 2 | Retida                | Acumulada |
| 19                         | 248,0            | 249,0     | 5,5                   | 5,4       |
| 9,5                        | 4577,0           | 4648,0    | 93,2                  | 96,2      |
| 6,3                        | 104,0            | 92,0      | 2,0                   | 99,5      |
| 4,75                       | 41,3             | 5,0       | 1,0                   | 99,8      |
| <4,75                      | 32,8             | 6,0       | 0,4                   | 100,0     |
| <b>TOTAL</b>               | 5000,0           | 5000,0    | 100,0                 |           |

Fonte: Autor (2018).

É necessário ressaltar que o laboratório de Engenharia Civil da UFERSA - CMPF não possui todas as peneiras necessárias para realização do ensaio, logo o ensaio foi executado apenas com as peneiras de 19mm, 9.5mm, 6.3mm e 4.7mm.

Além da composição granulométrica foi possível obter também, o módulo de finura e a dimensão máxima do agregado, com valores de 7,0 e 25 mm respectivamente. A Figura 23 exhibe a curva granulométrica, pode-se observar que a curva do material analisado se encontra em parte na zona 9,5/25, podendo ser classificado com base na NBR 7211/2009, como brita 1.

**Figura 23: Curvas Granulométricas**



Fonte: Autor (2018).

### 3.3 ANÁLISE DE TEMPERATURA

Após todo o processo de caracterização do material e confecção da caixa, foi preparado a concretagem, na execução foi verificado a temperatura do concreto e visto que estava a 33 °C, imediatamente após a leitura a caixa foi fechada, tomando cuidados para que a tampa encaixasse perfeitamente, com a tampa fechada foi verificado a temperatura a cada uma hora. Nas figuras a seguir (24 e 25) são ilustrados os momentos da concretagem e da primeira verificação da temperatura.

**Figura 24: Concretagem da caixa**



**Fonte:** Autor (2018).

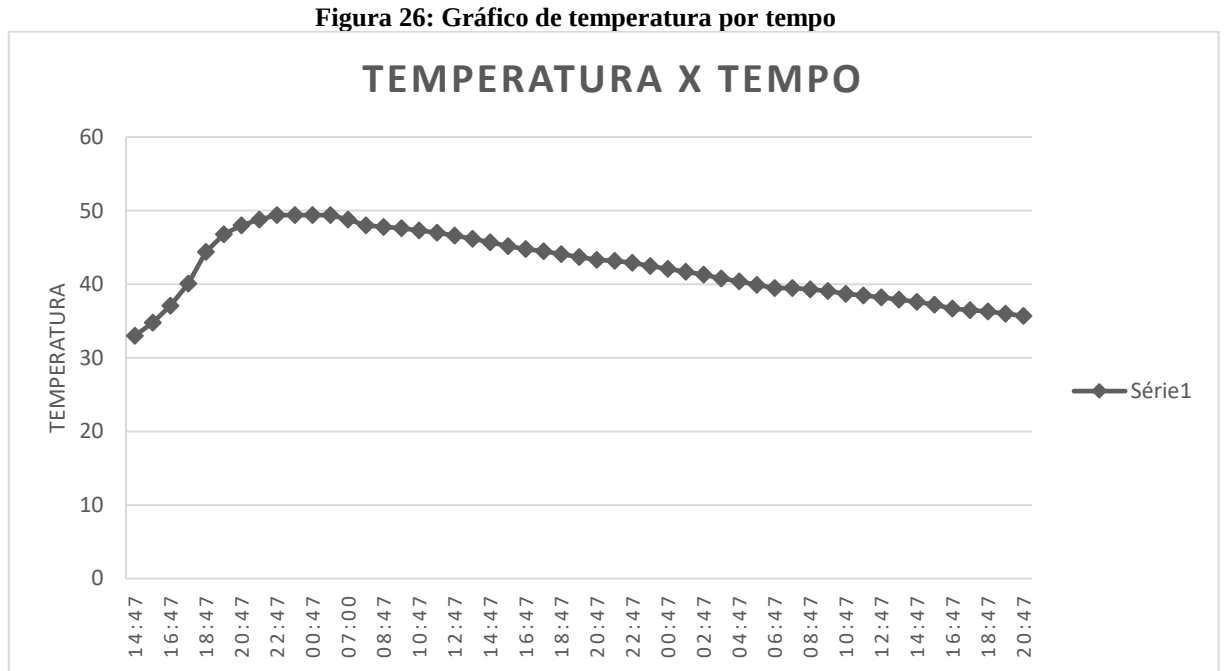
**Figura 25: Primeira aferição de temperatura**



**Fonte:** Autor (2018).

Nas primeiras horas foi possível observar um ganho de temperatura de forma rápida, até chegar a um pico de 49,4 °C, após decorrido oito horas da concretagem, essa temperatura se

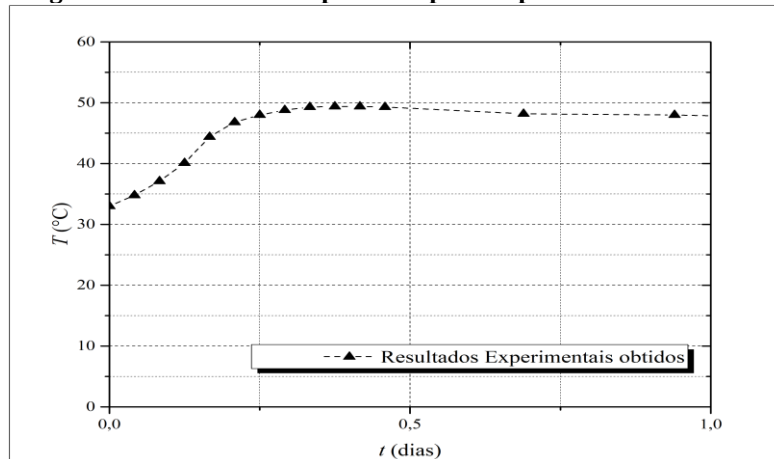
manteve constante por um período de tempo mostrado no gráfico, quando verificado novamente após algumas horas, foi visto que a temperatura havia diminuído um pouco, nas outras medições a temperatura caiu de forma aproximadamente constante, em uma taxa de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$  e  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ , o resultado da coleta desses dados é mostrado na Figura 26.



Fonte: Autor (2018).

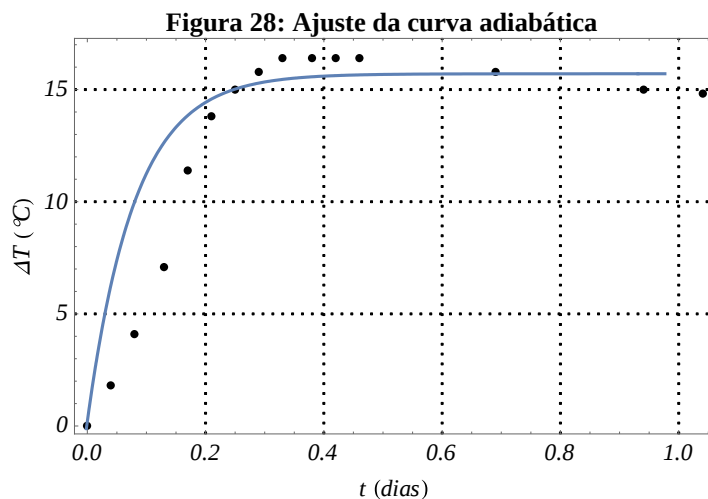
Com os valores de temperatura por tempo, e a ajuda de alguns softwares foi possível analisar de forma mais detalhada como decorreu o desenvolvimento da temperatura em um dia, mostrado na figura 27.

**Figura 27: Gráfico de temperatura por tempo em um dia**



Fonte: Autor (2018)

Com o auxílio do software Wolfram Matemática fizemos um ajuste da curva de acordo com a equação 2.18, considerando acréscimo de temperatura e tempo, posteriormente gerado um gráfico.

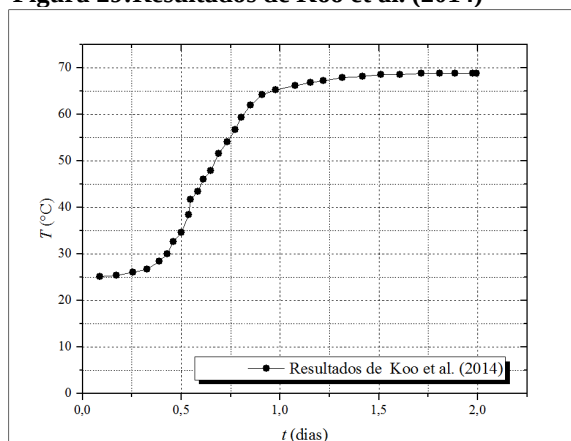


**Fonte:** Autor (2018)

O teor de cimento tem uma relação linear com o valor máximo de aumento de temperatura adiabático (K) e taxa de reação ( $\alpha$ ). A razão de aumento de temperatura da amostra com temperatura de colocação alcança 33°C rapidamente. A variável  $\alpha$  (taxa de reação) que mais se ajusta a curva da Figura 28 foi encontrado pelo método dos mínimos quadrados com o valor de 0,986234.

Quando comparado com os resultados de um artigo dos autores Kyung-Mo Koo, Gyu-Yong Kim, Jae-Kang Yoo e Eui-Bae Lee, publicado em um jornal indiano de nome, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Volume. 21, em outubro de 2014 foram considerados aceitáveis.

No artigo citado foi feita verificação de temperatura por tempo para analisar o calor de hidratação do cimento com variação de consumo de cimento, com temperatura ambiente variando entre 25 °C e 35 °C, a curva da figura 29, mostra o resultado experimental da curva  $W_b29 - S40$  que atingiu a temperatura máxima de 68,5 °C, quando aplicado em uma temperatura ambiente de 25 °C, e a mesma temperatura máxima quando aplicada com uma temperatura ambiente e 35 °C.

**Figura 29: Resultados de Koo et al. (2014)**

Fonte: KOO, Kyung-Mo et al. (2014)

### 3.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO AOS 28 DIAS

Foram feitos três corpos de prova com o mesmo concreto utilizado na análise dos dados de temperatura.

Foram utilizados moldes de  $10 \times 20 \text{ cm}$  para moldar os corpos de prova, de acordo com a NBR 5738/15 Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

Após os 28 dias o concreto foi rompido no laboratório de engenharia civil da UFERSA, obtendo os seguintes resultados:

- i. O primeiro corpo de prova teve uma resistência de  $14,8 \text{ MPa}$ ,
- ii. O segundo corpo resistiu a  $16,1 \text{ MPa}$
- iii. O terceiro corpo de prova teve uma resistência de  $12,7 \text{ MPa}$ .

Quando feito a média entre os valores dos três corpos de prova se obtém uma resistência média de  $14,5 \text{ kN/m}^2$ .

Com isso foi possível verificar que aconteceu uma queda na resistência que era esperada para os corpos de prova,  $20 \text{ MPa}$ , a relação água cimento usado nesse traço foi de  $0,6$ .

Existem vários fatores que podem ocasionar essa diminuição na resistência a compressão, uma delas são os esforços de tração internos, gerados pela temperatura, só com um estudo mais detalhado sobre as características mecânicas desse concreto é que será possível afirmar o que ocasionou essa redução, o que não é o objetivo desse trabalho, mas que pode ser analisado em trabalhos futuros.

## 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, os efeitos do teor de cimento, temperatura de colocação, e tempo de ajuste no histórico de elevação de temperatura nas primeiras idades do concreto foram investigadas. As conclusões tiradas deste estudo são as seguintes:

- i. Neste estudo, o histórico de elevação da temperatura adiabática é dividido em três seções: (a) a seção de ausência de calor de hidratação que ocorre no tempo  $t_0$ , (b) a seção de rápido aumento de temperatura e (c) a seção de manutenção de temperatura máxima. Entre estes, o tempo da seção 1 (ou o tempo de início do calor de hidratação,  $t_0$ ) tem uma estreita correlação com o tempo de ajuste final. Portanto, significa que o tempo de início do calor de hidratação ( $t_0$ ) pode ser definido com o tempo de ajuste final do concreto.
- ii. As diferenças apresentadas entre os resultados deste trabalho e o trabalho apresentado por KOO, Kyung-Mo et al. (2014), pode ter sido provocada pelo pequeno consumo de cimento no traço adotado e ao tipo de cimento, quando comparado outros estudos, outro fator é o da possibilidade de ter ocorrido alguma falha mínima na confecção da caixa.
- iii. As análises feitas nesse trabalho podem auxiliar futuros estudos com o objetivo avaliar o desenvolvimento de temperatura para grandes concretagens, fazendo com que seja evitada prováveis manifestações patológicas, gerando um melhor controle no traço e no método de concretagem.

A próxima etapa desse estudo será a verificação por métodos numéricos, onde serão realizadas simulações por métodos de elementos finitos. Será comparado com o modelo e resultados experimentais encontrados neste trabalho, para que assim auxilie nas etapas de planejamento de concretagem a análise prévia de temperatura do concreto.

## REFERÊNCIAS<sup>1</sup>

- COELHO, Nailde de Amorim. **Métodos analíticos e numéricos para o estudo dos efeitos termomecânicos no concreto massa orientados às barragens de gravidade**. 2017.
- COELHO, Nailde de Amorim. **Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa**. 2012.
- KOSMATKA, S.; FARNY, J. **Portland Cement, Concrete and Heat of Hydration**. Concrete Technology Today (CTT) Newsletter, July, p. 1-8, 1997.
- LAWRENCE, Adrian M. et al. **Effect of early age strength on cracking in mass concrete containing different supplementary cementitious materials: experimental and finite-element investigation**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 24, n. 4, p. 362-372, 2011.
- GAMBALE, E. A.; BETTENCOURT, R. M. Análise do fenômeno térmico em concretos de cimento portland branco. In: **Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto**. Salvador. 2008.
- KODUR, V. K. R.; SULTAN, M. A. **Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete**. Journal of materials in civil engineering, v. 15, n. 2, p. 101-107, 2003.
- KIM, S. G. **Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement**, Civil Engineering, Iowa State University, Master of Science Thesis. 2010. 126 p. 2010.
- PORTLAND CEMENT, **Concrete. Portland Cement, Concrete, and Heat of Hydration**. 1997.
- TOWNSEND, C. L.; **Control of Cracking in Mass Concrete Structures**. Monografia de Engenharia. The United States: Bureau of Reclamation, 1981.
- SANTOS, S. B. **Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Termomecânico de Estruturas Maciças de Concreto. Modelagem Viscoelástica Linear e Aplicações**. 287 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória: 2004.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.
- De Sousa, Alex Lucena; da Silva, Iago Rhuan Rocha; de Castro, Paulo Henrique Machado. **Retração térmica e fissuração em concreto por calor de hidratação**.
- KOO, Kyung-Mo et al. **Properties of adiabatic temperature rise on concrete considering cement content and setting time**. 2014.
-