



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

TALES RAFAEL ARAUJO DE OLIVEIRA

**ARDUINO: UMA FERRAMENTA PARA MONITORAMENTO DA
TEMPERATURA EM ELEMENTOS DE CONCRETO.**

PAU DOS FERROS-RN

2020

TALES RAFAEL ARAUJO DE OLIVEIRA

**ARDUINO: UMA FERRAMENTA PARA MONITORAMENTO DA
TEMPERATURA EM ELEMENTOS DE CONCRETO.**

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

Orientador: Prof. Dr. Matheus Fernandes
de Araújo Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos
Gurgel da Silva Segundo

PAU DOS FERROS-RN

2020

TALES RAFAEL ARAUJO DE OLIVEIRA

**ARDUINO: UMA FERRAMENTO PARA O MONITORAMENTO DA
TEMPERATURA EM ELEMENTOS DE CONCRETO.**

Monografia, apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi Árido, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Pau dos Ferros/RN, 09 de dezembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

MATHEUS FERNANDES DE ARAUJO
SILVA:01435936418

Assinado de forma digital por
MATHEUS FERNANDES DE ARAUJO
SILVA:01435936418
Dados: 2020.12.15 10:58:31 -03'00'

Prof. Dr. Matheus Fernandes de Araújo Silva, (UFERSA)
Presidente

FRANCISCO CARLOS
GURGEL DA SILVA
SEGUNDO:06062106444

Assinado de forma digital por
FRANCISCO CARLOS GURGEL DA
SILVA SEGUNDO:06062106444
Dados: 2020.12.11 15:20:12 -03'00'

Prof. Dr. Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo, (UFERSA)
1º Membro Examinador

RAFAELY ANGELICA
FONSECA
BANDEIRA:00978306406

Assinado de forma digital por
RAFAELY ANGELICA FONSECA
BANDEIRA:00978306406
Dados: 2020.12.15 10:09:21 -03'00'

Profa. Dra. Rafaely Angelica Fonseca Bandeira, (UFERSA)
2º Membro Examinador

© 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.

048a Oliveira, Tales Rafael Araujo de.
ARDUINO: UMA FERRAMENTA PARA MONITORAMENTO DA
TEMPERATURA EM ELEMENTOS DE CONCRETO. / Tales
Rafael Araujo de Oliveira. - 2020.
68 f. : il.

Orientador: Matheus Fernandes de Araújo Silva.
Coorientador: Francisco Carlos Gurgel da Silva
Segundo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2020.

1. Concreto. 2. Temperatura. 3. Arduíno. 4.
Banco de Dados. I. Silva, Matheus Fernandes de
Araújo, orient. II. Segundo, Francisco Carlos
Gurgel da Silva, co-orient. III. 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.

*Dedico esse trabalho aos meus pais, pelo amor
e confiança que têm depositados em mim*

AGRADECIMENTOS

Um dos sentimentos mais bonitos do ser humano é a gratidão, devemos reconhecer e agradecer a todos aqueles que contribuíram e contribuem para o nosso crescimento. E eu tenho muito a agradecer, acredito que sozinho não tinha chegado ao fim de mais uma etapa. Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, por me permitir acordar todo dia e ir em busca dos meus sonhos. Aos meus pais, Suely e Petit, por todo o amor que me proporcionam, pelo cuidado de sempre, por todo o ensinamento que me deram e por nunca terem medido esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Aos meus irmãos e a toda a família de um modo geral.

Ao meu orientador, Prof. Matheus, a quem tenho total admiração, ele é certamente uma pessoa que faz despertar seu lado profissional. Agradeço a ele por todos os ensinamentos e puxões de orelha quando necessário e por ter atendido prontamente meu pedido para orientação neste trabalho. Ao coorientador Prof. Segundo, outra pessoa incrível com quem já pude trabalhar em outras ocasiões e que também aceitou prontamente embarcar nessa ideia. Este trabalho resume a minha essência, acredito na aplicação da computação para resolver problemas da engenharia civil, e eu não poderia ter um time melhor nesse projeto.

A todos os professores, aos que fui aluno, aos que me orientaram em algum momento ou pude conviver de alguma forma durante todos esses anos na graduação. Agradeço a todos que fazem a UFERSA, desde os servidores à direção do campus, cada um tem sua parcela de contribuição.

Aos amigos, aqueles de longa data que sempre estiveram comigo, Caio, Jhony, Napoleão Jr, Hytalo, Braulio, Felipe, Raissa, Ravena, Andrea, Hellen, Carlos Henrique, que sempre acreditaram e sabiam que esse momento chegaria, que mesmo distante sempre mandam mensagem de apoio. Aos mais recentes e não menos importantes, amigos que a UFERSA me deu, dividimos juntos nossas frustrações, medos e alegrias, em especial Augusto, Atônio Neto, Leonardo Sucupira, Cadmo, Lucas Limas, Pedro Neto, Nertan, Públio, Thallysmara e Mariane. A todos os membros dos projetos de pesquisa em que participei dentro do Núcleo de Pesquisa Acesso à Terra Urbanizada, em especial ao coordenador Almir, por todas as oportunidades me dada e por acreditar no meu trabalho.

Enfim, a minha imensa gratidão a todos, aos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

RESUMO

Atualmente nos deparamos com a necessidade de construção de grandes edificações, para as quais são necessários elementos de concreto dotados de grandes dimensões. Para esse padrão construtivo, é necessário ainda mais cuidado em relação ao controle tecnológico. Seja do ponto de vista da engenharia por envolver grandes estruturas, seja do ponto de vista econômico por envolver grandes investimentos. Uma das propriedades que devem ser levada em consideração neste controle é o calor de hidratação, que devido ao processo químico exotérmico, gera uma certa quantidade de energia no concreto e faz com que haja aquecimento do mesmo. O processo de resfriamento ocorre de forma natural uma vez que o elemento de concreto após um determinado tempo tende a equilibrar sua temperatura com o ambiente externo, porém, em elementos com grandes dimensões, há um aquecimento maior em seu núcleo, isto se dá devido a dificuldade de dissipação causada pelo grande caminho que o calor deve percorrer. Este superaquecimento acaba provocando tensões de origem térmicas que por sua vez leva a fissuração da estrutura. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo, criar uma ferramenta capaz de realizar o monitoramento no interior do elemento de concreto, para isto, utilizaremos o Arduino, como ferramenta de prototipação para validar esse tipo de análise. Ainda se desenvolveu um sistema baseado na arquitetura cliente-servidor para armazenamento das informações obtidas e disponibilização para o usuário, com uma interface de fácil compreensão dos dados sem a necessidade de execução de consultas complexas no banco de dados. Para a realização deste trabalho foi produzida uma fôrma de madeira para a simulação de um bloco de fundação e assim ser possível o monitoramento do mesmo em condições controladas.

Palavras-chaves: Concreto, Temperatura, Arduino, Banco de Dados.

ABSTRACT

Currently, we faced the need of building big edifications, in which are necessary large elements of concrete with big dimensions. For this constructive pattern, It's necessary even more care with technological control. Whether from the engineering point of view because it involves big structures, whether from the economic point of view because it involves big investments. One of the properties that might be taken into account in this control is the hydration heat, that due the chemical exothermic process, generates a certain quantity of heat in the concrete that makes it heat. The cooling process happen in a natural way, once that the element of concrete after a certain time tends to balance its temperature with the external environment, but in elements with big dimensions, there is a big heating in its nucleo, this happens due to the difficulty of dissipation caused by the big way that the heat might go through. This overheating ends up causing thermal stresses that in its turn leads to cracking of the structure. Therefore, this work has as a goal create a tool able to perform the monitoring inside the concrete element, for this we will use the Arduino as a prototyping tool to validate this kind of analysis. A system based on the client-server architecture was also developed to store the information obtained and made available to the user, with an easy comprehension interface of datas, without the need to run complex queries in the database. In order to carry out this work, a wooden form was produced to simulate a foundation block and in this way make possible monitoring it in controlled conditions.

Keywords: Concrete, Temperature, Arduíno, Databases.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Taxa de hidratação dos compostos do cimento Portland.....	21
Figura 2 - Calor de Hidratação dos tipos distintos de cimento.	22
Figura 3 - Influência do consumo de cimento na temperatura do concreto. ...	24
Figura 4 - Detalhe da concretagem em camadas.....	25
Figura 5 - Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto. ..	28
Figura 6 - Curva de Gauss para a resistência do concreto a compressão.....	28
Figura 7 - Ensaio de tração direta.....	29
Figura 8 - Ensaio de tração por compressão diametral	30
Figura 9 - Ensaio de tração na flexão.....	30
Figura 10 - Coeficiente de restrição segundo o ACI.....	37
Figura 11 - Arduino UNO	40
Figura 12 - Termopar tipo K	41
Figura 13 - Circuito para medir o potencial de Seebeck	41
Figura 14 - Módulo ESP-01	44
Figura 15 - Diagrama com o circuito	46
Figura 16 - Circuito Arduino.....	48
Figura 17 - Arquitetura do sistema.....	49
Figura 18 – Fôrma para concretagem.....	51
Figura 19 - Gráfico da temperatura inicial interna da fôrma.....	52
Figura 20 - Fôrma para concretagem com revestimento final	53
Figura 21 – Gráfico da temperatura interna com revestimento final da fôrma	53
Figura 22 – Processo de lançamento do concreto	54
Figura 23 - Monitoração da temperatura dentro da fôrma	55
Figura 24 - Evolução da temperatura no elemento de concreto.....	57
Figura 25 - Curva característica da temperatura do concreto.....	58
Figura 26 - Pico de temperatura	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Calor de hidratação dos compostos puro	20
Tabela 2 - Calor de hidratação dos compostos puro.....	33
Tabela 3 - Valor de difusividade térmica para concreto com diferentes agregados graúdos	34
Tabela 4 - Tipos de sensores Termopar convencional	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	<i>Application Programming Interface</i>
ARI	Alto Rendimento Inicial
Bel	Bacharel
CP	Cimento Portland
CGI	<i>Common Gateway Interface</i>
Dr	Doutor
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i>
ESP	Especialista
GPL	<i>General Public License</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
Me	Mestre
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEC	Método dos Elementos de Contorno
MEF	Método dos Elementos Finitos
PHP	<i>Hypertext Preprocessor</i>
SCK	<i>Serial Clock</i>
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
VCC	<i>Common Collector Voltage</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. PROBLEMATIZAÇÃO.....	16
3. OBJETIVOS	17
4. METODOLOGIA.....	17
5. REFERENCIAL TEÓRICO	18
5.1. CIMENTO PORTLAND.....	18
5.2. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	19
5.2.1. Calor de hidratação	19
5.3. FATORES ASSOCIADOS AO COMPORTAMENTO TÉRMICO	21
5.3.1. Tipo de cimento	21
5.3.2. Consumo de cimento.....	23
5.3.3. Geometria.....	24
5.3.4. Temperatura do ambiente	26
5.4. PROPRIEDADES DO CONCRETO	26
5.4.1. Propriedades físicas e mecânicas	27
5.4.1.1. Resistência a compressão.....	27
5.4.1.2. Resistência a tração.....	29
5.4.2. Propriedades térmicas do concreto	30
5.4.2.1. Coeficiente de dilatação.....	31
5.4.2.2. Calor específico	32
5.4.2.3. Condutividade térmica	32
5.4.2.4. Difusividade térmica.....	33
5.5. PROBLEMAS DE ORIGEM TÉRMICA.....	34
5.5.1. Fissuração do concreto por tensões térmica.....	35
5.5.2. Grau de restrição	36
5.6. EQUAÇÃO DE ARRHENIUS.....	38
5.7. ARDUINO	39
5.7.1. Aquisição de dados	40
5.7.1.1. Termopar tipo K	40
5.7.2. Persistência dos dados.....	42
5.7.2.1. Arquitetura cliente-servidor	43
5.7.2.2. Módulo Wi-fi	43
5.7.2.3. Banco de dados MySQL	44
5.8. O USUÁRIO COMO CLIENTE	44
5.8.1. Interface web.....	45

6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	46
6.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	46
6.1.1. Arduino e seus componentes.....	46
6.1.2. Servidor.....	48
6.1.3. Fôrma	49
6.1.4. Concreto.....	49
6.2. MÉTODOS	50
6.2.1. Confeção da fôrma e testes de isolamento térmico	50
6.2.2. Concretagem	54
6.2.3. Monitoramento.....	55
7. RESULTADOS	57
8. CONSLUSÃO	60

1. INTRODUÇÃO

Ano após ano observa-se o crescente consumo de concreto em todo o mundo, que apesar da leve retração entre os anos de 2015 a 2018, segundo dados do SNIC – Sindicato Nacional das Indústrias de cimento, em 2019 o mercado retomou o crescimento, com um aumento de 3,5% em relação ao ano anterior. Este fato está diretamente associado à necessidade de expansão urbana de nossa sociedade. A cada dia que passa é necessário novas edificações com as mais diversas finalidades, seja moradia, negócios ou até mesmo cultura e entretenimento. Tal expansão leva a uma escassez maior nos espaços disponíveis para construção, o que leva a uma tendência de verticalização das edificações. Assim sendo, para esse novo padrão construtivo são necessários cada vez mais elementos construtivos dotados de grandes dimensões.

Além disso, ainda surge a necessidade da criação de equipamentos que estão associados a produção de recursos fundamentais para o desenvolvimento dessa sociedade, que também necessitam de grandes volumes de concreto e possuem elementos com grandes dimensões, como por exemplo as construções que tem como finalidade a geração dos mais diversos tipos de energias, como as hidroelétricas, bases para turbinas eólicas e torres de linhas de transmissão, ou ainda as obras de infraestrutura rodoviária, onde podemos citar as pontes, as quais em sua grande maioria também necessitam de elementos de grandes dimensões.

À medida que aumenta as dimensões desses elementos construtivos, é notório a necessidade de um controle tecnológico mais detalhado e preciso, pois o aumento das dimensões aumenta a probabilidade de surgimento de patologias. Uma das grandes preocupações é com o calor gerado pela hidratação do cimento Portland, que devido as restrições para liberação de calor em elementos estruturais de grande volume, os efeitos térmicos são ainda mais significativos e dependem das propriedades térmicas dos materiais empregados (AGUIAR *et al.*, 2020). Ou seja, esse processo de hidratação do cimento gera uma reação exotérmica, liberando calor quando o mesmo entra em contato com a água. A intensidade dessa reação pode variar dependendo dos materiais empregados na produção do concreto.

O controle tecnológico do concreto é definido como uma serie de ensaios para verificar se suas características estão de acordo com o projeto, como também fazer o monitoramento do seu comportamento durante todo o processo de cura. Dessa forma, o

controle tecnológico do concreto não está restrito aos testes de tração e compressão (concreto endurecido), ou aos ensaios feitos no momento do recebimento do concreto. Para garantir uma qualidade total. Algumas características devem ser monitoradas ao longo de todo o processo de cura, dentre elas, o controle da temperatura, pois como já dito anteriormente, uma vez que essa característica não é bem controlada, podem surgir fissuras que quando não são contidas podem causar sérias patologias que podem levar ao comprometimento da durabilidade da estrutura. Dessa forma a vida útil de projeto só pode ser alcançada, se atendido um conjunto de requisitos nas etapas de projeto, execução e manutenção (CAVALCANTI FILHO, 2010).

Além do monitoramento da temperatura do concreto *in loco*, pode-se fazer uma análise prévia através da aplicação de métodos numéricos utilizando *softwares* específicos. Segundo Gambale (2017), através desta análise, pode-se prever e avaliar a temperatura interna de um elemento de concreto, podendo ainda simular seu comportamento em diversas situações (concretagem em camadas, resfriamento do concreto, etc...). Existem vários métodos numéricos para avaliar a temperatura no interior de um elemento de concreto massa, como Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos de Contorno (MEC) e o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Apesar do acompanhamento da temperatura no local ser sempre o método mais indicado na maioria dos casos, a análise numérica em elementos finitos é a solução mais viável em situações no qual o engenheiro precisa compreender problemas a serem executados, ou ainda prever o comportamento de uma dada estrutura em situações específicas.

O processo de monitoramento da temperatura pode ser simplificado com o uso de tecnologias, sendo assim, o avanço da computação tem permitido cada vez mais a automação desse tipo de tarefa, onde precisa-se realizar uma determinada operação em um determinado intervalo de tempo de forma contínua, ou seja, realizar a leitura constante da temperatura em um dado intervalo de tempo. Atualmente já existem dispositivos para a realização da medição de temperatura, porém há um custo elevado com aquisição de equipamento e licenças. Dessa forma, percebe-se a necessidade de desenvolver um dispositivo, que seja acessível, de baixo custo, de fácil instalação e operação, que possa ser acessado remotamente e que ainda disponibilize uma interface de fácil interpretação dos resultados.

Uma alternativa bastante utilizada no mercado de automação é o microcontrolador Arduino, pois segundo Sombra (2016) esta é uma plataforma de

desenvolvimento *OpenSource* utilizada com muita frequência na atualidade devido ao seu baixo preço de custo e facilidade de uso. Além disso, a prototipagem com Arduino permite a utilização dos mais diversos sensores para os mais variados fins, como também a integração com *shields* (placas conectadas diretamente no Arduino estendendo suas funcionalidades) e módulos (placas conectadas aos pinos do Arduino indiretamente via o uso de fios) (ARDUINO.CC, 2016).

Além da obtenção dos dados, há a necessidade de armazenamento dessas informações, para que possam ser analisadas futuramente. Para isso existem vários tipos de SGBD (Sistemas de Gerenciamento de Banco de dados), que segundo Costa e Nunes (2016) consiste de um software que foi projetado para auxiliar na manutenção e utilização de vastos conjuntos de dados, ou seja, é um software que vem com funções para definir, recuperar e alterar dados em um banco de dados. Os mesmos autores ainda afirmam que o SGBD disponibiliza uma interface para que seus clientes possam incluir, alterar ou consultar dados previamente armazenados, sejam elas por API (*Application Programming Interface*) ou através de drivers que possam executar comandos na linguagem SQL (*Structured Query Language*). Entre os principais SGBD podemos destacar o MySQL, devido a sua facilidade de uso, rapidez e segurança, além de ser um banco de dados gratuito e multiplataforma.

2. PROBLEMATIZAÇÃO

Como já dito de forma introdutória no tópico anterior, um ponto que merece atenção especial em construções dotadas de elementos estruturais com grande volume, é o seu controle tecnológico, principalmente no que diz respeito em relação a análise dos efeitos térmicos do concreto. Do ponto de vista de projeto e execução, existem situações em que o engenheiro necessita prever o comportamento da estrutura, principalmente em estruturas de grande porte onde há um grande consumo de material e um alto valor financeiro agregado.

Sendo assim, é importante ressaltar a necessidade do monitoramento da temperatura, principalmente nas primeiras idades do concreto. Nesse contexto, esse trabalho procura criar uma aplicação, composta de *hardware* e *softwares* para facilitar a aquisição dos dados de temperatura do concreto e enviar diretamente para um servidor, automatizando todo um processo, garantindo uma análise consistente com custo bastante

reduzido quando comparado com soluções existentes no mercado, além de trazer como diferencial a centralização das informações em uma única base de dados.

3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de monitorar a temperatura no interior de um elemento de concreto durante o processo de cura e armazenar as informações coletadas em um banco de dados remotamente.

Como objetivos específicos temos:

- Criar uma interface que permita a comunicação do usuário com o banco de dados para acompanhamento da temperatura do elemento em tempo real e que possibilite a exportação dos dados para formatos abertos como .csv ou .xml;

4. METODOLOGIA

Os procedimentos aplicados neste trabalho consistem em pesquisa exploratória sobre o tema, cujo objetivo é aprofundar o conhecimento sobre as temáticas principais e levantar informações confiáveis. Esse procedimento é feito através de revisão bibliográfica em livros, artigos, dissertações e teses, além de normas técnicas e regulamentadoras. Para aquisição dessas informações, além da bibliografia física foram utilizados indexadores científicos e periódicos capes como fonte das mais diversas referências aqui utilizadas.

Além de todo o embasamento teórico, este trabalho também se caracteriza por possuir uma abordagem quantitativa, cujo objetivo será classificar por meio de gráficos e tabelas valores obtidos através do sensor desenvolvido para monitoramento da temperatura do concreto. Os valores deverão ser obtidos a cada 30 min durante 14 dias.

5. REFERENCIAL TEÓRICO

Como todo trabalho científico, este deve ser fundamentado na literatura, e através dessa revisão teórica tem-se total embasamento dos principais conceitos necessário para o desenvolvimento dessa ferramenta de análise do comportamento da temperatura em elementos de concreto aqui proposta, assim como também todas as análises objetivadas.

5.1. CIMENTO PORTLAND

O cimento é um dos materiais mais importante na construção civil, o cimento Portland como é mais comumente conhecido é um cimento hidráulico (ou seja, que endurece com a presença de água), é um aglomerante obtido através da mistura do clínquer, gesso e outras adições. O clínquer por sua vez é composto principalmente por silicatos C_3S (Alita) e C_2S (Belita) e aluminatos C_3A (Celita) e C_4AF (ferroaluminato tetra-cálcio), os silicatos C_3S e C_2S são os compostos mais importantes, pois são responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2013). Ainda segundo Neville (2013), a presença de C_3A no cimento é indesejável, pois ele contribui pouco ou praticamente nada para resistência do cimento, exceto nas primeiras idades. Apesar disso, o C_3A é benéfico à produção do cimento, pois facilita a combinação do óxido de cálcio com a sílica. Assim como também o C_4AF não possui influencia na resistência e está presente em pequenas quantidades no cimento, porém sua presença pode acelerar a hidratação dos silicatos.

Além dos compostos já citados, no processo de fabricação do cimento ainda pode ser adicionado compostos, como por exemplo o MGO , TiO_2 , Mn_2O e Na_2O que dependendo da quantidade adicionada irão derivar vários tipos de cimento. No Brasil, a produção de cimento é normatizada pelas ABNT NBR 5732, NBR 5735 e NBR 5736. Ou seja, para Funahashi Júnior (2018) *apud* Battagin (2011), os tipos de cimento são diferenciados de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio e de adições, como escórias, pozolanas e fíler calcário acrescentados no processo de moagem.

5.2. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O endurecimento do cimento e o ganho de resistência ocorrem pela reação química desencadeada pelo contato dos seus compostos anidros com a água, comumente chamada de hidratação do cimento. Com o passar do tempo o que era apenas pó torna-se uma massa sólida e resistente.

todos os compostos não se hidratam à mesma velocidade. Os aluminatos são conhecidos por hidratarem muito mais rapidamente que os silicatos. Na verdade, o enrijecimento (perda de consistência) e a pega (solidificação) característica da pasta de cimento Portland, são amplamente determinados por reações de hidratação envolvendo os aluminatos.

(MEHTA e MONTEIRO, 1994)

A hidratação do cimento se divide basicamente em dois grupos; o dos aluminatos e o dos silicatos, sendo que o cimento é composto em sua grande maioria de silicatos, cerca de 75% da composição. Ainda segundo Mehta e Monteiro (1994), os silicatos tem um importante papel na determinação das características de endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência) que se inicia com o fim do processo de pega. Para Carvalho (2002), a hidratação do cimento pode ser analisada como a soma das reações dos vários compostos individuais do cimento Portland com a água, que ocorrem simultaneamente. Sendo assim a velocidade de hidratação inicial de cada composto é proporcional à área específica do cimento, ou seja, quanto maior a área específica de um composto maior será a sua velocidade de hidratação.

5.2.1. Calor de hidratação

O processo de hidratação do cimento gera uma reação química exotérmica, que é conhecida como calor de hidratação, provocando o aquecimento da massa de concreto durante o seu endurecimento.

O calor de hidratação pode muitas vezes ser um problema (por exemplo, em estruturas de concreto massa), e em outras tantas vezes um auxílio (por exemplo, em concretagem durante o inverno quando a temperatura do ambiente pode ser muito baixa para fornecer energia de ativação para as reações de hidratação).

(MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Os métodos para determinação do calor de hidratação são normatizados pelas ABNT NBR 8809:2013 - Cimento Portland — Determinação do calor de hidratação a partir do calor de dissolução — Método de ensaio e ABNT NBR 12006:1990 Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant - Método de ensaio. A quantidade de calor liberado e a velocidade com que esse calor de hidratação dos compostos individuais é liberado podem ser utilizados como índices de suas reatividades e consequentemente utilizados para caracterizar a pega e o endurecimento do cimento, como também para prever a elevação da temperatura. Para Carneiro *et al* (2011) e baseado em Mehta e Monteiro (1994), quanto maior o volume de concreto, maior o calor liberado pela mistura, que pode ser dissipado na atmosfera ou absorvido pela própria massa de concreto.

Toda essa energia liberada em forma de calor resulta em um aumento da temperatura do concreto (SOUZA *et al*, 2014). Ou seja, a quantidade total de calor liberado, irá depender proporcionalmente da quantidade de calor de hidratação de cada composto puro presente no cimento. Pode-se observar esses valores individualizados na Tabela 1.

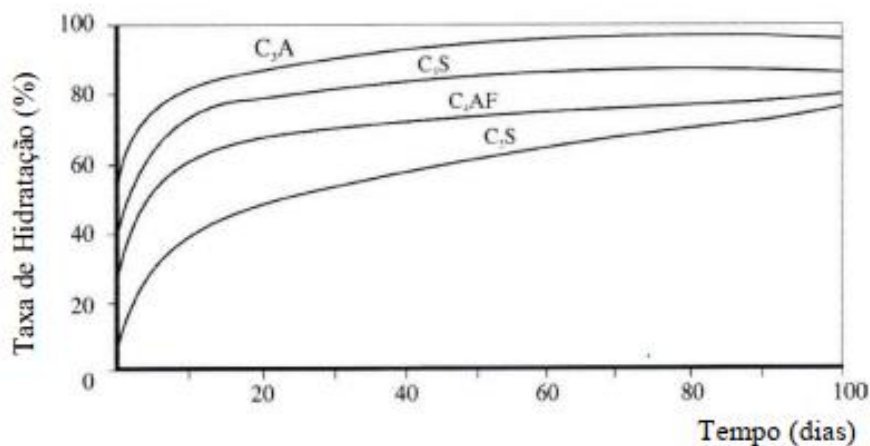
Tabela 1 – Calor de hidratação dos compostos puro

Composto	Calor de hidratação	
	J/g	Cal/g
C ₃ S	502	120
C ₂ S	260	62
C ₃ A	867	207
C ₄ AF	419	100

Fonte: Neville, 2013.

A liberação de calor como está relacionada diretamente ao processo de hidratação, ocorre com mais intensidade nas primeiras idades do concreto. Segundo Neville (2013), cerca de metade do calor total é liberado entre 1 e 3 dias, cerca de $\frac{3}{4}$ em 7 dias e aproximadamente 90% em 6 meses. Pode-se observar na Figura 1 a taxa de hidratação de cada composto em função do tempo.

Figura 1 - Taxa de hidratação dos compostos do cimento Portland.



Fonte: KIHARA e CENTURIONE (2005)

Pode-se observar que o C₃A é o composto que possui maior taxa de hidratação, chegando a atingir valores próximos a 80% no período de 80 dias, enquanto que o C₂S é o que possui menor taxa de hidratação e conseqüentemente tem menor influência na temperatura do concreto.

5.3. FATORES ASSOCIADOS AO COMPORTAMENTO TÉRMICO

Sabendo da importância do calor liberado durante o processo de hidratação e seu relacionamento com o aumento de temperatura do concreto, é necessário conhecer com mais detalhes alguns fatores que influenciam diretamente no calor de hidratação do cimento e problemas associados as propriedades térmicas do elemento de concreto.

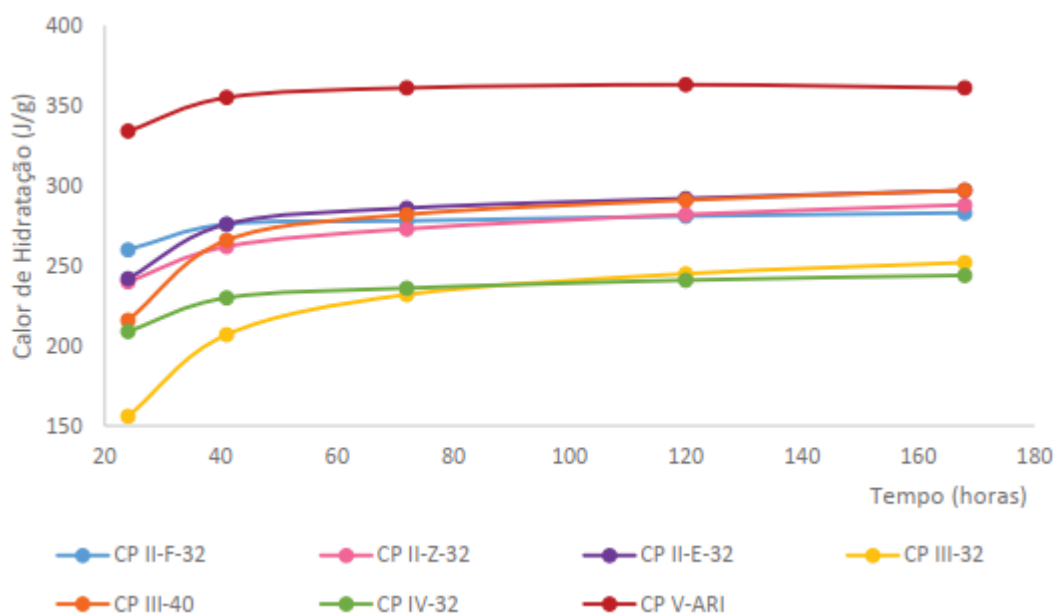
5.3.1. Tipo de cimento

A escolha do tipo de cimento influencia diretamente na temperatura no interior de uma estrutura de concreto. Sabe-se que os tipos cimentos variam de acordo com a quantidade e tipo de adições feitas no processo de moagem como também pela variação da proporção entre silicatos e aluminatos. Para Coelho (2012), concretos com cimentos de altos teores de C₃S e C₃A terão alta resistência inicial somada a uma grande liberação de calor durante a sua hidratação. Neville (2014), afirma que ao reduzir as proporções de

C₃S e C₃A, o calor de hidratação (e a velocidade de hidratação) do cimento pode ser reduzido.

A Figura 2 ilustra a variação do calor de hidratação em relação ao tempo para os sete principais tipos de cimentos produzidos no Brasil. Os ensaios foram realizados pela ABCP, com base na ABNT NBR 12006:1990. Segundo Gambale (2017) apud ABCP (2012), vale ressaltar que o calor de hidratação varia em função das características químicas e físicas do cimento, recomendando-se a realização de ensaios específicos no material a ser utilizado no concreto. Ainda de acordo com a Figura 2 podemos observar que o cimento CP V-ARI gera um calor de hidratação bem maior em relação aos outros tipos de cimento analisados na pesquisa, este fato se dá devido à alta quantidade de silicato tricalcio (C₃S) que provoca alta resistência inicial e consequentemente aumento no calor de hidratação.

Figura 2 - Calor de Hidratação dos tipos distintos de cimento.



Fonte: ABCP (2012)

Ou seja, a escolha correta do tipo de cimento influencia na redução de temperatura do elemento, como também a sua propensão a fissuração de origens térmicas. Para Sousa et al (2014) apud Neville (1997), cimentos com maior teor de finos possuem uma hidratação mais rápida, por isso cimentos que tenham uma grande área específica devem ser evitados para o não surgimento de fissuração no concreto de origem térmica.

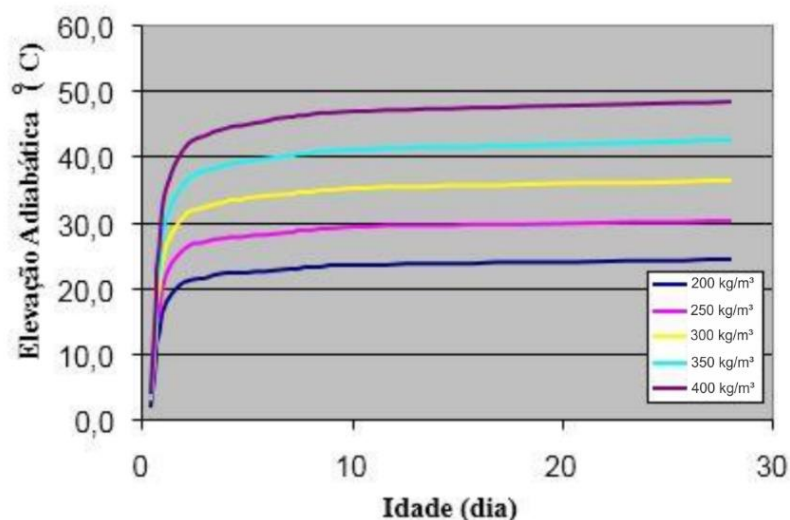
5.3.2. Consumo de cimento

Outro aspecto que devemos considerar quando se trata do calor de hidratação do cimento é o consumo desse material, pois o cimento sendo a única fonte geradora de energia na mistura do concreto, a quantidade adicionada ao traço do concreto reflete diretamente no calor de hidratação produzido. Por exemplo, os concretos que necessitam de alto desempenho e concretos auto adensáveis, necessitam de maior consumo de cimento e consequentemente estão sujeitos a maiores problemas relacionados ao calor de hidratação. Um consumo moderado de cimento proporciona menor potencial de fissuração no caso de concreto massa em que o calor de hidratação deve ser controlado, e no caso de concreto estrutural em que a retração é um problema (NEVILLE, 2013).

Como solução, deve-se selecionar corretamente o cimento empregado no traço, e quando possível a troca por cimentos com baixo calor de hidratação. Ainda, segundo Gambale (2017) *apud* Mehta e Monteiro (1994) pode-se fazer a substituição de cimento por adições minerais, uso de pozolana de argila calcinada, uso de agregados resfriados, uso de água em forma de gelo ou circulação de água fria no interior do volume de concreto lançado. Algumas dessas técnicas demandam um alto custo financeiro, além de equipamentos e materiais de difícil acesso. Sendo assim, a escolha do tipo do cimento com melhor custo benefício e que atenda as especificações técnicas de projeto acaba sendo a solução mais adequada para a maioria dos casos.

Pode-se observar na Figura 3 o aumento da temperatura de acordo com o aumento na quantidade de consumo de cimento na mistura. Ocorre uma maior elevação adiabática de temperatura no concreto, fator inerente ao surgimento das tensões térmicas (GAMBALE, 2017).

Figura 3 - Influência do consumo de cimento na temperatura do concreto.



Fonte: Sousa, *et. al.*, (2017 *apud* Gambale, 2013)

5.3.3. Geometria

A geometria do elemento de concreto também é um fator que influencia diretamente tanto na elevação de temperatura como no processo de resfriamento através da dissipação de calor. Segundo Carneiro *et al.* (2011), com outras palavras, não devemos considerar apenas o volume na análise térmica, pois apesar de se utilizar a mesma quantidade de concreto em uma laje e em um bloco de fundação, por exemplo, é possível notar que a laje terá menos problemas em relação ao efeito da temperatura, pois possui maior área para dissipação do calor, como também em uma das dimensões o caminho a ser percorrido durante a dissipação é bem menor que em relação ao bloco, onde o calor fica preso no interior por muito mais tempo.

A estrutura de concreto tendo suas dimensões reduzidas terá consequentemente o calor gerado pela hidratação difundido para o ambiente e o pico térmico menor, entretanto, à medida que as dimensões aumentam, esse pico torna-se mais elevado, aumentando, consequentemente, o gradiente de queda para o equilíbrio com o ambiente.

(GAMBALE, 2017)

Ou seja, existe uma certa potencialidade de fissuração em elementos com grandes dimensões, dessa forma, ainda segundo Gambale (2017), no desenvolvimento de

5.3.4. Temperatura do ambiente

Além dos fatores já discutidos, existem vários outros fatores contribuem significativamente para a elevação da temperatura do elemento de concreto, como por exemplo a temperatura do ambiente, que quando somada aos ganhos de temperatura da reação química pode agir de forma desfavorável dependendo do clima em que está sendo feita a concretagem. Segundo Carneiro *et al.* (2011) a temperatura ambiente será importante na temperatura que o concreto fresco atingirá antes da concretagem, isto é, a temperatura de lançamento. Os mesmos autores ainda afirmam que de forma geral, a temperatura elevada do ambiente pode causar fissura por retração. A exposição excessiva do concreto ao sol e ventos, principalmente nos primeiros dias, influencia diretamente na elevação da temperatura, sendo uma boa prática a concretagem em horários com a temperatura mais fria ou em dias nublados.

Para contornar esse problema de exposição do concreto ao sol e temperatura do ambiente, deve-se fazer um processo de cura, segundo Bardela *et al.* (2005) a cura do concreto é conhecida como o conjunto de medidas que tem por finalidade evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento, que é responsável pela pega e endurecimento do concreto. Ou seja, com essas técnicas o ganho de temperatura no interior do elemento de concreto é menor e conseqüentemente isso trará menos problemas de fissuração por origens térmicas.

5.4. PROPRIEDADES DO CONCRETO

Segundo Gambale (2017) para a análise e entendimento dos efeitos térmicos no concreto é necessário antes conhecer suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios, executados em condições específicas. Geralmente, os ensaios são realizados para controle da qualidade e atendimento às especificações. (PINHEIRO *et al.*, 2004).

Dividiremos o estudo bibliográfico em dois tópicos, inicialmente será abordado o estudo sobre as propriedades físicas e mecânicas do concreto endurecido através da caracterização da tração e compressão, em seguida trataremos das propriedades térmicas, através do calor específico, condutividade e difusividade térmica, pois ainda segundo Gambale (2017), todas essas propriedades influenciam no desenvolvimento de gradientes de temperatura, deformações térmicas, e fissuração nas primeiras idades do concreto.

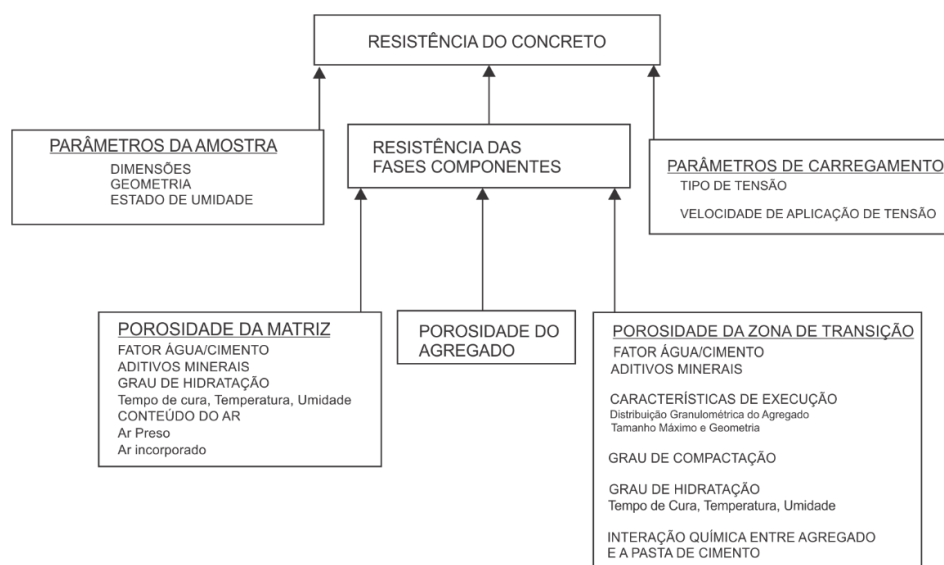
5.4.1. Propriedades físicas e mecânicas

De acordo com Gambale (2017), a hidratação do cimento, e outros efeitos térmicos associados, podem acelerar os processos físicos e mecânicos e ajudar no surgimento de patologias. Dessa forma, a composição química, geometria do elemento e condições de aplicação estão relacionadas diretamente com esses processos, fazendo-se necessário a determinação das propriedades de resistência à compressão, resistência à tração e também o módulo de elasticidade do concreto.

5.4.1.1. Resistência a compressão

A resistência a compressão simples (f_c) indica a qual tensão o concreto deve resistir. Para Pinheiro *et al.* (2004) é esta a característica mais importante. Segundo Mehta e Monteiro (1994), a resposta do concreto as tensões aplicadas não depende somente de um tipo de solicitação, mas também de como a combinação de vários fatores afeta a porosidade dos diferentes componentes estruturais do concreto (Figura 5). Ou seja, esses fatores incluem propriedades e proporções dos materiais que compõem o traço do concreto, grau de adensamento e condições de cura, teor de ar incorporado, tipo de cimento, característica dos agregados, uso de aditivos e a relação água/cimento, sendo este o fator mais importante. Ainda deve-se considerar as condições de cura, ou seja, tempo, umidade e temperatura de lançamento e de cura.

Figura 5 - Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto.

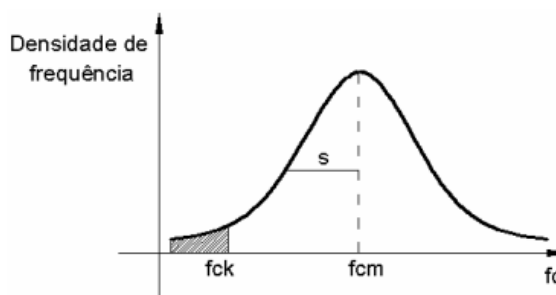


Fonte: Mehta e Monteiro (1994)

A resistência do concreto é determinada através de ensaio de compressão uniaxial. Este é um processo de ensaio indireto realizado em corpos cilíndricos. No Brasil esse ensaio é normatizado pela ABNT NBR 5739:2018 – Ensaio de compressão de corpo de provas cilíndricos e os corpos de provas normatizados pela ABNT NBR 5738:2015 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Neste caso um corpo de prova cilíndrico é submetido a um carregamento que aumenta gradativamente até a ruptura do elemento.

Após ensaio de um número significativo de corpos de prova, pode ser feito um gráfico com os valores obtidos de f_c versus a quantidade de corpos de prova relativos a determinado valor de f_c , afirma Pinheiro *et al.* (2004). Como resultado tem-se uma curva conhecida como Curva Estatística de Gauss ou Curva de Distribuição Normal para a resistência do concreto à compressão, Figura 6.

Figura 6 - Curva de Gauss para a resistência do concreto a compressão



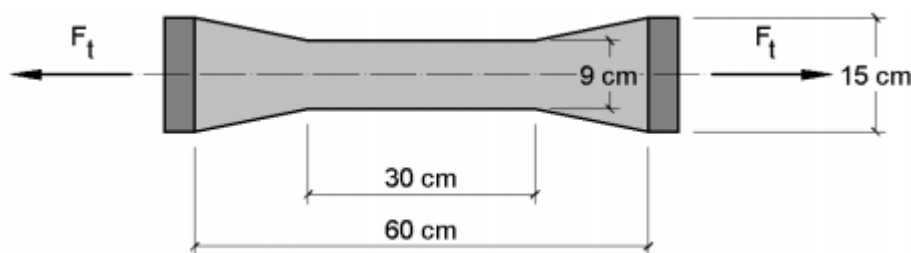
Fonte: Pinheiro *et al.* (2004)

Nesse gráfico podemos encontrar valores importantes, são eles: (f_{cm}) que é a resistência média do concreto a compressão e o (f_{CK}) que é a resistência característica do concreto a compressão.

5.4.1.2. Resistência a tração

Outra propriedade importante do concreto é a resistência a tração, porém grande parte das peças feitas são projetadas com a premissa de que o concreto resistirá às tensões de compressão, mas não às tensões de tração (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Segundo Farias *et al.* (2008) a resistência à tração de um concreto pode ser obtida através de três tipos de ensaio: tração direta, tração por compressão diametral e tração na flexão. Ainda de acordo com os mesmos autores ao citar Mier e Vliet (2002) a tração direta é a mais adequada, principalmente no que diz respeito à análise de fissuração, pois se trata de um valor que mais se aproxima do valor real da resistência à tração do concreto. Porém esse tipo de ensaio (Figura 7) é pouco utilizado devido a sua complexidade quando comparado aos outros métodos.

Figura 7 - Ensaio de tração direta

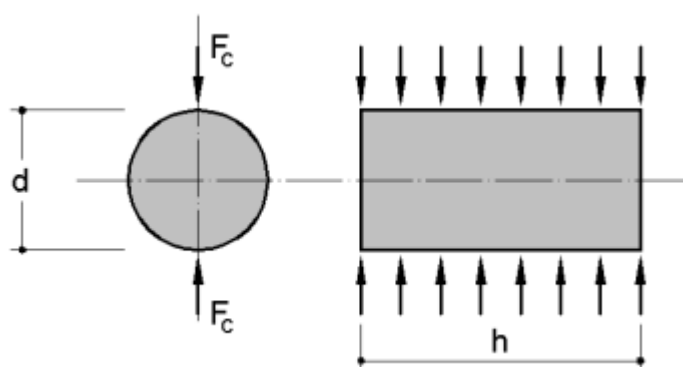


Fonte: Pinheiro et al. (2004)

Os métodos indiretos para determinação da resistência a tração são realizados através de ensaios por compressão diametral e tração na flexão. O primeiro ensaio é realizado de acordo com a ABNT NBR 7222:2011 - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (Figura 8), onde um corpo de prova é submetido a uma tensão de compressão na geratriz do cilindro até a fratura devido a tração desenvolvida em planos diametralmente opostos. Já a tração por flexão (Figura 9), é determinada por ensaios

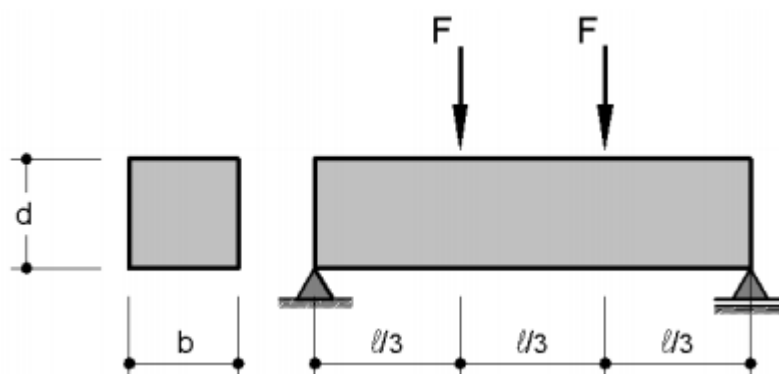
realizados de acordo com a ABNT NBR 12142:2010 - Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, onde um corpo de prova prismático é submetido à flexão, com carregamentos com duas seções simétricas, até a ruptura.

Figura 8 - Ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Pinheiro et al. (2004)

Figura 9 - Ensaio de tração na flexão



Fonte: Pinheiro et al. (2004)

5.4.2. Propriedades térmicas do concreto

As propriedades térmicas do concreto são de grande importância e estão diretamente ligadas ao desenvolvimento de temperatura no concreto. O conhecimento dessas propriedades é fundamental para controlar as variações de volume dentro de certos limites e disciplinar a dissipação do calor gerado pelo concreto, afirma Liduário (2006), confirmado por Nevielle (2013) ao dizer que o estudo das propriedades térmicas do

concreto é interessante por diversas razões. Por exemplo: a condutividade e a difusividade térmicas são relevantes para o surgimento de gradientes de temperatura, deslocamentos e fissuras nas primeiras idades do material.

5.4.2.1. Coeficiente de dilatação

Quando um material é submetido a uma variação de temperatura, este pode se expandir ou contrair. A maioria dos materiais se expandem quando são aquecidos e se contraem quando são resfriados. Teoricamente, o coeficiente de dilatação térmica é definido como uma deformação por grau de temperatura (CIFUENTES, 2020). Ou seja, o coeficiente de dilatação térmica é o quanto de variação linear ocorre em um comprimento unitário devido a uma variação unitária de temperatura (SOUSA *et al.*, 2014). Essa é uma propriedade importante e está diretamente relacionada a variação volumétrica, que ainda segundo Sousa et al. (2014) às variações volumétricas decorrentes de gradientes térmicos que a estrutura venha a ter. E, juntamente com a capacidade de deformação, pode-se definir limites de gradientes de temperatura cuja extrapolação pode ter como consequência a fissuração do concreto.

O coeficiente de dilatação térmica pode ser determinado de acordo com a NBR 12815:2012 - Concreto endurecido — Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear — Método de ensaio. Este ensaio consiste basicamente na exposição de corpos de prova cilíndricos com um extensômetro do tipo Carlson embutido submetidos a uma variação de temperatura. O coeficiente de dilatação térmica (α) em deformação específica por °C e determinado pela seguinte equação:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_q - \varepsilon_f}{T_q - T_f} \quad (1)$$

Onde:

α = Coeficiente de dilatação térmica linear ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$);

ε_q = Deformação linear específica na leitura de origem estabilizada ($\times 10^{-6}$)

ε_f = Deformação linear específica na leitura na sala de ensaio ($\times 10^{-6}$);

T_q = Temperatura interna do corpo de prova na origem ($^{\circ}\text{C}$);

T_f = Temperatura interna do corpo de prova na sala de ensaio (°C);

Já a ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento define valor do coeficiente de dilatação térmica como sendo $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ para efeito em análises estruturais.

5.4.2.2. Calor específico

O calor específico é um parâmetro físico que expressa a capacidade de um material armazenar calor, afirma (FARIA, 2004), ou seja, o calor específico corresponde a quantidade de calor para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa. Para Carneiro *et al.* (2011) é notável que o calor específico não é um parâmetro que varia muito, e isso se dá pelo fato de ser uma característica intrínseca do concreto. Ou seja, não é uma propriedade que vale a pena ser controlado, pois pode não haver variação nos seus valores. Ainda segundo os mesmos autores, quanto menor o calor específico, melhor para o concreto, por armazenar menos calor. Valores típicos do calor específico para concretos normais estão entre 0,84 e 1,26 kJ/(kg·K).

5.4.2.3. Condutividade térmica

A condutividade térmica é a propriedade que indica a quantidade de calor que um determinado material consegue transmitir em uma certa direção. Para Cifuentes (2020) é definida como a razão entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura, segundo o mesmo autor, no concreto essa propriedade depende da composição da mistura, em geral, as características mineralógicas do agregado afetam a condutividade térmica do concreto. Ainda baseado na afirmação de Cifuentes *apud* (Khan, 2002), quanto maior a umidade e a condutividade térmica do agregado, maior será a condutividade do concreto. Por outro lado, a temperatura ambiente pouco altera esta propriedade. Para concretos comuns saturados os valores estão entre 1,4 W/(m.K) e 3,6 W/(m.K) ou 0,0033 cal/(cm.s.°C) e 0,0086 cal/(cm.s.°C) (SOUSA *et al.*, 2014) *apud* (FURNAS, 1997).

A condutividade térmica pode ser determinada pela seguinte equação:

$$k = h^2 * c * \rho \quad (2)$$

Onde:

k = condutividade térmica (W/(m.k) ou J/(m.s.K));

h^2 = difusividade térmica (m²/s ou m²/dia);

c = calor específico (J/kg.K);

ρ = massa específica (kg/m³).

Tabela 2 - Calor de hidratação dos compostos puro

Tipo de agregado	Condutividade térmica W/m.K
Quartzito	3,5
Dolomita	3,2
Calcário	2,6 – 3,3
Granito	2,2 – 2,7
Riolito	2,2
Basalto	1,9 – 2,2

Fonte: Metha e Monteiro (1994)

5.4.2.4. Difusividade térmica

A difusividade térmica é outra propriedade térmica que devemos considerar na análise do comportamento da temperatura em elementos de concreto, pois através dessa propriedade podemos estimar qual o tempo necessário para a dissipação do calor. De acordo com a NBR 12818:2012 - Concreto — Determinação da difusividade térmica — Método de ensaio a difusividade térmica é um índice que permite avaliar a capacidade de um material difundir ou dispersar calor em todas as direções de um maciço e indica a facilidade com que este material é capaz de sofrer variações de temperatura. Quando possuímos valores previamente ensaiados de condutividade, calor específicos e densidade, podemos obter o valor da difusividade térmica analiticamente através da Equação (3). Segundo Cifuentes (2020) *apud* Neville (2011) indica que, para concretos, a difusividade (σ_d) varia entre 0,002 e 0,006 m²/h, de acordo com o tipo de agregado utilizado.

Dessa forma, o calor terá maior facilidade de mover-se pelo concreto quanto maior for a difusividade térmica do mesmo e para um concreto de peso normal a condutividade é quem controla a difusividade, pois a massa específica e o calor específico são de pouca variação (SOUA *et al.*, 2014).

$$\sigma_d = \frac{K}{c \cdot \rho} \quad (3)$$

Onde:

σ_d = difusividade, m²/h

K = condutividade, J/m.h.K

c = calor específico (J/kg.K);

ρ = massa específica (kg/m³).

Tabela 3 - Valor de difusividade térmica para concreto com diferentes agregados graúdos

Agregado Graúdo	m ² /h
Quartzito	0,0054
Dolomita	0,0047
Calcário	0,0046
Granito	0,0040
Riolito	0,0033
Basalto	0,0030

Fonte: Metha e Monteiro (1994) *apud* ACI Committee 207 – Cooling and Insulating Systems for mass concrete, 1986

5.5. PROBLEMAS DE ORIGEM TÉRMICA

Patologias relacionadas ao comportamento térmico do concreto são bastantes comuns, principalmente em climas quentes devido a elevada temperatura de lançamento do concreto e maior taxa de evaporação de água. Esse problema é ainda maior em elementos de grandes dimensões, ou concreto massa. Segundo Neville (2013), nessa

condição os problemas são associados com uma possível fissuração decorrente da elevação e queda da temperatura devido ao calor de hidratação do cimento e pela ação concomitante de restrição às variações de volume.

5.5.1. Fissuração do concreto por tensões térmica

Quando grandes volumes de concreto simples (não armado) são lançados, por exemplo, em barragens de gravidade, existe o risco de fissuração térmica devido à restrição à retração no resfriamento a partir de uma temperatura de pico causada pela hidratação do cimento. Essa fissuração pode levar várias semanas para ocorrer. Independentemente, existe o risco de fissuração térmica nas primeiras idades em seções mais esbeltas, a menos que sejam devidamente armadas.

(NEIVILLE, 2013)

De certa forma, além da fissuração causada pela aplicação de tensões oriundas dos esforços, a variação de volume devido a retração e mudança de temperatura quando são parcialmente ou totalmente restringidos podem levar ao surgimento de tensões que consequentemente causarão fissuração. Ou seja, o calor é mantido no núcleo devido à baixa condutividade térmica, que impedido de se expandir devido as regiões mais frias próximas a superfície que acabam criando uma superfície de restrição, induzindo tensões de tração não suportadas nas primeiras idades do concreto.

Para Cifuentes (2020) as fissuras térmicas podem ocorrer apenas na superfície ou atravessar grande parte da estrutura. As fissuras nas faces geralmente aparecem quando a diferença de temperatura é alta entre o núcleo e a superfície na fase de expansão (aquecimento) do concreto. Ainda segundo Cifuentes (2020), elas também podem ocorrer na fase de contração (resfriamento) se a fôrma for removida cedo demais, especialmente em climas frios. Já as fissuras de maior porte aparecem principalmente na fase de contração e geralmente estão correlacionados com as restrições de estruturas adjacentes. Elas ainda podem surgir na fase de expansão se a temperatura média dentro da peça for grande.

As fissuras são indesejáveis em estruturas de concreto, pois segundo Gambale (2017), as fissuras comprometem a monoliticidade do elemento estrutural, afetam a permeabilidade, a durabilidade, aparência e as tensões internas das estruturas. Já para Neville (2013) apesar da retração (ou expansão) e a variação térmica sejam consideradas como independentes da ocorrência de tensões, a situação real infelizmente não é tão simples. Ainda segundo o mesmo autor, a fissuração térmica deve ser bem distinguida da

fissuração plástica, que ocorre na ou próximo a superfície do concreto ainda em estado plástico, quando da ocorrência da rápida evaporação da água do concreto.

É importante assegurar que a evolução de calor seja controlada, permitindo assim que a mistura desenvolva uma microestrutura densa, homogênea e livre de fissuras (GAMBALE, 2017). Estas tensões podem ser previstas e evitadas tomando algumas precauções já citadas, como por exemplo a escolha do material mais adequado, concretagem por camadas e temperatura adequada do lançamento do concreto de modo a evitar grande temperaturas liberadas durante a hidratação do cimento.

Veremos a seguir alguns fatores que influenciam nas tensões de origem térmicas.

5.5.2. Grau de restrição

Se as estruturas de concreto tivessem total liberdade para se deformar quando sujeitas a uma variação de temperatura, o concreto não seria submetido a nenhum esforço interno, sofrendo apenas variações em suas dimensões, proporcionais aos gradientes térmicos aplicados (GAMBALE, 2017). No entanto as estruturas sempre sofrem com restrições, devido aos elementos no seu entorno, seja com a fundação ou com outros elementos estruturais, ou ainda, segundo o mesmo autor, pelas deformações diferenciais em diferentes áreas do concreto devido à presença de gradientes de temperatura. Ou seja, surgem esforços no interior do elemento devido a essas restrições que podem levar a fissuração caso os esforços gerados sejam maiores que os resistência do concreto.

Para Sousa *et al.* (2011) o grau de restrição representa o quanto a estrutura está restringida à movimentação. No caso de blocos de fundações, quanto menor a relação L/H (L =Largura da peça, H =altura da peça) menor o grau de restrição. É importante a análise do grau de restrição em cada elemento para a determinação das tensões térmicas atuantes.

Segundo Gambale (2017) de acordo com o ACI – American Concrete Institute o coeficiente de restrição pode ser determinador a partir das seguintes equações:

$$Kr = \left[\frac{\frac{L}{H} - 2}{\frac{L}{H} + 1} \right]^{\frac{h}{H}} \quad L/H > 2,5 \quad (4)$$

$$Kr = \left[\frac{\frac{L}{H} - 1}{\frac{L}{H} + 10} \right]^{\frac{h}{H}} \quad L/H \leq 2,5 \quad (5)$$

Onde:

Kr = Coeficiente de restrição;

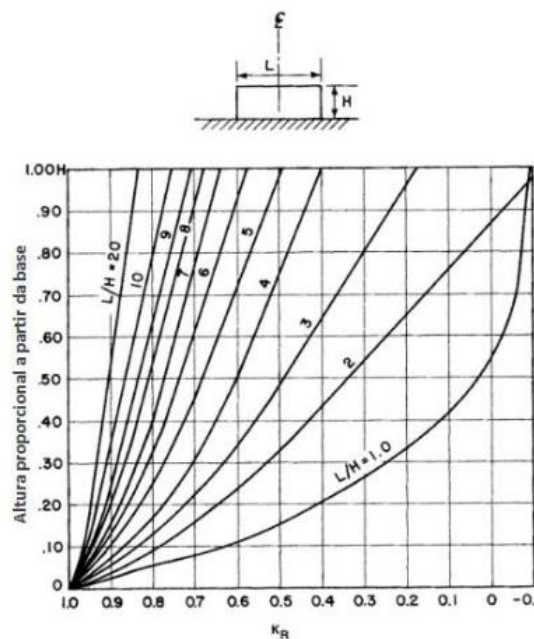
L (m) = comprimento da estrutura;

H (m) = altura da estrutura;

H (m) = altura do nó onde está sendo calculada a tensão.

Em caso de fundações totalmente rígidas, adota-se restrição total (Kr=1), ao passo que se tornam flexíveis esse grau de restrição cai ao ponto que em situações onde há total liberdade de deformação adotamos (Kr =0).

Figura 10 - Coeficiente de restrição segundo o ACI



Fonte: ACI (2007)

5.6. EQUAÇÃO DE ARRHENIUS

Através da equação de Arrhenius (Eq. 6) pode-se determinar a variação da velocidade de uma reação química com a temperatura. Esta formulação matemática foi a primeira a fazer essa quantificação e amplamente utilizada para este tipo de situação.

$$k(T) = A. e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (6)$$

Onde:

$k(T)$ = Constante de velocidade;

A = constante dada pela geometria;

E_a = energia de ativação;

R = constante universal dos gases (8.316 J/mol.K)

T = temperatura absoluta (K)

O valor de $k(T)$ deve variar de acordo a temperatura, o que faz com que a constante de velocidade mude de acordo a temperatura de modo que ao aumentar a temperatura há uma diminuição no $k(T)$. Para que haja uma reação química, as moléculas envolvidas precisam colidir. Segundo Paredes e Bronholo (2013), é necessário que elas possuam uma certa energia (velocidade), para que possam romper uma barreira e reagirem. Esta barreira é dita energia de ativação. Ou seja, essa energia precisa ser superada para que o início da reação aconteça.

Para todas as reações químicas ordinárias (reações simples como a do cimento Portland) e a maioria das reações complexas, a energia de ativação é um parâmetro considerado constante. Sendo assim, ela pode ser obtida através de uma equação de uma reta na forma da equação de Arrhenius.

(PAREDE e BRONHOLO, 2013, apud ATKINS, 1998).

A afirmação de que a equação de Arrhenius pode ser utilizada para quantificar a energia de ativação e a influência da temperatura na velocidade de hidratação do cimento Portland também é dita por Silva (1998), e complementa ao citar ATKINS; JONES, 1997) que a velocidade de reações com pequenas energias de ativação (10kJ/mol, por exemplo) é apenas levemente acelerada com o aumento de temperatura, enquanto esta influência é muito maior naquelas reações com energias de ativação mais elevadas (60kJ/mol, por exemplo).

5.7. ARDUINO

O Arduino é uma plataforma *OpenSource* amplamente utilizada na prototipagem de projetos eletrônicos que consiste basicamente num conjunto de *hardware*, através de uma placa física programável onde pode ser injetado um software que por sua vez é implementado no seu PC através de uma IDE (*Integrated Development Environmen*) que também fica responsável pelo *upload* do *software* para a placa física. Segundo McRoberts (2011) em termos prático, o Arduino é um pequeno computador que você pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. Ainda segundo o mesmo autor, o Arduino é amplamente chamado de plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com o ambiente por meio de *hardware* e *software*.

Existe um grande número de variações de Arduino, com as mais diversas finalidades, que vão desde placas simples e sem nenhum sensor ou módulo embarcado até placas mais avançadas com finalidades específicas que já dispõem de um conjunto de sensores integrados. Um dos modelos mais acessíveis e amplamente utilizado por quem quer iniciar os estudos ou trabalhar com prototipação é o Arduino UNO (Figura 11). Arduino Uno é uma placa microcontrolada baseada no ATmega328P. Possui 14 pinos de entrada / saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um ressonador de cerâmica de 16 MHz (CSTCE16M0V53-R0), uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector ICSP e um botão de reinicialização. (ARDUINO.CC, 2020). Ainda de acordo com a própria Arduino.cc ele contém tudo o que é necessário para dar suporte ao microcontrolador; simplesmente conecte-o a um computador com um cabo USB ou ligue-o com um adaptador AC-DC ou bateria para começar.

Figura 11 - Arduino UNO

Fonte: Arduino.CC (2020)

5.7.1. Aquisição de dados

Na instrumentação, a aquisição de dados consiste em processos para coletar informações de um determinado fenômeno de forma que esses dados possam ser manipulados por um computador. Geralmente esses dados são convertidos em sinais eletrônicos. O processo de aquisição só faz sentido uma vez que é automatizado, segundo Silva *et al.* (2007) ao mencionar Dally *et al.* (1993) diz que a automação na obtenção dos dados tem gerado avanços enormes no controle de ambientes, pois permite rapidez e confiabilidade na aquisição dos dados, contribuindo para a tomada rápida de decisões.

Na plataforma Arduino, como já mencionado, a aquisição de dados é feita através de sensores que permitem monitorar uma determinada característica do ambiente, por exemplo temperatura, umidade, luminosidade ou até mesmo sinais de fumaça. Neste trabalho o foco será apenas na aquisição de dados relacionados a temperatura.

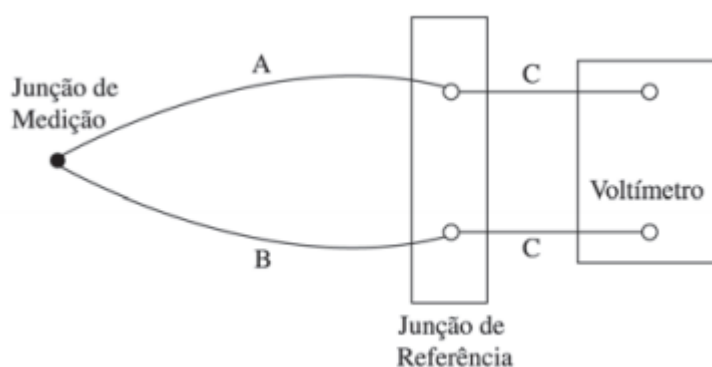
5.7.1.1. Termopar tipo K

Se tratando da aquisição de dados relacionados a temperatura também existe vários sensores, cada um com suas peculiaridades, segundo Martinazzo e Orlando (2016) existe uma vasta gama de sensores de temperatura disponíveis no mercado, variando quanto à precisão, escala de temperatura, e, conseqüentemente, custos. Os sensores mais comuns são os termopares, os RTDs (Pt100, por exemplo) e os termistores.

Figura 12 - Termopar tipo K

Fonte: Autor (2020)

O funcionamento do termopar é baseado na diferença de potencial gerada por dois tipos diferentes de metais unidos em uma das extremidades, conhecida como junta quente. Na outra extremidade o circuito é aberto, conhecido como junção de referência ou junta fria, nesse ponto é inserido um equipamento para a medição da diferença de potencial. Segundo Moreira (2002) a tensão de circuito aberto através da junção de referência é a chamada *tensão de Seebeck* e aumenta à medida que a diferença de temperatura entre as junções aumenta (Figura 13). Ainda segundo Moreira (2002) a *tensão de Seebeck* surge de um gradiente de temperatura é uma propriedade material do fio e não depende de uma junção ou da presença de outros fios no circuito. Ou seja, esse tipo de sensor se difere dos demais por não estar relacionado diretamente à temperatura, mas sim, ao gradiente de temperatura formado ao longo do fio do termopar.

Figura 13 - Circuito para medir o potencial de Seebeck

Fonte: Moreira (2002)

Existem vários tipos de termopares que se diferenciam em relação ao tipo de metal utilizado em cada um dos polos e sua bitola, com a variação dessas características podemos obter intervalos de medição diferente como pode-se observar na Tabela 4. Nesse trabalho será utilizado o termopar do tipo K, pois são termopares genéricos, com preço acessível e contam ainda com boa sensibilidade e precisão.

Tabela 4 - Tipos de sensores Termopar convencional

Tipo	Positivo	Negativo	Referência	Bitola AWG	Intervalo em °C
T	Cobre	Constantan	TP – 16	16 (1,29 mm)	+ 300 a 1700
J	Ferro	Constantan	JN – 08	08 (3,26 mm)	- 200 a 750
J	Ferro	Constantan	JN – 14	14 (1,63 mm)	- 200 a 750
E	Chromel	Constantan	EN – 08	08 (3,26 mm)	- 200 a 900
E	Chromel	Constantan	EM – 14	14 (1,63 mm)	- 200 a 900
K	Chromel	Alumel	KN – 08	08 (3, 26 mm)	- 200 a 1250
S	Platina Rh 10%	Platina	SP – 24	24 (0,50 mm)	0 a 1450
S	Platina Rh 10%	Platina	SP – 27	27 (0,35 mm)	0 a 1450
R	Platina Rh 10%	Platina	RN – 24	24 (0,50 mm)	0 a 1450
R	Platina Rh 10%	Platina	RN – 27	27 (0,35 mm)	0 a 1450
B	Platina Rh 10%	Platina	BN – 24	24 (0,50 mm)	+ 300 a 1700
N*	Nicrosil	Nisil	NP – 08	08 (3, 26 mm)	- 200 a 1350
N*	Nicrosil	Nisil	NP – 14	14 (1,63 mm)	- 200 a 1350

Fonte: Nowicki (2014)

Além do termopar, será utilizado um amplificador de instrumentação com objetivo de amplificar o valor da tensão nos terminais do termopar e estes poderem chegar a níveis de tensão compatíveis com o Arduino.

5.7.2. Persistência dos dados

Além da aquisição das informações, é necessário fazer a persistência das mesmas, para que seja possível fazer uma análise e manipulação desses dados em outro momento. Assim como existe diversas soluções em relação a aquisição de dados relacionados a temperatura, com a persistência de dados não é diferente, existem soluções que vão deste o armazenamento no próprio dispositivo até módulos que permitem a conexão com a internet e envio de dados para a nuvem. Neste trabalho será adotada essa segunda

estratégia, pois será realizada a leitura das informações de forma remota assim como também poder acessar os dados de qualquer local.

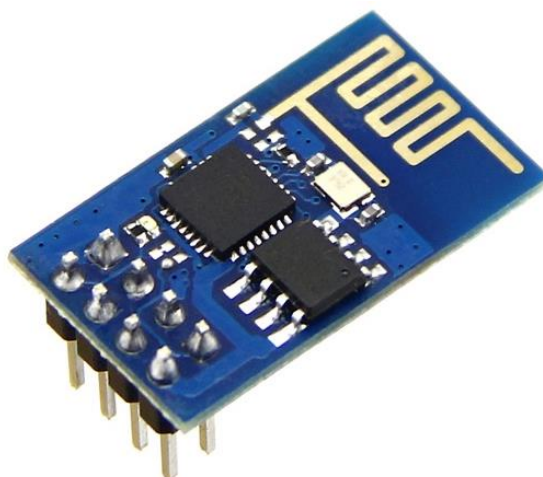
5.7.2.1. Arquitetura cliente-servidor

O modelo cliente-servidor é um tipo de arquitetura de rede em que divide-se a infraestrutura em dois módulos distintos, o lado do cliente que faz as requisições, e o lado do servidor que oferece os serviços e faz o processamento das informações, que por sua vez retorna o resultado pro cliente. Este processo se repete a cada nova solicitação. Para Oliveira (2017) o servidor deve estar sempre disponível, à espera da iniciativa do cliente. Ainda segundo o mesmo autor, o servidor é um *software* que mantém uma porta de comunicação aberta à espera do cliente. Sua localização, seja pelo seu endereço ou nome, deve ser conhecida por todos os clientes que querem acessá-lo.

O Arduino pode ser utilizado tanto como cliente, como servidor, ou ainda trabalhar de forma simultânea, hora sendo cliente, hora sendo servidor. Neste trabalho será adotada a arquitetura cliente-servidor, sendo que o Arduino participará apenas como cliente ao enviar solicitações para o armazenamento das informações por ele coletadas. A arquitetura adotada será mais bem detalhada nos próximos tópicos.

5.7.2.2. Módulo Wi-fi

Para permitir que o Arduino se comunique com o servidor, será utilizado o módulo Wi-fi ESP-01 (Figura 14) que segundo Oliveira (2017) que além do microcontrolador ESP8266, ele possui um módulo de memória externa, encontrado em versões de 512kB ou 1MB. Possui oito pinos, que incluem alimentação, comunicação serial UART e alimentação de 3,3 volts. Apesar desse módulo possuir um próprio processador interno, a sua utilização será de forma combinada com o Arduino, para enviar para um servidor remoto as informações obtidas pelo termopar.

Figura 14 - Módulo ESP-01

Fonte: Filipeflop (2020)

5.7.2.3. Banco de dados MySQL

Após definir todos os elementos para aquisição de dados, comunicação com o servidor remoto e arquitetura de rede nos resta definir onde de fato armazenar os dados dentro do servidor, as possibilidades também são muitas, cada uma com suas especificidades. Para esta tarefa, será adotado o SGBD MySQL que segundo o próprio manual de referência do MySQL 4.1 diz que o MySQL é um servidor robusto de bancos de dados SQL (*Structured Query Language* - Linguagem Estruturada para Pesquisas) muito rápido, multi-tarefa e multi-usuário. O Servidor MySQL pode ser usado em sistemas de produção com alta carga e missão crítica bem como pode ser embutido em programa de uso em massa.

Além disso, o MySQL está sob a licença GPL (*General Public License*), ou seja, é um sistema *OpenSource* e atende perfeitamente as nossas necessidades, além do que é de fácil acesso e possui uma boa curva de aprendizado. Este SGBD deve ser instalado como um dos serviços do nosso servidor e estar disponível para dos os clientes de nossa arquitetura.

5.8. O USUÁRIO COMO CLIENTE

Se de um lado tem-se o Arduino como cliente enviando requisições ao servidor para persistir os dados por ele coletado, na outra ponta temos o usuário fazendo requisições

para visualizar as informações armazenadas no banco de dados. Para que estas solicitações ocorram da forma mais amigável possível, deve ser criada uma interface para permitir a interação do usuário com o banco de dados sem a necessidade de fazer consultas complexas ou a utilização de alguma linguagem de programação para a obtenção destas informações.

5.8.1. Interface web

De uma forma geral, interface está relacionada a comunicação, ou melhor, é uma camada intermediária que permite realizar a comunicação entre elemento que naturalmente não se comunicariam. Segundo Braga (2015), com outras palavras, os usuários detêm o controle de todas as funções de um sistema através da utilização de Interfaces Gráficas de Usuário (*Graphical User Interface - G.U.I.*), ou simplesmente Interface. Ainda de acordo com Braga (2015) citando o dicionário ao dizer que, “interface” significa um ponto comum, uma divisa ou fronteira entre duas coisas.

Já que o trabalho se concentra em uma arquitetura cliente-servidor e deseja-se realizar a comunicação entre o usuário e o Sistema Gerenciador de Banco de Dados – SGBD pode-se utilizar uma interface na própria WEB. Dessa forma pode-se acessar remotamente as informações desejadas via *browser* a partir de qualquer dispositivo que possua um navegador compatível instalado, sem a necessidade de instalação de nenhum outro *software* específico.

Com a criação de uma interface, a comunicação do usuário com o banco de dados fica praticamente transparente, uma vez que todas as consultas SQL ocorrem a partir de ações na interface que executam um determinado código no servidor e mostra na tela do usuário o resultado da consulta. Segundo Winckler e Pimenta (2002) a tecnologia para construção de interfaces WEB vem sendo progressivamente incrementada permitindo o desenvolvimento de aplicações cada vez mais complexas. Ainda segundo os mesmos autores, no início a WEB era apenas um ambiente para publicação de documentos no formato texto e HTML (*Hypertext Markup Language*), ou seja, era um ambiente bastante limitado apenas a leitura e impressão de textos e links com outras páginas. Com o avanço tecnológico vieram os formulários e programas CGIs (*Common Gateway Interface*) que permitem a entrada de dados do usuário e a integração com aplicações de banco de dados.

6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

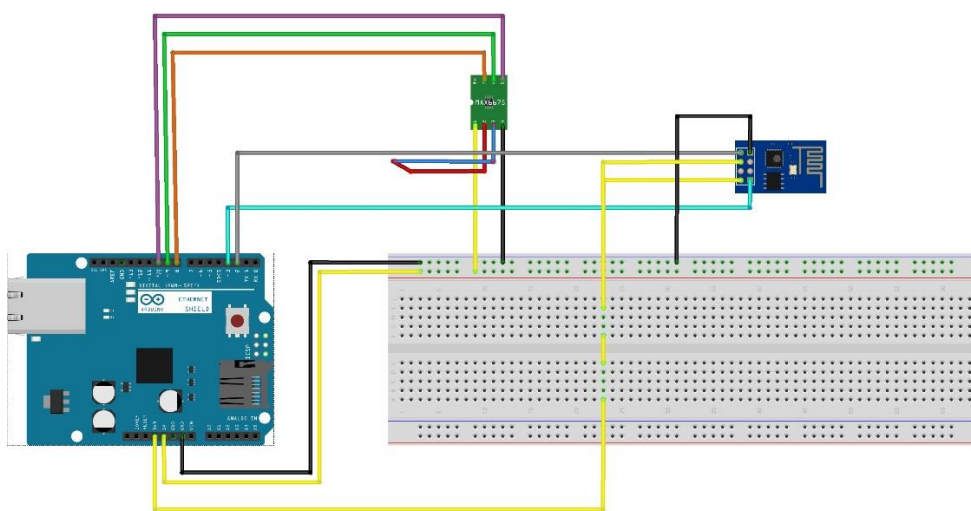
Neste capítulo será descrito os materiais utilizados, características, modelos e quantidades, além de um passo a passo de todo o procedimento aplicado neste trabalho, de forma que o leitor possa compreender algumas decisões tomadas na montagem da forma, traço do concreto e esquematização da arquitetura do sistema, assim como também na prototipação do dispositivo.

6.1. MATERIAIS UTILIZADOS

6.1.1. Arduino e seus componentes

Uma vez definido que seria adotado o Arduino como ferramenta para aquisição dos dados relacionados a temperatura e comunicação com o servidor, foi feito primeiro um diagrama através do software Fritzing (Figura 15) para elaborar de forma esquemática a montagem do circuito elétrico.

Figura 15 - Diagrama com o circuito



Fonte: Autor (2020)

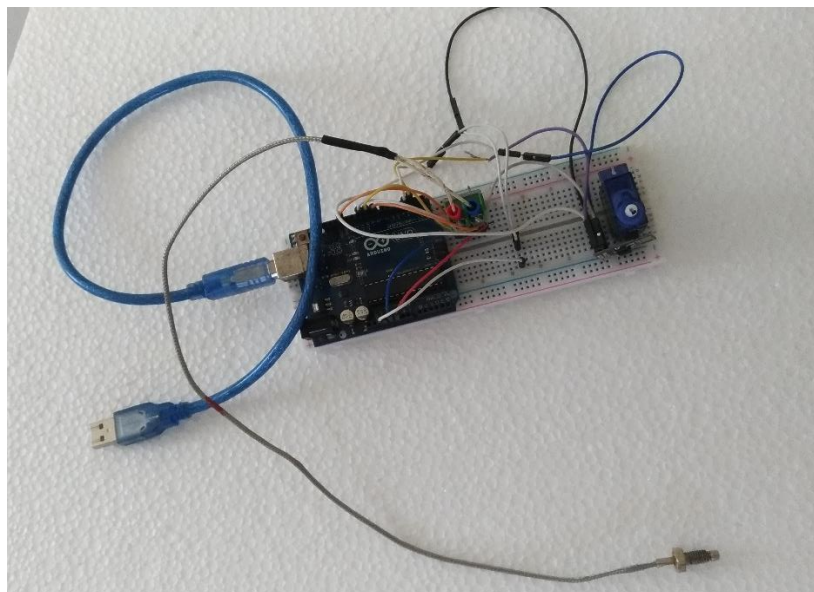
O termopar do tipo K – que é uma sonda revestida com aço inoxidável, está acoplado ao módulo MAX6675, este módulo é o responsável em converter os sinais analógicos em sinais digitais, sua comunicação com o Arduino é feita através do padrão SPI™ (*Serial Peripheral Interface*). Na figura 14 podemos observar que o fio vermelho representa o polo positivo enquanto o azul representa o polo negativo e ambos estão

conectados aos seus respectivos pinos no MAX6675, enquanto que o fio laranja representa a ligação do pino SCK do módulo com o pino 8 do Arduino, o fio verde representa a ligação do pino CS com o pino ~9 do Arduino e o fio roxo representa a ligação entre o SO e o pino ~10. A alimentação é feita através do fio amarelo que liga a saída de 5V do Arduino ao VCC do módulo e por último o fio preto representa a ligação do GRD.

O envio dos dados obtidos para o servidor é realizado através do módulo ESP8266 modelo ESP-01. Este módulo opera sob uma tensão de 3.3V (Pino VCC). Ainda na parte da ligação entre o ESP8266 e o Arduino, o fio preto representa a ligação do GRD e está conectado em seus respectivos pinos. Enquanto que o fio ciano está ligando o Rx do módulo ao pino ~3 do Arduino e o fio cinza conecta o TX ao pino 2. O CH_PD para operação normal deve ser mantido em nível alto, dessa forma também conectaremos ao pino de 3.3V. De acordo com Embarcados (2015) este módulo vem pré-carregados com um firmware que os transformam em “Pontes Serial-WiFi”. Para realizar essa ponte, a interface serial dos módulos obedece a uma tabela de comandos. Os comandos seriais seguem o padrão AT.

Uma vez realizada a montagem do circuito, seguiu para a parte de codificação do software. Para essa tarefa utilizou a própria IDE disponibilizada pelo Arduino. Para a utilização dos módulos já descritos, é necessário a importação da biblioteca max6675.h para o módulo MAX6675, que permite criar a instância do módulo e a utilização da função readCelsius() para obtenção da temperatura e a biblioteca SoftwareSerial.h que permite a comunicação serial entre o Arduino e o SP8266, tornando possível o envio de comandos AT.

O *software* implementado está com seus devidos comentários para melhorar a compreensão e pode ser observado no Apêndice A, na Figura 16 observa-se o circuito montado.

Figura 16 - Circuito Arduino

Fonte: Autor (2020)

6.1.2. Servidor

Para armazenamento e processamento dos dados será utilizado um servidor de hospedagem compartilhada, com configuração de 1GB de memória RAM, 1vCore, 10GB SSD de armazenamento e tráfego e banco de dados MySQL ilimitados. Nesse tipo de aplicação e ainda mais se tratando de uma situação experimental, o consumo de recursos é bem reduzido, uma vez que só há necessidade de armazenamento dos arquivos essenciais para a leitura e persistência dos dados, que consistem basicamente na data, horário da leitura, valor da temperatura obtida e seus identificadores primários, utilizados para fins de consultas. Apesar da interface está publica, como o projeto ainda não é divulgado em grande escala, o consumo de recursos devido ao tráfego também é bastante reduzido, restringindo-se praticamente aos envolvidos neste trabalho.

Na figura 17 podemos observar a estrutura final da arquitetura cliente-servidor montada, nela podemos observar que o sistema está dividido em *backend* e *frontend*, sendo utilizado como tecnologia no *backend* o PHP em sua forma nativa, pois como se trata de prototipação e o intuito é testar a viabilidade do projeto, não há necessidade da utilização de frameworks avançados se tratando do *backend*, para o *frontend* foi adotado o *chat.js* que é uma biblioteca *javascript* para a renderização de gráficos juntamente com o *framework bootstrap*, que nos traz uma interface mais amigável e responsiva com o mínimo de código possível. Os respectivos códigos fonte estão no apêndice B.

Figura 17 - Arquitetura do sistema

Fonte: Autor (2020)

6.1.3. Fôrma

Para a confecção da fôrma, foram selecionados diferentes materiais, cada um com uma finalidade específica, de forma que fosse possível garantir uma estrutura estável para concretagem do bloco de concreto a ser estudado, reduzindo a troca de calor entre o elemento de concreto e o ambiente externo. Sendo assim, escolhemos os seguintes materiais: compensado naval de 10mm de espessura, papel alumínio e EPS de 20mm de espessura. Cada material foi selecionado de acordo com suas propriedades físicas e mecânicas, que foram dispostos em diferentes camadas. Abordaremos o processo de confecção nos tópicos a seguir.

6.1.4. Concreto

O material central deste estudo certamente é o concreto, pois é nele que faremos a análise térmica. Sendo assim, para se obter um bom concreto é indispensável a escolha de bons materiais. Segundo Neville (2014), a produção do concreto é como uma receita de bolo, onde o cimento está para o concreto assim como a farinha está para o bolo; sendo que a qualidade do bolo depende do cozinheiro. Baseado nisso, não basta apenas escolher bons materiais, mas ter total conhecimento do processo de produção, desde a mistura, transporte e até o lançamento do concreto.

O concreto, como já foi mencionado, é composto por um material cimentante, adicionado água e outros agregados. A seleção dos materiais para o traço do concreto foi baseada na disponibilidade nos depósitos de materiais de construção da cidade de Pau dos

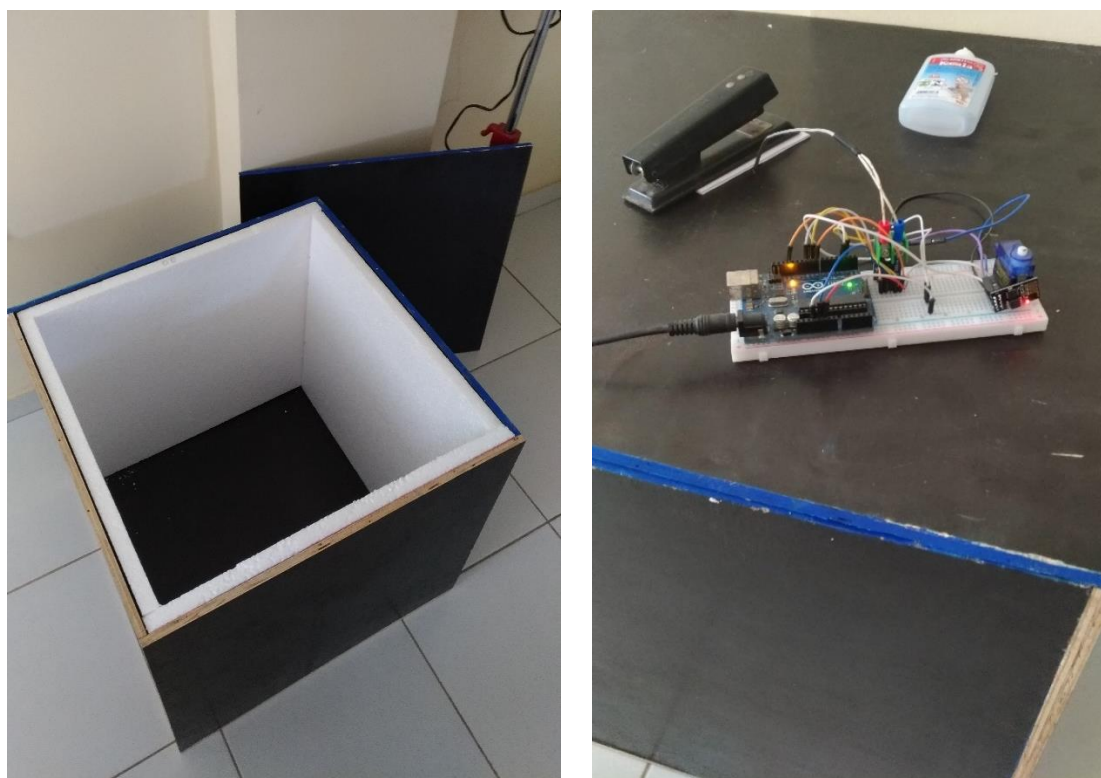
Ferros/RN, sendo assim, utilizaremos o Cimento Portland do tipo CP III, como agregado miúdo, utilizaremos areia lavada média, que é construída basicamente da fragmentação de rochas como basalto, quartzo, sílica, calcário, granito e gnaiss. Esta classe de areia possui diâmetros entre 0,05 a 0,42mm. Como agregado graúdo, utilizaremos a brita 1, que tem máximo de 19mm e são oriundas da fragmentação de rochas de calcário, gnaiss, basalto e granito.

Ainda de acordo com Neville (2014) as possibilidades de mistura do cimento são praticamente infinitas e variam de acordo com a finalidade desejada. Neste caso, apesar do estudo ser feito em um ambiente controlado, foi adotado o traço 1:2:3, pois já é um traço considerado forte e usualmente aplicado em fundações. Ou seja, para a mistura utilizaremos 1 parte de cimento, para 2 partes de areia e 3 partes de brita.

6.2. MÉTODOS

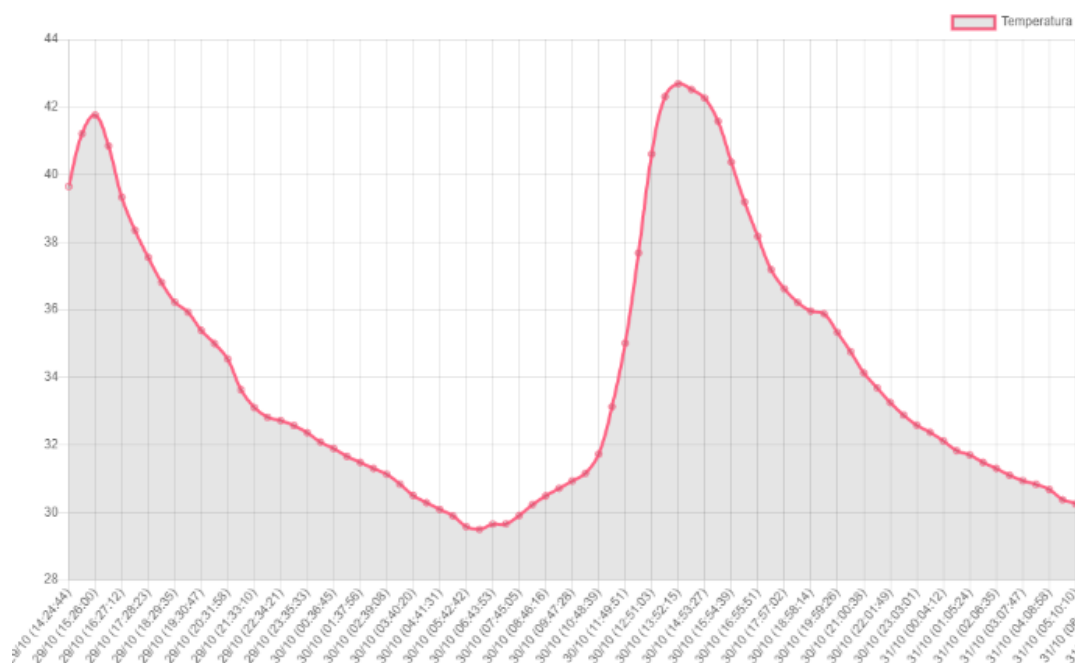
6.2.1. Confecção da fôrma e testes de isolamento térmico

Como fôrma para moldagem do bloco de concreto, foi confeccionado um cubo com aresta de 50cm. O mesmo foi revestido com uma camada interna de EPS com 20mm de espessura. Dessa maneira, obtivemos um volume útil de 97,33cm³ (Figura 18). Foi feito um furo com 15mm de diâmetro na tampa para permitir a passagem do termopar juntamente com seu módulo. Isso facilitará a leitura inicial da temperatura de lançamento do concreto, pois, bastará apenas plugar o módulo do termopar na *protoboard*. Para evitar a troca de calor com o meio externo, após passagem do dispositivo o mesmo foi preenchido com EPS.

Figura 18 – Fôrma para concretagem

Fonte: Autor (2020)

Uma vez com a fôrma fechada e o sensor devidamente posicionado em seu interior, iniciou-se a fase de testes para o processo de monitoramento da temperatura interna e assim verificar o isolamento térmico com o ambiente externo. Como pode-se observar na Figura 19, houve uma grande oscilação da temperatura em seu interior, com uma amplitude térmica de 12.8°C entre a madrugada e a parte da tarde. Isto se deve ao fato de que a mesma estava exposta ao sol, além de estar revestida externamente na cor preta, característica já adquirida com o próprio material. Ou seja, houve uma alta absorção da radiação solar, que apesar da baixa condutividade térmica do EPS, a placa com espessura de 20mm não foi suficiente para conter essa radiação.

Figura 19 - Gráfico da temperatura inicial interna da fôrma

Fonte: Autor (2020)

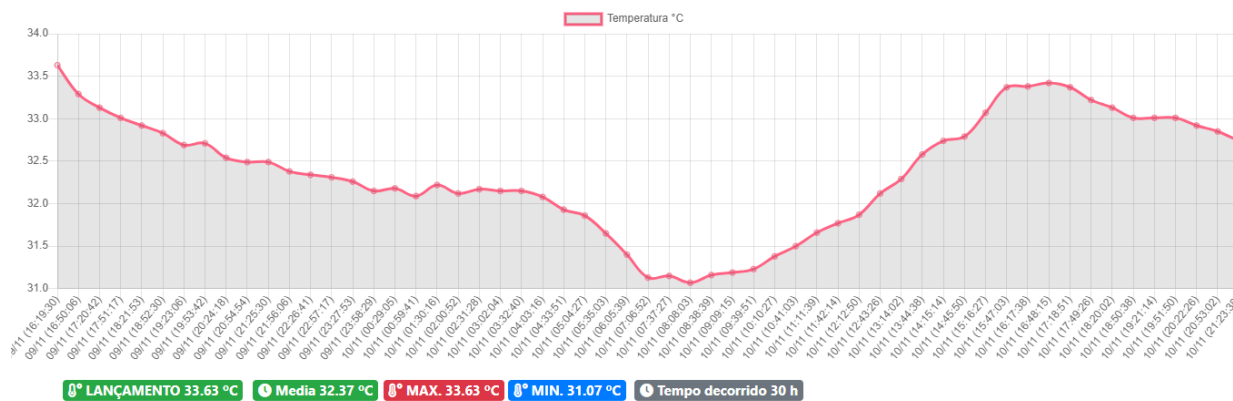
Foi então decidido adicionar uma camada de papel alumínio e mais uma camada externa de EPS também com espessura de 20mm de espessura, ver Figura 20. Além das medias de isolamento, a fôrma foi colocada em um ambiente sem radiação solar direta, com temperatura ambiente média de 31°C. Após esse procedimento, conseguiu-se uma temperatura média de 32.37°C no interior da fôrma e uma variação de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, ainda durante essa fase de testes, o monitoramento foi realizado durante 24h como pode-se visualizar os resultados na Figura 21.

Figura 20 - Fôrma para concretagem com revestimento final



Fonte: Autor (2020)

Figura 21 – Gráfico da temperatura interna com revestimento final da fôrma



Fonte: Autor (2020)

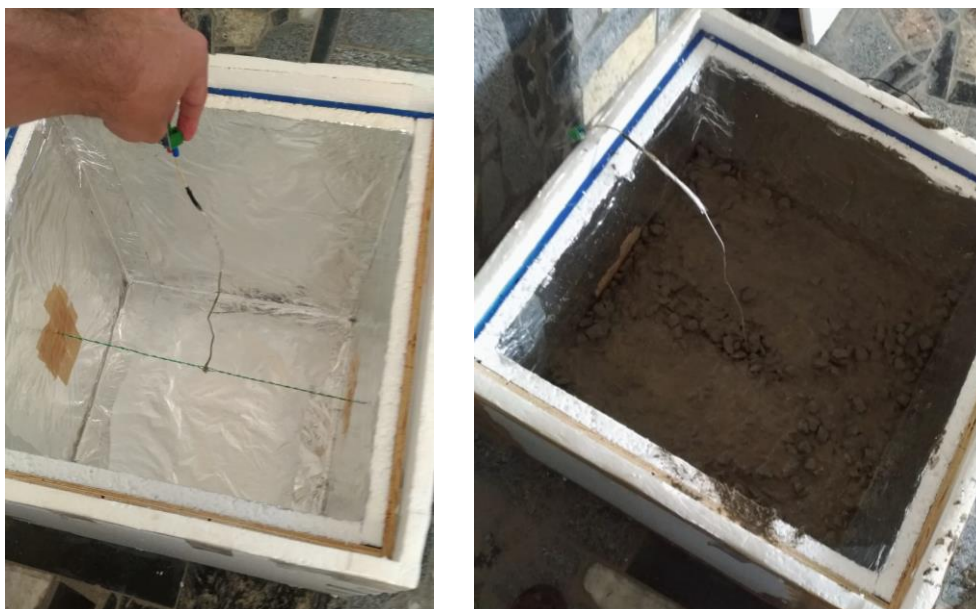
Dessa forma, após resultados satisfatórios de isolamento térmico iniciou-se o processo de produção do concreto, para em seguida fazer o lançamento dentro da fôrma e assim iniciar um novo ciclo de monitoramento, agora por um período maior e com a peça preenchida com o concreto fresco.

6.2.2. Concretagem

A produção do concreto foi realizada de forma manual, seguidas as principais normas técnicas e orientações da ABCP para a produção de concreto. A dosagem do material foi realizada por meio de padiolas, uma vez que esse método é o mais utilizado para a dosagem em volume dos agregados. Foi espalhada uma camada de 15cm de areia e adicionado o cimento sobre a mesma. Na sequência esse material foi misturado até ser obtida uma mistura uniforme, que novamente foi espalhada em forma de camada para na sequência ser adicionado o agregado graúdo sobre a mesma e assim misturar novamente todo o material. Em seguida foi feito um monte com um buraco (coroa) no centro onde foi adicionada a água aos poucos com a mistura em paralelo. Dessa forma foi possível obter um resultado bastante satisfatório para o concreto, ou seja, uma massa plástica e homogênea.

Logo após o processo de mistura, foi realizado o lançamento do concreto dentro da fôrma como pode-se observar na Figura 22 (b), onde a mesma já estava com o termopar posicionado no ponto central, Figura 22 (a). O dispositivo estava fixado por linhas para garantir sua permanência nesta posição durante o processo de lançamento do concreto.

Figura 22 – Processo de lançamento do concreto



(a) Posicionamento do termopar **(b) Lançamento do concreto**

Fonte: Autor (2020)

6.2.3. Monitoramento

Logo após preencher todo o volume da fôrma com o concreto, a mesma foi fechada com a tampa de madeira revestida com isopor e vedada com fita adesiva, para garantir um total isolamento com o meio externo (Figura 23). Na sequência, o módulo do termopar foi acoplado na protoboard que já estava com o circuito devidamente montado com o Arduino, e então o dispositivo foi ligado logo em seguida. Inicialmente foi obtida uma leitura para determinar a temperatura de lançamento do concreto, que estava medindo 34.8°C, como forma de melhorar a precisão e compensar possíveis perdas na leitura, utilizamos um algoritmo de média móvel, que consiste em um *array* definido com 50 posições, que são atualizadas a cada nova leitura, ou seja, a cada novo valor obtido, o primeiro valor do *array* é removido, todos os valores são deslocados de posição e um novo valor é adicionado na última posição, sendo assim, programou-se para realizar 50 leituras dentro de um intervalo de 30 minutos, ou seja, a cada período de 30 minutos é realizada uma nova média, este código pode ser observado no apêndice C.

Figura 23 - Monitoração da temperatura dentro da fôrma



Fonte: Autor (2020)

O sistema estava programado pra se conectar à rede somente quando fosse enviar uma nova requisição para o servidor salvar a informação no banco de dados, que neste caso, estava programado para o intervalo de 30 min.

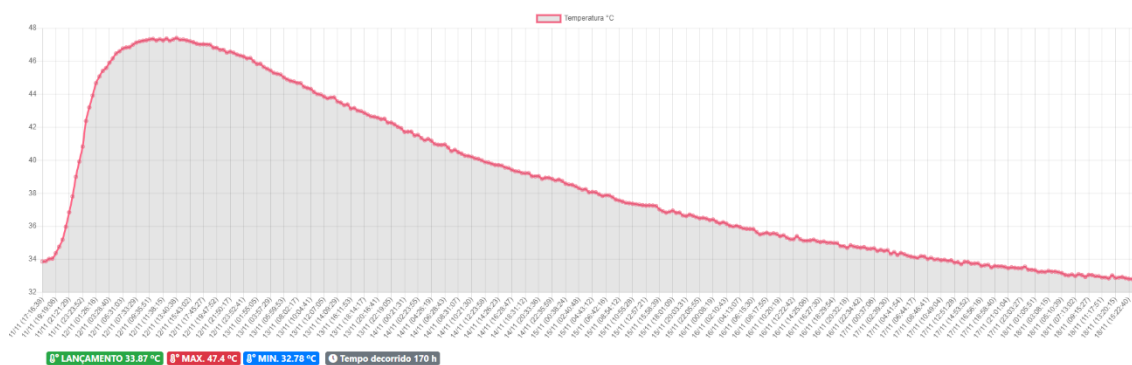
O monitoramento da temperatura no interior do elemento de concreto ocorreu de forma contínua, a cada 30 minutos durante os 7 dias seguintes, como podemos observar nos resultados obtidos no tópico a seguir.

7. RESULTADOS

Em relação ao funcionamento do dispositivo, o mesmo funcionou dentro do esperado, não houve nenhuma falha de conexão com o servidor durante todo o período que o mesmo permaneceu ativo. Todas as leituras também foram realizadas com sucesso, assim como também os algoritmos, seja os embarcados no Arduino, ou os executados do lado do servidor também se comportaram como o esperado.

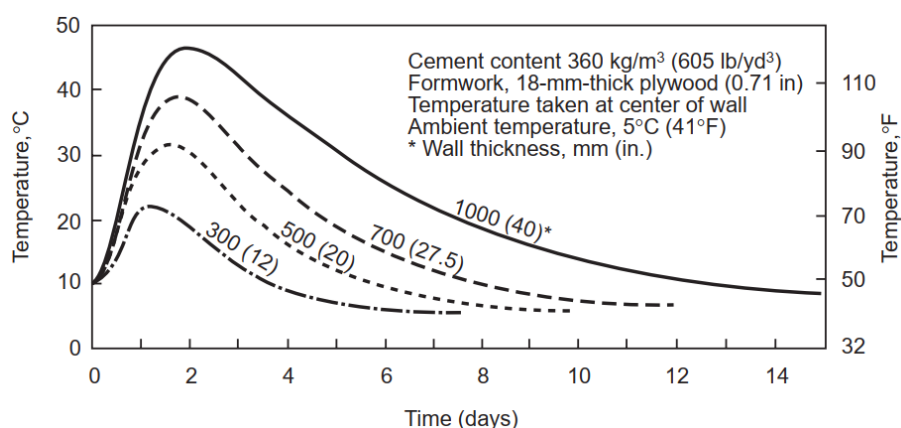
Durante este período de monitoramento, que se iniciou no dia 11 de novembro, às 17 horas e 16 minutos, obtivemos o total de 328 leituras (total de leituras salvas no banco de dados, sem contar com as leituras para fazer a média móvel), que estão disponibilizadas em forma de gráfico na interface do usuário e podem ser observadas na Figura 24.

Figura 24 - Evolução da temperatura no elemento de concreto



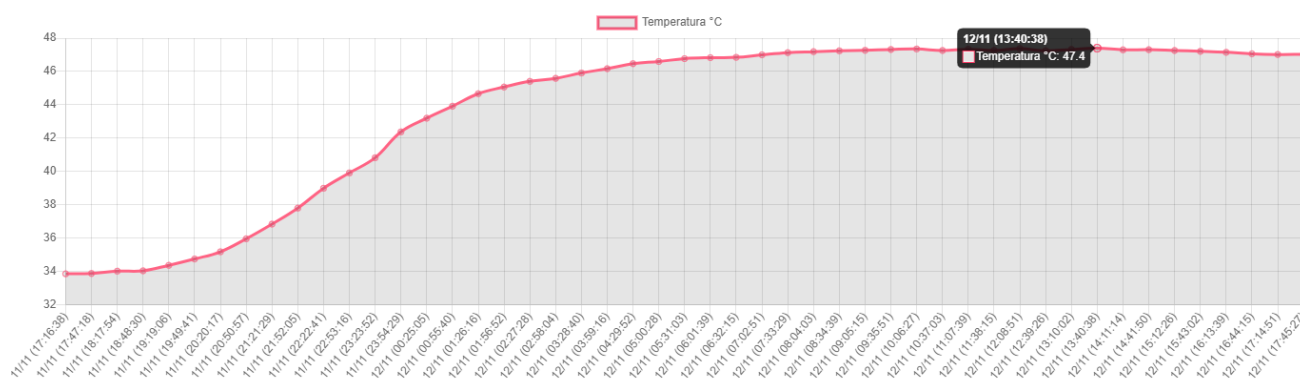
Fonte: Autor (2020)

O comportamento da temperatura do elemento de concreto também ocorreu dentro do padrão quando comparado o modelo característico da curva obtida pela Portland Cement Association (1997), já observados previamente na fundamentação teórica, que consiste em uma grande liberação de calor nas primeiras horas e em seguida um processo mais lento de resfriamento do elemento.

Figura 25 - Curva característica da temperatura do concreto

Fonte: Portland Cement Association (1997)

Em relação aos valores obtidos, não podemos comparar com Portland Cement Association (1997) porque há uma diferença nas dimensões do elemento, tipo de cimento adotado e condições do ambiente e lançamento do concreto. Neste trabalho, o pico máximo de temperatura foi observado às 13:40 do dia 12 de novembro, 20 horas e 29 minutos após o lançamento do concreto, com a temperatura de 47,4°C (Figura 26).

Figura 26 - Pico de temperatura

Apesar da interface do sistema criada para o usuário disponibilizar os dados de forma gráfica, a biblioteca *Chart.js* faz apenas uma linha de suavização entre os pontos plotados no gráfico (tempo x temperatura), para uma análise do ponto de vista estatístico, é necessário fazer o ajuste da curva com a utilização de *softwares* específicos.

8. CONCLUSÃO

Este trabalho possibilitou fazer uma análise de forma prática da viabilidade da utilização do Arduino como ferramenta de monitoramento da temperatura em elemento de concreto. Não apenas de forma isolada, mas utilizando a arquitetura cliente-servidor, para possibilitar uma análise a qualquer momento de forma remota da maneira mais amigável pro usuário.

Do ponto de vista científico, foi importante por discutir um tema bastante importante para a engenharia civil, que é a fissuração causada pelos efeitos térmicos e também disponibilizar uma série de dados que podem ser utilizados em estudos futuros, seja para efeito de comparação com outras aplicações do mesmo tipo ou para modelagem matemática desse tipo de problema.

Neste primeiro momento, o objetivo foi alcançado, que além de todo o trabalho de revisão bibliográfica, era a validação da ferramenta Arduino para esse tipo de análise. Com isso abre-se várias possibilidades de aplicação e estudos dessa proposta, como a continuidade da pesquisa, como por exemplo, através da modelagem numérica para a situação apresentada para que possa ser feito um estudo comparativo entre a modelagem e os resultados obtidos experimentalmente.

Se tratando de produto, essa ferramenta também dá fortes indícios sobre sua aplicação no mercado, uma vez que a aplicação da mesma já foi validada com sucesso. Nesse segundo momento precisa se focado no processo de melhoria, na otimização do *hardware*, que para este trabalho, foi tratado como protótipo para fins de validação e ainda no *software*, que para utilização de forma comercial, também precisa de melhorias. Deve ser contemplados novos requisitos; como disponibilidade, escalabilidade, segurança e mais opções de interação entre o usuário e o sistema, uma vez que aqui foi considerado apenas a visualização dos dados e exportação.

REFERÊNCIAS

ABCP: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - **Levantamento de resultados de ensaios de calor de hidratação em diferentes tipos de cimento**. São Paulo, 2012.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9p.

____ **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9p.

____ **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5p.

____ **NBR 8809**: Cimento Portland - Determinação do calor de hidratação a partir do calor de dissolução — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 14p.

____ **NBR 12006**: Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990. 12p.

____ **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010. 5p.

____ **NBR 12815**: Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete**. Farmington Hills, 2007.

AGUIAR, Gustavo Fernandes; LACERDA, Marcus Vinicius Pinheiro; SILVA, Wellington Cesar Teles da. Controle tecnológico na concretagem de blocos de fundação de grande porte. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, v. 1, n. 5, p. 17-32, maio 2020.

ARDUINO.CC. **Arduino Software (IDE)**. EUA, 2016. Disponível em <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment>>. Acessado em 25 de agosto de 2020.

BARDELA, P. S., et all. **Sistemas de Cura em Concretos Produzidos com Cimento Portland de Alto-Forno com Utilização de Sílica Ativa**. 1º Encontro Nacional de Pesquisa Projeto Produção em Concreto pré-moldado. São Carlos. 2005.

BATTAGIN, A. F. **Cimento Portland**. CONCRETO: Ciência e tecnologia, por Geraldo C. ISAIA, 185-232p. São Paulo, 2011.

BRAGA, Alexandre. Interface: Sistema orientado à visualização. **Geminis**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 125-140, jul. 2015.

CARNEIRO, Guilherme Victor Humberto Soares; GIL, Leonardo Koziel dos Santos; CAMPOS NETO, Manoel Pires. **Calor de Hidratação no Concreto**. 2011. 67 f. - Curso de Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

CAVALCANTI FILHO, A. N. **Contribuição ao controle tecnológico de concretos estruturais de cimento Portland, em ambientes marítimos**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CIFUENTES, Gustavo Aurelio. **Desempenho termomecânico de concreto massa com alto teor de cinza volante**. 2020. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020.

COELHO, Nailde de Amorim. **Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa**. 2012. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

COSTA, Alexandre Aprato Ferreira da; NUNES, Lucas Dornelles. Persistência de Dados no MySQL com Arduino: Uma Proposta Utilizando MySQL Connector / Arduino. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologias**, São Paulo, v. 11, n. 11, p. 101-105, nov. 2016.

FARIA, Étore Funchal de. **Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados**. 2004. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FARIAS, L. A et al. **Ensaaios de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto**, Disponível em: <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081127104112-209.pdf>. Acessado em 28 de setembro de 2020.

FUNAHASHI JÚNIOR, Eduardo Issamu. **Influência do tipo de cimento Portland no desempenho de pastas e argamassas a partir de medidas calorimétricas: uma contribuição ao estudo de desempenho do concreto**. 2018. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Área de Concentração: Tecnologia em Construção de Edifícios, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2018.

GAMBALE, Patrícia Guedes. **Estudo do Calor de Hidratação do Concreto Massa e Contribuição Ao Cálculo Térmico e À Previsão de Fissuras de Retração**. 2017. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2017.

KIHARA, Yushiro; CENTURIONE, Sérgio Luiz. O Cimento Portland. In: **Concreto : ensino, pesquisas e realizações** [S.l: s.n.], p. 295-321, 2005.

LIDUÁRIO, Alfredo Santos. **Contribuição Ao Estudo das Propriedades Térmicas do Concreto Convencional na Presença das Adições Minerais**. 2006. 260 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.

MARTINAZZO, Claodomir Antonio; ORLANDO, Tailan. Comparação entre três tipos de sensores de temperatura em associação com Arduino. **Perspectiva**, Erechim, v. 40, n. 151, p. 93-104, set. 2016.

MCROBERTS, Michael. **Arduino Básico**. São Paulo: Novatec, 2011. 456 p.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. 1.ed. São Paulo: Pini, 573p, 1994.

NEVILLE, A.M; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 448p, 2013.

NOWICKI, Luiz Sérgio. **Uso de tecnologia de redes de sensores sem fio para levantamento do perfil da temperatura em um forno tipo túnel experimental**. 2014. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2014.

OLIVEIRA, Sérgio de. **Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi**. São Paulo: Novatec, 2017. 240 p.

PAREDES, Daniel Cesar Antunes; BRONHOLO, Juliano Henrique. **Efeitos da temperatura da água de amassamento na resistência do concreto**. 2013. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnólogo do Curso de Tecnologia em Concreto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Ufpr, Curitiba, 2013.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P.. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. 2020. Disponível em: <https://www1.univap.br/marketing/publico/ipd/Mestrado-Processamento-Materiais/dissetacoes/2019/argamassa.pdf>. Acesso em 12 de setembro de 2020.

SILVA, Maristela Gomes da; AGOPYAN, Vahan. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimentos de escória de alto-forno**. 1998. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SILVA, Késia O. da; MORAES, Sergio O.; MIRANDA, Jarbas H.; PALMIERI, Anderson M.. Sistema automatizado para aquisição de dados de umidade relativa do ar. **Eng. Agrícola**, Jaboticaval, v. 27, n. 3, p. 630-638, dez. 2007.

SOMBRA, Lucas Gomes. **Automação residencial para controle de iluminação, segurança e monitoramento de temperatura usando o arduino mega**. 2016. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Computação, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2016.

SOUSA, Alex Lucena de; SILVA, Iago Rhuan Rocha da; CASTRO, Paulo Henrique Machado de. **Retração térmica e fissuração em concreto por calor de hidratação**. 2014. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

WINCKLER, Marco; PIMENTA, Marcelo Soares. Avaliação de usabilidade de sites web. **Escola de Informática da SBC SUL (ERI 2002) ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação (SBC)**, v. 1, n. 2002, p. 85-137, 2002.

APÊNDICE A – ALGORITMO EMBARCADO NO ARDUINO

```
// BIBLIOTECAS
=====

#include <max6675.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Arduino.h>

//RX pino 2, TX pino 3
SoftwareSerial esp8266(2, 3);

//CONSTANTES
#define DEBUG true
#define rede "brisa-426358"
#define senha "pwbbp2fq"

#define num 50 //número de iterações da média móvel

//VARIÁVEIS GLOBAIS
String data, tempSTR, tempNormal;
String server = "tcc.talesoliveira.com";

boolean calibrado, lancamento = false;

float values[num]; //vetor com num posições, armazena os valores para cálculo
da média móvel

float adc_noise1, //armazena a leitura sem filtro da entrada analógica
      adc_noise2; //armazena a leitura filtrada da entrada analógica

int contaCalibra = 0;
int intervalo;

int ktcSO = 8; //PINO DIGITAL (SO)
int ktcCS = 9; //PINO DIGITAL (CS)
int ktcCLK = 10; //PINO DIGITAL (CLK / SCK)

//CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS PINOS (CLK, CS, SO)
MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);

//PROTOTIPO DAS FUNÇÕES AUXILIARES =====
String sendData(String command, const int timeout, boolean debug);
```

```

float moving_average(float sig);
void principal(String tempSTR, String tempNormal);

// CONFIGURAÇÕES INICIAIS =====
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    esp8266.begin(115200);

    //RESETA E CONECTA A REDE WIFI
    sendData("AT+RST\r\n", 2000, DEBUG); // rst
    sendData("AT+CWMODE=3\r\n", 1000, DEBUG);
    sendData("AT+CWJAP=\"brisa-426358\", \"pwbbp2fq\"\r\n", 2000, DEBUG);
    delay(2000);
}

// LOOP INFINITO =====
void loop(){

    if(calibrado == false){
        contaCalibra++;
        float temperatura = ktc.readCelsius();
        adc_noise2 = moving_average(temperatura);
        delay(1000);

        if(contaCalibra == 50){
            calibrado = true;
            String mediaCalibrada = String(adc_noise2);
            Serial.println("Primeira média móvel = " + mediaCalibrada);
            principal(mediaCalibrada, mediaCalibrada);
        }

    } else {

        String tempSTR, tempNormal, mediaCalibrada;

        if( lancamento == false){
            principal(mediaCalibrada, mediaCalibrada);
            lancamento = true;
        } else {
            for (int i = 0; i <= 60; i++) {
                //Faz a leitura da temperatura medida pelo termopar
                float temperatura = ktc.readCelsius();
            }
        }
    }
}

```

```

    String original = String(temperatura);

    adc_noise2 = moving_average(temperatura);
    tempNormal = String(adc_noise2);

    //Conveter para String para enviar pela url
    tempSTR = String(original);

    //Apenas para efeito de teste no log
    Serial.println("Original = " + original);
    Serial.println("normal = " + tempNormal);
    delay(30000);
}

    principal(tempSTR, tempNormal);
}
}
}

// FUNÇÕES AUXILIARES =====

//=====
// Função para enviar os comandos AT para o módulo ESP
//=====

String sendData(String command, const int timeout, boolean debug){

    String response = "";
    esp8266.print(command);
    long int time = millis();

    while ( (time + timeout) > millis()){
        while (esp8266.available()){
            char c = esp8266.read();
            response += c;
        }
    }

    if (debug){
        Serial.print(response);
    }
}

```

```

    return response;
}

//=====
// MÉDIA MÓVEL
//=====
float moving_average(float sig)
{
    int i;                //variável auxiliar para iterações
    float acc = 0;        //acumulador

    //Desloca o vetor completamente eliminando o valor mais antigo
    for(i = num; i > 0; i--) values[i] = values[i-1];

    values[0] = sig;      //carrega o sinal no primeiro elemento do vetor

    // long sum = 0;      //Variável para somatório

    for(i = 0; i < num; i++) acc += values[i];
    return acc / num;     //Retorna a média móvel
} //end moving_average

//=====
// PRINCIPAL
//=====

void principal(String tempSTR, String tempNormal){

    data = String("temp=");
    data = data + tempSTR;

    //Inicia a conexão TCP com o servidor
    esp8266.println("AT+CIPSTART=\"TCP\", \"" + server + "\",80");

    //Verifica se conectou
    if (esp8266.find("OK")) {
        Serial.println("TCP Conectado com sucesso!");
    }
}

```

```

//TEMPO DE ESPERA ENTE AS LEITURAS
delay(1000);

//URL no servidor que receberá a temperatura como parâmetro
String uri =
"http://tcc.talesoliveira.com/inserir2.php?temp="+tempNormal;

//CORPO DA REQUISIÇÃO E TIPO
String postRequest = String("POST ");
postRequest = postRequest + uri + " HTTP/1.1\r\n" +
"Host: " + server + "\r\n" +
"Accept: *" + "/" + "*\r\n" +
"Content-Length: " + data.length() + "\r\n" +
"Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\r\n" +
"\r\n" + data;

//Quantidade de caracteres a ser enviados
String sendCmd = "AT+CIPSEND=";
esp8266.print(sendCmd);
esp8266.println(postRequest.length());
delay(500);

// PARA EFEITOS DE ACOMPANHAMENTO NO SERIAL MONITOR (OPCIONAL)
Serial.println("Enviando dados...");
esp8266.print(postRequest);

Serial.print("Dado enviado: ");
Serial.println(tempSTR);
Serial.print("Tamanho do dado: ");
Serial.println(tempSTR.length());
Serial.print("Solicitação enviado: ");
Serial.println(postRequest);
Serial.print("Tamamnho da solicitação: ");
Serial.println(postRequest.length());

// ENVIO DA SOLICITAÇÃO
if( esp8266.find("SOLICITAÇÃO ENVIADA COM SUCESSO")) {
    Serial.println("Pacote enviado");
    while (esp8266.available()) {
        String tmpResp = esp8266.readString();
        Serial.println(tmpResp);
    }

    //ENCERRA A CONEXÃO

```

```
        esp8266.println("AT+CIPCLOSE");  
    }  
}
```