

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**EDUARDO JARCZEWSKI DE OLIVEIRA**

**PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS PELO  
MÉTODO DA MATURIDADE: INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO E CURA**

**Alegrete  
2022**

**EDUARDO JARCZEWSKI DE OLIVEIRA**

**PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS PELO  
MÉTODO DA MATURIDADE: INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO E CURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Fernanda B. Pereira da Costa

Coorientador: Celso Nobre da Fonseca

**Alegrete  
2022**

**EDUARDO JARCZEWSKI DE OLIVEIRA**

**PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS PELO MÉTODO DA  
MATURIDADE: INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO E CURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 16 de agosto de 2022.

Banca examinadora:

Profa. Dra. FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA - UNIPAMPA - Orientadora

Prof. Me. CELSO NOBRE DA FONSECA - UNIPAMPA - Coorientador

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA

Prof. Dr. LUIS EDUARDO KOSTESKI - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CELSO NOBRE DA FONSECA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/08/2022, às 12:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/08/2022, às 14:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/08/2022, às 14:17, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/08/2022, às 14:59, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0900796** e o código CRC **6D541EDE**.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço em primeiro lugar a minha família que confiou em mim, me ajudou a desenvolver meu potencial, me apoiou nos momentos mais difíceis e nos momentos felizes que esta jornada me proporcionou.

Agradeço aos meus professores da graduação, que se dedicaram e fizeram o seu melhor para transmitir os seus conhecimentos, experiências e histórias comigo, acrescentando de maneira significativa em minha vida acadêmica e profissional.

Em especial gostaria de agradecer a professora Fernanda Bianchi Pereira da Costa minha orientadora, em todo o apoio e auxílio me dado não só na minha pesquisa para a conclusão de curso, mas também em todo o decorrer da minha caminhada acadêmica.

Agradecer ao professor Celso Nobre da Fonseca, que me auxiliou no desenvolvimento prático da minha pesquisa de curso, sem medir esforços e tempo para que essa pesquisa pudesse ser realizada com sucesso. Um agradecimento especial aos técnicos Gerson Evandro de Oliveira Sena e Thales Santos Lima do laboratório de eletrônica que também nos auxiliaram com que a pesquisa pudesse ser desenvolvida com sucesso.

Agradeço aos meus colegas de graduação que me auxiliaram a desenvolver minha pesquisa, participando de maneira efetiva e presencial no desenvolvimento e elaboração da pesquisa. Agradecer aos meus demais colegas que me auxiliaram na caminhada acadêmica, me proporcionando adquirir experiências acadêmicas e profissionais.

E agradeço ao meu Pai Celestial que me deu forças, animo, conhecimento, persistência, discernimento, sabedoria, paciência para que eu pudesse concluir o meu objetivo em realizar o meu sonho.

## RESUMO

A necessidade de monitoramento contínuo das estruturas de concreto é de extrema importância, uma vez que o responsável técnico, muitas vezes, não tem a disponibilidade de estar em tempo integral na obra para a verificação de todos os processos construtivos. Além disso, após a execução de estruturas e/ou elementos de concreto, a realização de ensaios destrutivos se torna inviável. Por outro lado, os ensaios não destrutivos que auxiliam na análise sem afetar a estrutura ou execuções que já foram realizadas, não fornecem resultados precisos de resistência do concreto. Para diminuir esses erros, um método que auxilia a determinar a resistência final de um concreto *in loco*, é o uso de sensores e o método da maturidade. Esse método possibilita prever a resistência à compressão do concreto através da relação do tempo e temperatura. Assim, este trabalho apresentara um estudo sobre o método da maturidade utilizando um mesmo traço para dois tipos de cimento (CP IV e CP V ARI RS) e dois tipos de cura (ambiente de laboratório e submersa em água). O objetivo é obter curvas de resistência à compressão pelo fator tempo-temperatura (índice de maturidade) no intuito de estimar a resistência dos concretos em qualquer idade desejada para diferentes condições. Para realização dos ensaios foi utilizado corpos de provas cilíndricos de 100mm x 200mm, divididos entre o monitoramento da temperatura interna continuamente até a idade de 28 dias, e corpos de prova rompidos nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias. Para tanto, foi utilizado o Arduino na coleta dos dados. Como resultado, foi possível verificar como o tipo de cimento e o tipo de cura podem influenciar na resistência à compressão dos concretos. Por fim, indica-se, para estimar a resistência à compressão do concreto em obra em épocas típicas do inverno, utilizando-se o mesmo traço estudado, o uso das curvas considerando a cura ambiente para o CP IV e a cura submersa para o CP V, obtendo-se, assim, valores de resistência cerca de 13% subestimados, estando a favor da segurança da estrutura de concreto monitorada.

Palavras-Chave: resistência à compressão do concreto, sensor de temperatura, método da maturidade, Arduino.

## ABSTRACT

The need for continuous monitoring of concrete structures is extremely important, since the technician in charge, often, does not have the availability to be full time on the work to verify all construction processes. In addition, after the execution of structures and/or concrete elements, carrying out destructive tests becomes unfeasible. On the other hand, non-destructive tests that help in the analysis without affecting the structure or executions that have already been carried out, do not provide accurate results of concrete strength. To reduce these errors, a method that helps to determine the final strength of a concrete in situ is the use of sensors and the maturity method. This method makes it possible to predict the compressive strength of concrete through the relationship of time and temperature. Thus, this work presents a study on the maturity method using the same mix for two types of cement (CP IV and CP V ARI RS) and two types of curing (laboratory environment and submerged in water). The objective is to obtain compressive strength curves by the time-temperature factor (maturity index) in order to estimate the strength of concrete at any desired age for different conditions. To carry out the tests, cylindrical specimens measuring 100mm x 200mm were used, divided between monitoring the internal temperature continuously until the age of 28 days, and broken specimens at the ages of 1, 3, 7, 14 and 28 days. Therefore, Arduino was used to collect the data. As a result, it was possible to verify how the type of cement and the type of cure can influence the compressive strength of concrete. Finally, to estimate the compressive strength of concrete at work in typical winter seasons, using the same trace studied, it is indicated the use of curves considering ambient curing for CP IV and submerged curing for CP V, thus obtaining resistance values about 13% underestimated, in favor of the safety of the monitored concrete structure.

Keywords: concrete compressive strength, temperature sensor, maturity method, Arduino.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo de Hidratação do cimento Portland .....	17
Figura 2 – Exemplo de uma relação entre resistência à compressão e fator temperatura-tempo.....	19
Figura 3 – Exemplo de uma relação entre resistência à compressão e idade equivalente a 20 °C.....	20
Figura 4 – Esquema do histórico de temperatura e do fator temperatura-tempo ....	21
Figura 5 – Gráfico da Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	25
Figura 6 – Gráfico da Distribuição granulométrica do agregado graúdo .....	26
Figura 7 – Sensor PT-100 .....	26
Figura 8 – Arduino e Protoboard .....	27
Figura 9 – Ligação da Protoboard ao Arduino.....	27
Figura 10 – Corpo de prova com o sensor PT-100 .....	28
Figura 11 – Fluxograma de divisão de corpos de prova.....	29
Figura 12 – Legenda da Figura 11. ....	30
Figura 13 – Quantidade de corpos de prova rompidos por idade.....	30
Figura 14 – Esquema elétrico utilizado .....	34
Figura 15 – Resistência à compressão média vs. idade .....	36
Figura 16 – Resistência à compressão vs. Fator Tempo-Temperatura (valores médios) .....	37
Figura 17 – Resistência à compressão vs. Fator tempo-temperatura para concretos com CP IV: curvas comparativas considerando diferentes tipos de cura. ....	39
Figura 18 – Resistência à compressão vs. Fator tempo-temperatura para concretos com CP V: curvas comparativas considerando diferentes tipos de cura. ....	40
Figura 19 – Resistencia estimada CP IV para maturidade aos 21 dias.....	41
Figura 20 – Resistencia estimada CP V para maturidade aos 21 dias.....	43
Figura 21 – Esquema elétrico com amplificador.....	61
Figura 22 – Gráfico CP IV cura ao ar livre.....	66
Figura 23 – Gráfico CP IV cura submersa.....	66
Figura 24 – Gráfico CP V cura ao ar livre.....	67
Figura 25 – Gráfico CP V cura submersa.....	67

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição dos diferentes tipos de cimento Portland .....	24
Quadro 2 – Código utilizado na pesquisa .....	33
Quadro 3 – Resistências médias e desvio Padrão. ....	35
Quadro 4 – Controle temperatura e umidade. ....	36
Quadro 5 – Exemplo de variáveis utilizadas para o cálculo da maturidade utilizando a equação de Nurse-Saul. ....	37
Quadro 6 – CP IV maturidade aos 21 dias. ....	40
Quadro 7 – Resultados resistência estimada CP IV aos 21 dias.....	41
Quadro 8 – CP V maturidade aos 21 dias. ....	42
Quadro 9 – Resultados resistência estimada CP V aos 21 dias.....	43
Quadro 10 – Leituras do dia 1 a serem convertidas. ....	52
Quadro 11 – Leituras do dia 2 a serem convertidas. ....	53
Quadro 12 – Leituras do dia 3 a serem convertidas. ....	54
Quadro 13 – Leituras do dia 4 ao dia 7 a serem convertidas. ....	55
Quadro 14 – Leituras do dia 8 a serem convertidas. ....	56
Quadro 15 – Leituras do dia 9 a serem convertidas. ....	56
Quadro 16 – Leituras do dia 10 a serem convertidas. ....	56
Quadro 17 – Leituras do dia 11 ao dia 13 a serem convertidas. ....	57
Quadro 18 – Leituras do dia 14 a serem convertidas. ....	57
Quadro 19 – Leituras do dia 15 a serem convertidas. ....	57
Quadro 20 – Leituras do dia 16 a serem convertidas. ....	58
Quadro 21 – Leituras do dia 21 a serem convertidas. ....	58
Quadro 22 – Leituras do dia 22 a serem convertidas. ....	58
Quadro 23 – Leituras do dia 23 a serem convertidas. ....	58
Quadro 24 – Leituras do dia 24 a serem convertidas. ....	59
Quadro 25 – Leituras do dia 25 ao dia 27 a serem convertidas. ....	59
Quadro 26 – Leituras do dia 28 a serem convertidas. ....	59
Quadro 27 – Código com amplificador. ....	60
Quadro 28 – Temperaturas registradas.....	62
Quadro 29 – Arredondamento das Temperaturas registradas. ....	62
Quadro 30 – Resistências a compressão por idade. ....	63

Quadro 31 – Temperaturas utilizadas para o cálculo da maturidade.....	64
Quadro 32 – Fator tempo-temperatura para todas as idades.....	65

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

FHP - Freiesleben-Hansen e Pederson

CPs – Corpos de Prova

Sd – Desvio Padrão

## **LISTA DE SIGLAS**

Al – Alumínio

Si - Silício

Ca - Cálcio

Mg – Magnésio

Ea – Energia aparente de ativação

CP-IV – Cimento Portland IV

CP-V – Cimento Portland V

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

ASTM - American Society for Testing and Materials

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3.1</b>	<b>OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3.2</b>	<b>OBJETIVO ESPECÍFICO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>INFLUÊNCIA DA CURA E PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO NA RESISTENCIA MECÂNICA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3</b>	<b>MÉTODO DA MATURIDADE.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1</b>	<b>EQUAÇÃO DE NURSE-SAUL – FUNÇÃO DE MATURIDADE.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2</b>	<b>EQUAÇÃO DE ARRHENIUS – CONCEITO DE IDADE EQUIVALENTE.....</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1.1</b>	<b>CIMENTO PORTLAND.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1.2</b>	<b>AGREGADO MIÚDO.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1.3</b>	<b>AGREGADO GRAÚDO.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.4</b>	<b>SENSOR.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.5</b>	<b>ARDUINO E PROTOBOARD.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>MÉTODO.....</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>45</b>
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>45</b>
<b>5.2</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>47</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>49</b>
<b>ANEXO A - DADOS DAS LEITURAS DO ARDUINO QUE DEVEM SER CONVERTIDOS EM TEMPERATURAS.....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO B – CÓDIGO E ESQUEMA ELÉTRICO COM USO DE AMPLIFICADOR.....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO C – CALIBRAGEM DAS TEMPERATURAS... ..</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO D – RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS DOS CORPOS DE PROVA POR IDADE... ..</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO E – TEMPERATURAS DOS CÁLCULOS DA MATURIDADE.....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO F – CÁLCULOS FATOR TEMPO-TEMPERATURA.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO G – GRÁFICOS RESISTÊNCIA X FATOR TEMPO-TEMPERATURA, COMPARAÇÃO ENTRE SENSORES DO MESMO TRAÇO COM CURAS DISTINTAS... ..</b>	<b>66</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Neste trabalho será discutido a eficácia da utilização do método de maturidade no concreto. Será apresentado o porquê o método é de interesse a ser estudado, e a justificativa pela qual foi escolhido como tema de pesquisa.

Nos tópicos seguintes deste trabalho será apresentado quais são os objetivos que se pretende alcançar, uma literatura que auxiliará o entendimento sobre o método de maturidade, e como será realizada tal pesquisa e quais comparações serão observar.

A execução da pesquisa será realizada seguindo todas as normas e as diretrizes que são necessárias, buscando com que o estudo possa apresentar resultados com a maior confiabilidade possível.

### **1.1 Contextualização do tema**

Quando planejado uma edificação vários processos construtivos são projetados, tais processos exigem um monitoramento de sua execução, uma mão de obra qualificada para a execução e uma boa qualidade de materiais a serem aplicados.

Um processo fundamental é a execução das estruturas da edificação, esse procedimento é delicado e exige um monitoramento rígido, onde a execução deve tomar os mínimos detalhes para que a edificação possa ter segurança para o seguimento dos demais processos.

Estruturas que são executadas em concreto armado podem ser monitoradas por diversos ensaios que auxiliam em determinar sua qualidade e a segurança da obra. Um dos dados que auxilia o monitoramento e deve ser realizado, é a verificação da resistência à compressão axial.

Para determinar a resistência dos elementos estruturais é necessário realizar ensaios de compressão axial. Para que esse ensaio possa ser realizado, corpos de prova são moldados na obra, utilizando o mesmo concreto que será lançado nas estruturas, podendo assim obter a resistência do concreto dosado e compará-la à resistência de projeto.

Entretanto esse processo pode conter falhas que afetam o resultado, não representando de maneira exata o que realmente está acontecendo na obra. Dentre os principais fatores que afetam o monitoramento desses elementos, podemos citar

(i) a moldagem de corpos de prova *in loco*, que muitas vezes é executado por um operador que não possui o conhecimento da norma, acabando por cometer pequenos erros que podem afetar no resultado final; (ii) quando os corpos de prova são moldados eles passam a ser curados em ambientes controlados seguindo as diretrizes das normas, ou em ambientes com temperatura e umidade diferentes da situação *in situ*, não representando as condições em que se encontram os elementos. Além disso, o processo de cura adequado que deve ser executado nas estruturas *in loco* é, muitas vezes, ignorado no canteiro de obras. Assim aqueles resultados obtidos em laboratórios são otimizados e não condizem com a realidade, pois as condições de cura impostas na estrutura são diferentes das condições de cura impostas em laboratório.

Para diminuir esses erros um método que auxilia a determinar a resistência final de um concreto *in loco*, é o uso de sensores e o método da maturidade. Esse método pretende determinar a resistência através da relação do tempo e temperatura do concreto. Portanto, é possível determinar de forma mais real as propriedades mecânicas das estruturas que estão sendo ou já foram executadas em obra.

A necessidade de compreender e quantificar o efeito da temperatura no desenvolvimento da resistência dos concretos é reconhecida há muito tempo. Isso pode ser alcançado com métodos de maturidade que levam em conta o efeito combinado da composição e da temperatura no desenvolvimento da resistência do concreto (VOLLPRACHT; SOUTSOS; KANAVARIS, 2018).

O interesse na estimativa de resistências no local foi resultado de falhas durante a construção atribuídas à desforma prematura. Duas falhas notáveis foram: (i) o prédio residencial Skyline Plaza em Bailey's Crossroads em Fairfax County, Virgínia, que desabou em março de 1973 matando 14 trabalhadores e ferindo outras 35 pessoas e (ii) Willow Island, West Virginia, entrando em colapso a torre em 1978, que matou cinquenta e seis pessoas (SOUTSOS; KANAVARIS; HATZITHEODOROU, 2018).

## 1.2 Justificativa

Na construção civil todas as etapas de uma execução de um processo construtivo são planejadas e projetadas, sendo de extrema necessidade o acompanhamento para se ter a certeza de que os processos estão sendo realizados de maneira correta. Para auxiliar nesse controle existem diversos ensaios que fornecem resultados, e através deles se realizam análises para saber se está tudo dentro do planejado.

A necessidade de um monitoramento contínuo é de extrema importância, entretanto nem sempre o responsável técnico tem a disponibilidade de estar todo o tempo na obra para a verificação de todos os processos construtivos, e muitas vezes após a execução de certos procedimentos construtivos a realização de ensaios destrutivos se torna inviável. Por outro lado, foi desenvolvido ensaios não destrutivos que auxiliam na análise sem afetar a estrutura ou execuções que já foram realizadas. No entanto, muitos deles não fornecem resultados precisos de resistência do concreto.

Um método que pode ser utilizado para verificação do desenvolvimento da resistência do concreto é o método da maturidade, que consiste em correlacionar a resistência à compressão do concreto em diferentes idades, através da medição da temperatura interna do material. Este método deve ser realizado previamente em laboratório ou central de dosagem e os dados são obtidos para um traço específico. Tendo posse dos dados, os sensores poderão ser aplicados no lançamento do concreto em obra, onde será recolhido as informações das temperaturas de hidratação *in loco*. Assim, pode-se aplicar os dados nas equações e acompanhar o desenvolvimento da resistência, por meio da comparação dos resultados obtidos das equações com a curva de resistência já conhecida para tal traço. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é estudar a eficácia do método, para que, no futuro, seja possível desenvolver sensores de temperatura *wireless* de baixo custo, possibilitando as empresas concreteiras a obter os parâmetros necessários para controlar o desenvolvimento da resistência do concreto, sem a necessidade da moldagem de corpos de prova no canteiro de obras.

Ressalta-se que a tendência do uso de sensores para auxiliar a estimar as resistências finais de concretos vem crescendo. No entanto, ainda existem diversos problemas relacionados à aplicação do método, tais como a influência do tipo de

cimento e também da temperatura ambiente em obra, uma vez que as reações exotérmicas de hidratação do concreto liberam calor, o que pode afetar substancialmente os resultados. Assim, este trabalho visa estudar tais efeitos na aplicação do método para controle da resistência à compressão.

### **1.3 Objetivos**

Neste tópico será apresentado quais objetivos o trabalho tem por atingir.

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O trabalho tem como objetivo analisar por meio do método da maturidade, como diferentes tipos de cimento e processos distintos de cura exercem influência na resistência à compressão axial do concreto.

#### **1.3.2 Objetivo Específico**

- a) Verificar a influência do tipo de cimento na temperatura de hidratação do concreto
- b) Verificar a influência do tipo de cura na temperatura de hidratação do concreto
- c) Verificar se o método de maturidade é eficiente para a previsão da resistência a compressão dos concretos estudados.
- d) Verificar se a utilização do Arduino é viável na coleta de dados das temperaturas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo será apresentado os conceitos de literatura que serão utilizados como embasamento para a pesquisa do trabalho.

Para iniciar o debate da pesquisa realizada, será analisado a importância de se ter um controle da qualidade do concreto com o fim de minimizar prováveis manifestações patológicas que podem ocorrer na execução, e ensaios não destrutivos que podem ser executados para auxiliar no controle da qualidade.

### **2.1 Controle de qualidade do concreto e ensaios não destrutivos**

Com o crescimento da construção civil nos últimos tempos, foi necessário que ocorresse inovações no setor de execução de obra como também na fase de projeto. Com isso novos materiais foram introduzidos no mercado, tanto na parte de equipamentos como na de produtos. Porém, mesmo com o avanço tecnológico ainda se requer que seja realizado um controle de qualidade de materiais que estão sendo aplicados em obra, ainda mais quando se trata de concreto (CIOTTA, 2018).

Segundo Fortes e Merighi (2004) o controle tecnológico e de qualidade é baseado em uma amostragem dos serviços que serão executados, a realização de ensaios de verificação, a seleção dos materiais, misturas ou aplicações desses materiais e fases posteriores. Quando executado corretamente o controle de qualidade pode-se evitar manifestações patológicas na construção, evitando também a perda prematura da durabilidade da obra.

Porém se questiona muito sobre o comprometimento em acompanhar os serviços executados e materiais utilizados em obras, sem saber de certeza se estão sendo executados ou aplicados de maneira correta seguindo os procedimentos básicos (CIOTTA, 2018).

Helene (1986) relata que para confirmação da conformidade de um concreto que está sendo executado ou lançado em obra deve-se seguir pelo menos quatro passos, sendo eles: definição da extensão do lote que será analisado, o tamanho da amostra que irá representar o lote, retirada e moldagem de corpos de prova e análise dos resultados obtidos.

Porém, muitas vezes para verificar se o concreto que foi executado ou lançado obteve o resultado desejado, não é possível ou não é viável realizar ensaios em que

possam danificar a estrutura ou o elemento que se deseja analisar, optando assim por ensaio não destrutivos.

A utilização de ensaios não destrutivos é uma estratégia interessante para a realização de monitoramento das estruturas. Esse método é muito atraente por evitar que a amostra que será analisada cause algum dano que não possa ser corrigido ou que resulte em um reparo na estrutura onde será criado um ponto de vulnerabilidade na mesma, gerando assim uma redução da vida útil (LORENZI *et al.*, 2016).

Segundo Evangelista (2002) as propriedades que podem ser analisadas pelos ensaios não destrutivos são: a massa específica, o módulo de elasticidade, a resistência, a dureza superficial, absorção, permeabilidade, condições de umidade, e também a localização das armaduras, existência de vazios e fissuração.

Lorenzi et al (2016) relata que normalmente se é utilizado corpos de provas moldados durante o processo da concretagem para obter alguns resultados das propriedades do concreto. Porém as condições em que a estrutura está exposta não são as mesmas dos laboratórios onde são realizados os ensaios, afetando de forma direta a resistência final do concreto.

Portanto os ensaios não destrutivos realizados nas estruturas são uma das soluções para obter a resistência real, e assim comparar com os dados obtidos em laboratórios com o fim de verificação da qualidade da estrutura.

Os ensaios podem ser realizados em estruturas novas como nas antigas. Nas estruturas novas os ensaios podem ser empregados para o monitoramento da evolução da resistência, para sanar dúvidas que possam haver sobre a qualidade do concreto entre outras aplicações. Já para as estruturas antigas, os ensaios têm como objetivo avaliar a integridade da mesma e a sua capacidade de resistência para as solicitações a qual submete-se (EVANGELISTA, 2002).

Existem vários métodos de ensaios não destrutivos que podem ser realizados, a escolha de qual ensaio utilizar depende de qual propriedade deseja-se obter. Alguns dos métodos que podem ser utilizados são os métodos magnéticos, eletrônicos, radioativos, de emissão acústica, eco impacto, frequência de ressonância, termografia infravermelho entre outros.

Evangelista (2002) descreve o que cada ensaio pode determinar, os ensaios magnéticos são realizados com equipamentos que tem a capacidade de detectar a posição que as armaduras estão dentro do concreto, isso é possível porque a presença do aço afeta um campo eletromagnético, com isso é possível determinar o

diâmetro da armadura, a localização da mesma e qual o cobrimento de concreto que essa armadura possui.

Os métodos eletrônicos são utilizados nas estruturas com o objetivo de examinar se há corrosão das armaduras, podendo determinar o teor da umidade do concreto endurecido e espessuras de lajes.

Os métodos radioativos têm a intenção de determinar através de fontes radioativas a posição e as condições das armaduras, determinar possíveis vazios, as segregações que podem haver ocorrido, as fissuras existentes nas estruturas entre outras aplicações.

O método que utiliza a emissão acústica se baseia na utilização de ondas de pequena amplitude que são geradas por deformações localizadas em pontos do concreto. Com o crescimento das fissuras ou das deformações plásticas, é liberada uma energia de deformação que produz ondas acústicas que podem ser determinadas por sensores que estarão em contato com a superfície das estruturas que deseja ser analisada.

Pequenas ondas podem contornar os vazios e discontinuidades que podem existir no concreto, esse é o princípio em que se baseia o método de eco impacto. Essas ondas podem ser causadas por golpes de martelo ou por equipamentos mecânicos.

O método da frequência de ressonância tem como objetivo determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Isso é possível através de vibrações que são aplicadas no corpo de prova, essas vibrações podem ser tanto na direção longitudinal, transversal ou torsional.

A termografia infravermelha utiliza medições e gravações de calor que a estrutura apresenta, como a taxa de emissão de calor é diretamente influenciada pelas discontinuidades e fissuras, quando os scanners são acionados eles conseguem mostrar a diferença de temperatura entre a estrutura que contém e a que não contém manifestações patológicas.

Os ensaios são utilizados como um auxílio no controle da qualidade do concreto, porém existem vários fatores que influenciam de forma direta e significativa na resistência do concreto, no tópico a seguir será discutido como a cura do concreto influencia na resistência final.

## 2.2 Influência da cura e processo de hidratação do cimento na resistência mecânica

Um dos processos de execução de uma concretagem é a cura do concreto, esse processo consiste em cobrir de maneira total quando possível a superfície em que o concreto foi lançado, utilizando uma camada de água ou vapor de água, com a finalidade de impedir que substâncias externas possam prejudicar a hidratação do cimento e evitar a evaporação da água.

Uma das demais funções desse procedimento é o controle de temperatura do concreto, já que as reações químicas que ocorrem internamente liberam calor, se não controladas podem causar patologias na estrutura, como fissuras permitindo assim a entrada de agentes agressivos externos danificando a estrutura (DINIZ, *et al.* 2016).

Conseqüentemente, o concreto moldado no local é frequentemente submetido a umidade inadequada ou fornecimento de água durante o período de cura. Sob essa condição insaturada, as propriedades do concreto mudam consideravelmente; a presença de água nos poros tem importante influência nas propriedades, e água insuficiente inibe a reação de hidratação dos materiais cimentícios (MI, *et al.* 2019).

A falta de comprometimento em realizar o processo de cura *in loco*, irá trazer conseqüências na formação da microestrutura do concreto, fazendo assim com que essa estrutura possa se tornar frágil, tornando-se uma estrutura vulnerável. Os efeitos desse descuido fazem com que a superfície do concreto apresente uma maior probabilidade de degradação e que a resistência máxima desejada para o concreto não possa ser alcançada, entre outros problemas que podem ocorrer (DINIZ, *et al.* 2016).

Porém esse processo de cura é realizado para evitar que o concreto perca sua água de amassamento de maneira acelerada, essa perda de água ocorre por que a hidratação do cimento com a água gera uma reação química que por sua vez gera calor, por sua vez evaporando a água que esta dentro da mistura. Os próximos parágrafos irão descrever o processo de hidratação e como esse processo afeta a resistência final do concreto.

Um dos materiais mais utilizados na construção civil é o cimento Portland, no qual é constituído por clínquer e adições. O clínquer tem em sua composição como matéria-prima, rica em Al, Si, Ca e Mg, como o calcário e argila. Assim quando o cimento Portland é misturado com água é possível chegar a uma mistura com

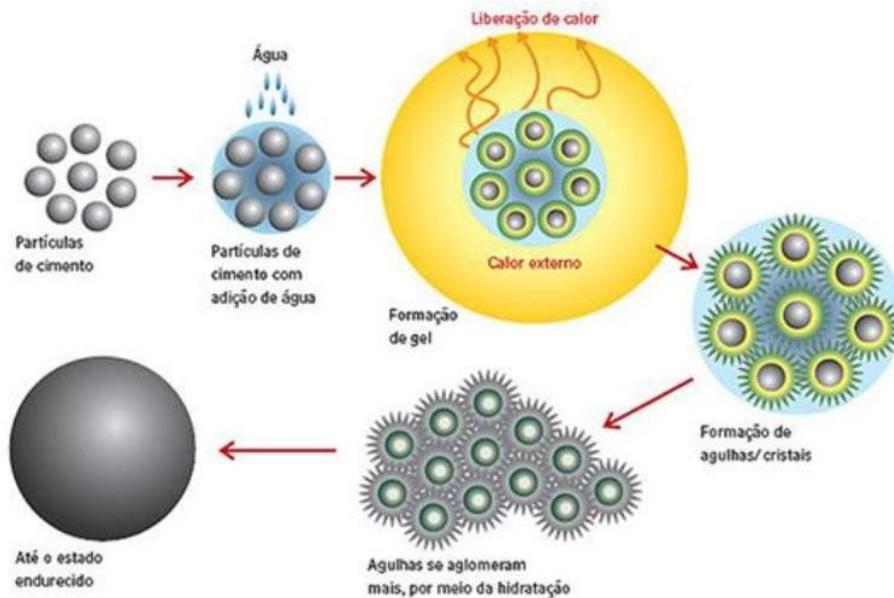
características aglutinantes que consegue envolver os materiais que fazem parte da mistura (SEFFF; FOLGUERAS; HOTZA, 2005).

Portanto quando o cimento é misturado com a água se dá início ao processo de hidratação do cimento, esse processo libera calor. É a intensidade desse calor que é liberado nas primeiras idades que irá determinar de maneira direta a velocidade do endurecimento e da resistência do concreto. A hidratação gera uma reação exotérmica, isso quer dizer que durante esse processo onde o cimento é misturado com a água existe uma liberação de calor. Essa quantidade de calor pode ser chamada de calor de hidratação, esse processo químico é de extrema importância para a evolução da resistência do concreto (IKEMATSU; LAGUNA, 2009).

Porém o processo de hidratação depende muito do tipo e da finura do cimento, da relação água/cimento utilizada, da temperatura de cura e da presença de aditivos químicos e minerais. O processo de hidratação basicamente consiste na formação do silicato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio hidratado, entringita, monosulfaluminato de cálcio hidratado e do hidróxido de cálcio, tudo isso a partir das reações dos compostos do cimento com a água (GONÇALVEZ; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2008).

Para poder compreender mais o processo de hidratação a Figura 1 nos explica de maneira ilustrativa como ocorre o fluxo de hidratação do cimento Portland. Vemos que pequenas partículas de cimento entram em contato com a água e formam uma camada de gel que libera calor, esse calor podendo ser chamado de calor de hidratação. Pequenas agulhas ou cristais começam a tomar forma ao redor das partículas de cimento, essas agulhas começam a crescer e a unir-se umas com as outras, até o ponto que preenchem praticamente quase todo o espaço vazio, chegando assim no estado endurecido do concreto.

Figura 1 - Fluxo de Hidratação do cimento Portland



Fonte: Ikematsu; Laguna (2009, p. 2).

Ao entender a importância da cura e da hidratação do concreto para atingir resistências desejadas, assim podemos debater sobre o método de maturidade no qual esses dois pontos são importantes para a compreensão. No tópico seguinte, usaremos literaturas de outros trabalhos para entender melhor o método de maturidade e suas aplicações.

### 2.3 Método da maturidade

Segundo a ASTM C 1074 (2004) o método de maturidade pode ser definido como uma técnica para estimar a resistência do concreto, a qual tem como base que amostras de uma determinada mistura de concreto atingem resistências iguais se atingirem valores iguais de índice de maturidade. A ASTM C 1074 (2004) define índice de maturidade como um indicador de maturidade que é calculado por meio do histórico de temperatura do concreto usando uma função de maturidade.

O método pode ser aplicado a qualquer traço de concreto. Entretanto, para estimar o desenvolvimento da resistência, os parâmetros do traço estudado devem ser conhecidos, isto é, obter a curva de resistência por meio da temperatura. Assim o método se torna único para cada mistura que foi pesquisada, os resultados obtidos não podem ser aplicados como um parâmetro padrão para misturas distintas da que foi estudada.

Este conceito tem a finalidade de relacionar o efeito que o tempo e o histórico de temperatura têm em estimar o desenvolvimento da resistência do concreto enquanto ocorre o período de cura, quando a umidade está disponível para a hidratação do cimento (SANTOS; AGUILAR; CHAHUD, 2021).

Esse método está incluído em vários códigos internacionais, particularmente no *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 1074 (2004), que é amplamente utilizado em práticas internacionais de construção. O método da maturidade é usado em conjunto com métodos convencionais não destrutivos para fins de segurança estrutural (HERRERO; LAGE; TEMBLEQUE, 2012).

A resistência do concreto devidamente moldado e curado pode ser expressa em função do histórico de temperatura-tempo que se relaciona com a hidratação do concreto. Temperaturas de cura mais altas acelerarão o processo de hidratação e o concreto poderá ganhar resistência mais rapidamente em idades precoces. Este conceito é conhecido como conceito de maturidade. De acordo com este conceito, uma relação empírica pode ser estabelecida entre o histórico de temperatura-tempo e o desenvolvimento da resistência do concreto para prever a resistência durante o período de cura monitorando as temperaturas do concreto no local em tempo real (YIKICI; CHEN, 2015).

Na atualidade, o procedimento mais utilizado para estimar a maturidade de um concreto é normatizado pela ASTM C 1074 (2004), conforme já informado. A norma traz duas funções alternativas para computar o índice de maturidade através do histórico de temperatura do concreto. Nesse processo, o concreto que é submetido ao monitoramento *in loco* de temperatura, pode ser analisado pelos cálculos propostos pela norma, dando resultados de resistência à compressão axial, fazendo assim que não seja necessário a utilização de ensaios destrutivos para determinar tal propriedade mecânica (SANTOS; AGUILAR; CHAHUD, 2021).

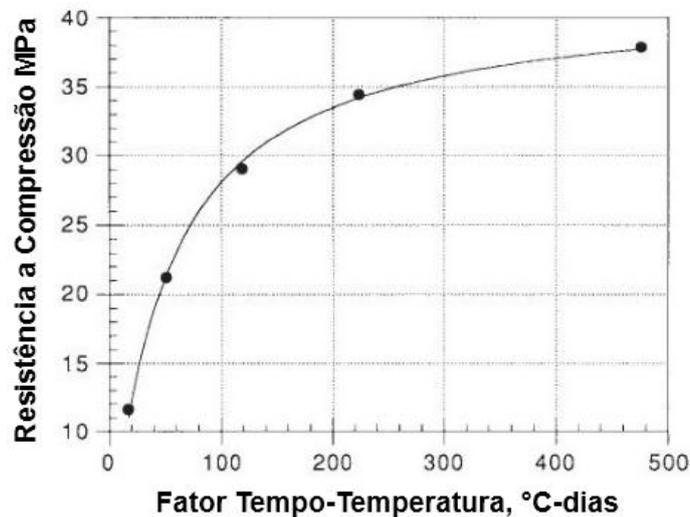
O uso do método de maturidade é aplicado na construção civil para poder determinar o tempo aproximado que um concreto irá atingir *in loco* a resistência desejada. O monitoramento das temperaturas que estarão atuando no concreto analisado pode ser feito com sensores colocados em pontos pré-determinados, ainda com o concreto em um estado fresco. Os pontos escolhidos devem ser aqueles onde as condições de temperatura sejam menos favoráveis e onde as cargas estruturais são as mais críticas (SILVA, 2004).

Conseqüentemente, essas informações podem ser utilizadas para auxiliar na tomada de decisões (por exemplo, tempo de remoção da fôrma, tempo de pós tensionamento ou abertura do pavimento ao tráfego) que economizam tempo e reduzem o custo de construção (YIKICI; CHEN, 2015).

Já por outro lado existe algumas limitações, sendo uma delas que os ensaios devem ser pontuais, sabendo disso é importante salientar que para determinar variações internas de uma estrutura de concreto é necessário monitorar simultaneamente vários pontos, assim o ensaio pode se tornar de alto custo (EVANGELISTA, 2002).

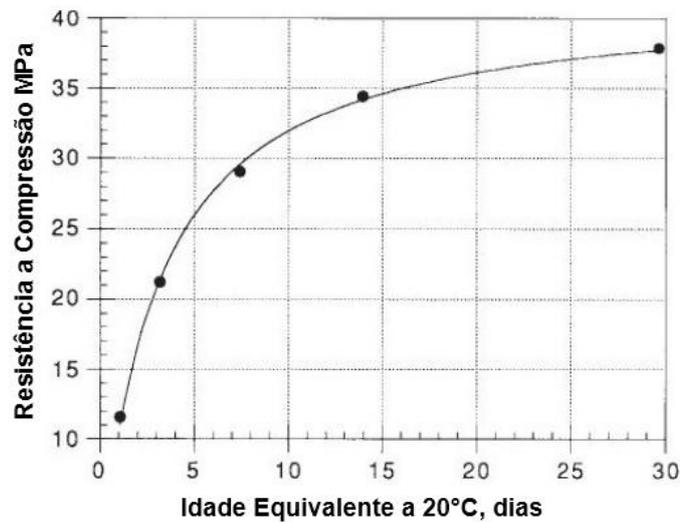
Com a obtenção dos dados e aplicação nas equações que serão descritas nos próximos tópicos, é possível relacionar dados e obter gráficos que nos auxiliam de forma ilustrativa a observar a influência da temperatura na resistência. A norma ASTM C 1074 (2004) traz exemplos desses gráficos, conforme mostra a Figura 2 e a Figura 3.

Figura 2 – Exemplo de uma relação entre resistência à compressão e fator temperatura-tempo.



Fonte: ASTM C 1074, 2004.

Figura 3 – Exemplo de uma relação entre resistência à compressão e idade equivalente a 20 °C.



Fonte: ASTM C 1074, 2004.

As duas funções da maturidade utilizadas no procedimento da norma ASTM C 1074 (2004), estão descritas nos itens 2.3.1 e 2.3.2 a seguir.

### 2.3.1 Equação de Nurse-Saul – Função de Maturidade

As funções de maturidade podem ser definidas como expressões matemáticas que tem como função relacionar a influência do tempo e da temperatura na hidratação do concreto (ASTM C 1074, 2004).

Saul, foi um dos primeiros pesquisadores a se interessar e a propor o conceito da maturidade do concreto. Após ele, outros autores vieram em busca de um aprimoramento de seu conceito, um deles foi Nurse, que por sua vez sugeriu que o produto do Tempo vs. Temperatura conseguiria mostrar os efeitos da cura na resistência à compressão (DA SILVA, 2018).

Assim foi sugerida a equação de Nurse-Saul levando em conta o produto do tempo pela temperatura, como podemos ver na equação:

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$M$  = maturidade, em  $^{\circ}\text{C} \times \text{dias}$  ou  $^{\circ}\text{C} \times \text{h}$

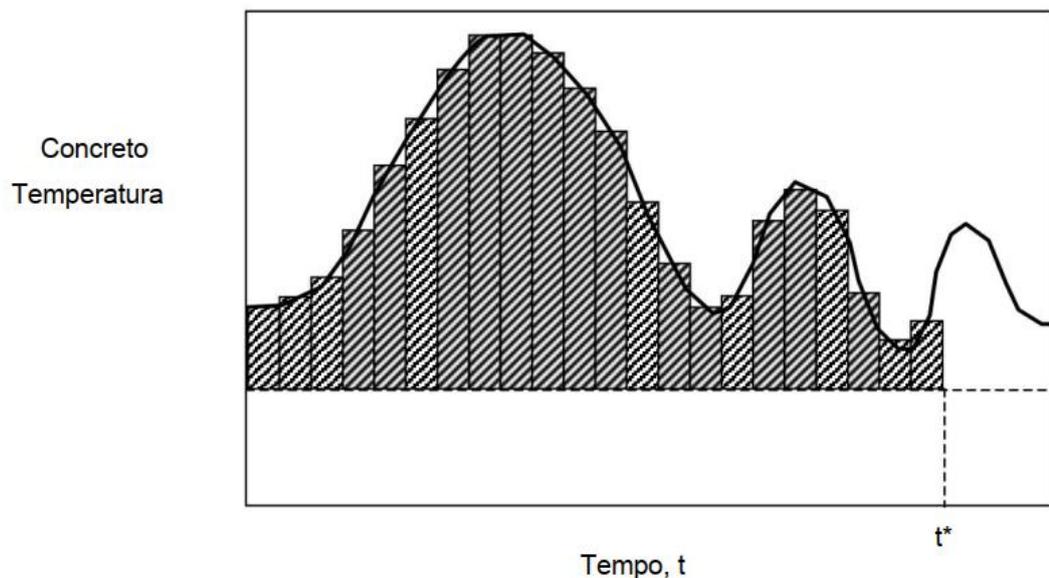
$T$  = temperatura do concreto no intervalo de tempo  $\Delta t$

$T_0$  = temperatura limite a partir da qual não há aumento de resistência ( $-10^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta t$  = intervalo de tempo

O valor calculado foi chamado de maturidade ou também como está na ASTM C 1074 (2004) o fator de temperatura-tempo. A Figura 4 mostra um esquema do histórico de temperatura e do fator temperatura-tempo. O fator temperatura-tempo está representado na Figura 4 como a área abaixo da curva de temperatura.

Figura 4 – Esquema do histórico de temperatura e do fator temperatura-tempo.



Fonte: CARINO,2001.

A equação de Nurse-Saul se baseia que a taxa inicial de ganho de força, pode ser descrito por uma função linear da temperatura. Entretanto, foi possível perceber que a aproximação linear proposta poderia não ser válida quando essas temperaturas de cura tiverem uma faixa de variabilidade muito ampla. Com isso outros autores buscaram propor algumas alternativas a serem utilizadas, porém nenhuma alternativa foi tão bem aceita como a equação de Nurse-Saul. Todavia, uma outra função no final da década dos anos 1970 foi proposta (CARINO, 2001). Essa equação, conhecida

como a equação de Arrhenius, será discutida no próximo tópico, descrevendo a equação e suas variáveis.

### 2.3.2 Equação de Arrhenius – Conceito de Idade Equivalente

Salvador Filho (2001) cita que Arrhenius foi um dos pioneiros no estudo da energia de ativação em equações químicas. Para que ocorra uma reação química, as moléculas precisam de uma quantidade mínima de energia cinética para que possam transformar os reagentes em produtos. A hidratação do cimento é uma reação química exotérmica, assim que os reagentes estão em um estado de energia maior que os produtos. Portanto, podemos definir a energia de ativação como a quantidade a mais de energia necessária para que os reagentes deem o início a reação.

No ano de 1977, Freiesleben Hansen e Pedersen (FHP) propuseram uma nova equação com o intuito de calcular o índice de maturidade por meio do registro do histórico de temperatura do concreto. A função se baseia na equação de Arrhenius que descreve como a temperatura tem efeito na velocidade de uma reação química. Essa função permitiu que fosse possível calcular a idade equivalente do concreto (CARINO, 2001). A Equação 2 descreve como pode ser calculado a idade equivalente, pela equação de FHP.

$$te = \sum e^{-\left[\frac{Ea}{R}\left(\frac{1}{Ta}-\frac{1}{Tr}\right)\right]}\Delta t \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

te = Idade equivalente à temperatura de referência Tr - horas;

Ea = Energia aparente de ativação - kJ/mol;

Ta = Média da temperatura em um intervalo de tempo  $\Delta t$  - K;

Tr = Temperatura de referência - K;

$\Delta t$  = Intervalo de tempo - horas.

A função que melhor representa o efeito da temperatura na velocidade de hidratação é a de Freiesleben-Hansen e Pederson. Porém, para utilizá-la é preciso conhecer previamente a Energia Aparente de Ativação das reações de hidratação do cimento (SALVADOR FILHO, 2001).

Com a introdução da equação de FHP, foi possível eliminar uma das maiores limitações da equação de Nurse-Saul, que era a relação não linear da taxa inicial de desenvolvimento da resistência e a temperatura de cura. Foram realizados estudos que compararam as duas equações, tais estudos comprovam que a função de FHP é superior a equação de Nurse-Saul (CARINO, 2001).

O procedimento da ASTM C 1074 (2004) também traz a função de FHP como opção. No entanto, é importante ressaltar que a norma considera a temperatura do concreto como a única variável que afetará o ganho de resistência no tempo. Outras variáveis como composição dos materiais, proporção da mistura, condições de umidade não são levados em consideração como influenciadores no ganho de resistência. Porém, o método tem uma vantagem, sabendo que a maturidade está diretamente relacionada com o desenvolvimento do grau de hidratação do cimento, é possível relacionar qualquer propriedade física ou mecânica com o grau de hidratação (SALVADOR FILHO, 2001).

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo traz a descrição dos materiais utilizados, especificação dos traços e procedimentos de análise. Além disso, nos itens subsequentes são explanados como foram inseridos os sensores de temperatura nos concretos, além de como as temperaturas foram coletadas e comparadas com o desenvolvimento da resistência à compressão.

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados para moldagem dos concretos foram cimento Portland do tipo CP-IV e CP-V, agregado graúdo e miúdo. Para coleta das temperaturas foram utilizados sensores PT-100, Arduino e protoboard. As informações e descrições destes materiais estão contidas nos subitens a seguir.

##### 3.1.1 Cimento Portland

Para realizar o estudo foram utilizados dois tipos diferentes de cimento Portland, o CP IV e o CP V ARI RS da empresa Votorantim. A composição fornecida pelo fabricante encontra-se descrita no Quadro 1.

Quadro 1 – Composição dos diferentes tipos de cimento Portland

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland pozolânico	CP IV	25,32 ou 40	45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	ARI	90 - 100	0	0	0 - 10

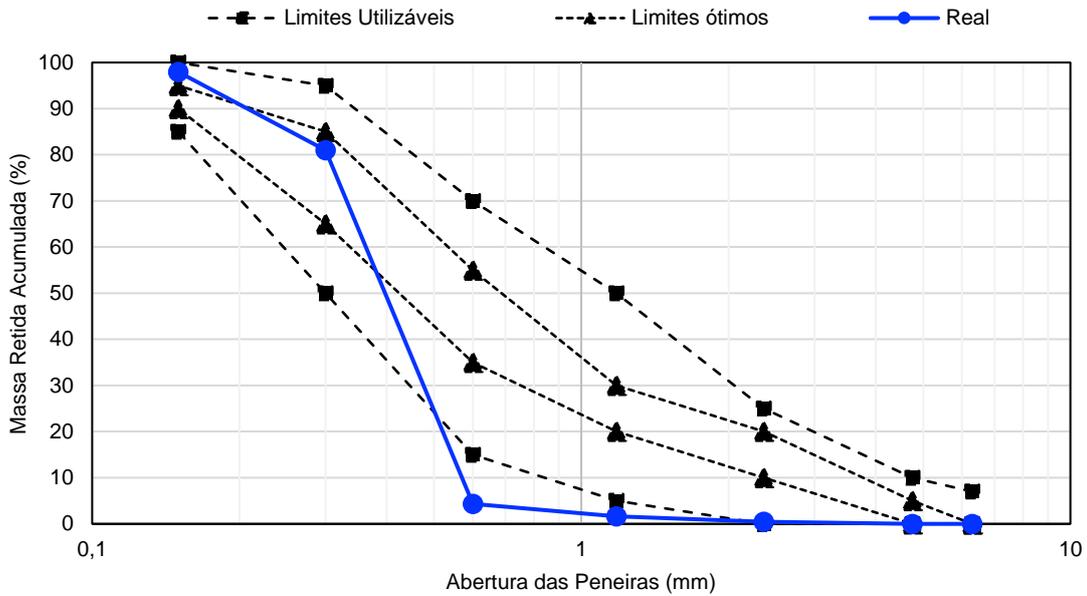
Fonte: Votorantim.

##### 3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado no traço do concreto é uma areia natural. O material foi caracterizado, utilizando a NBR NM 248 (ABNT, 2001), no qual foi obtida a curva granulométrica, conforme mostra a Figura 5. O agregado miúdo possui um módulo de

finura de 1,854, e massa específica de 2,667 g/cm<sup>3</sup>, obtida de acordo com a NBR 9776 (ABNT, 2003).

Figura 5 – Gráfico da Distribuição granulométrica do agregado miúdo

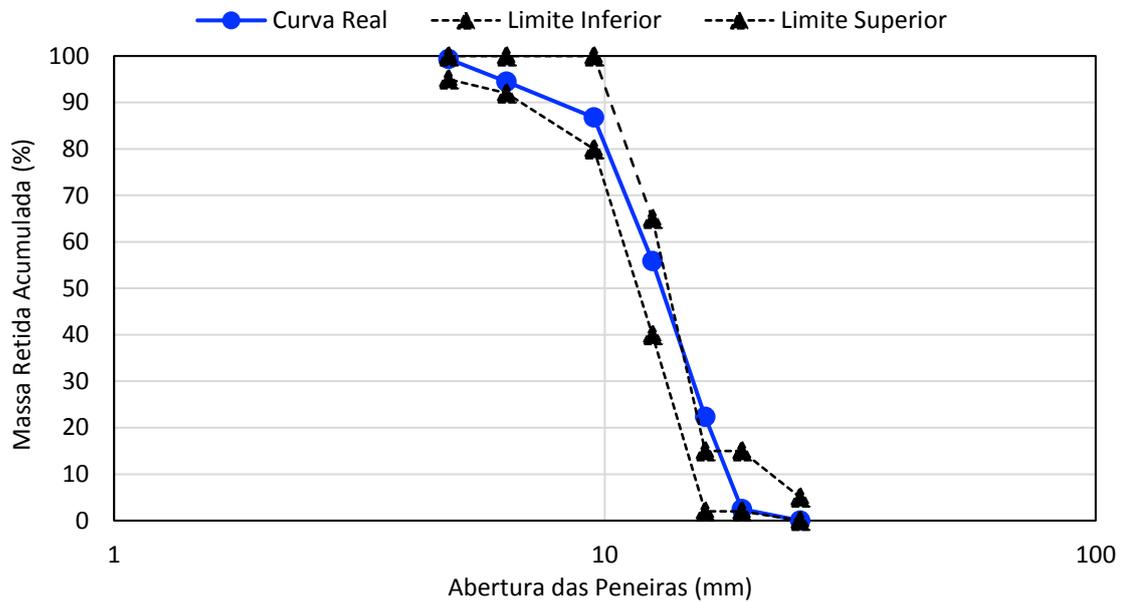


Fonte: Própria.

### 3.1.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo que será utilizado no traço do concreto é uma brita 1 de origem basáltica. O material foi caracterizado conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2001), no qual foi obtida a curva granulométrica, conforme mostra a Figura 6. O agregado graúdo possui um módulo de finura de 6,854, e massa específica de 2,667 g/cm<sup>3</sup>, obtida de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Figura 6 – Gráfico da Distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Própria.

### 3.1.4 Sensor

Para o monitoramento da temperatura dos corpos de prova foram utilizados sensores do tipo PT-100, conforme ilustra a Figura 7. A faixa de medição de temperatura deste tipo de sensor é de 270 °C.

Figura 7 – Sensor PT-100



Fonte: Autoria Própria.

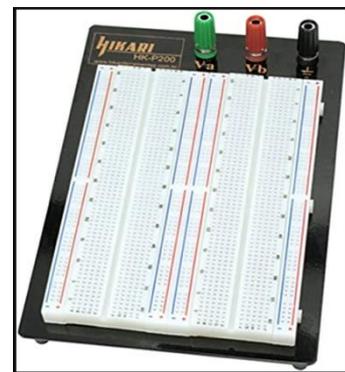
### 3.1.5 Arduino e Protoboard

Para registrar os dados monitorados pelos sensores foi utilizado um Arduino, que consiste em uma placa eletrônica cujos acessórios são conectados a uma protoboard. A Figura 8 mostra o Arduino e uma Protoboard. Já a Figura 9 mostra como eles estão conectados para o funcionamento da pesquisa.

Figura 8 – Arduino e Protoboard



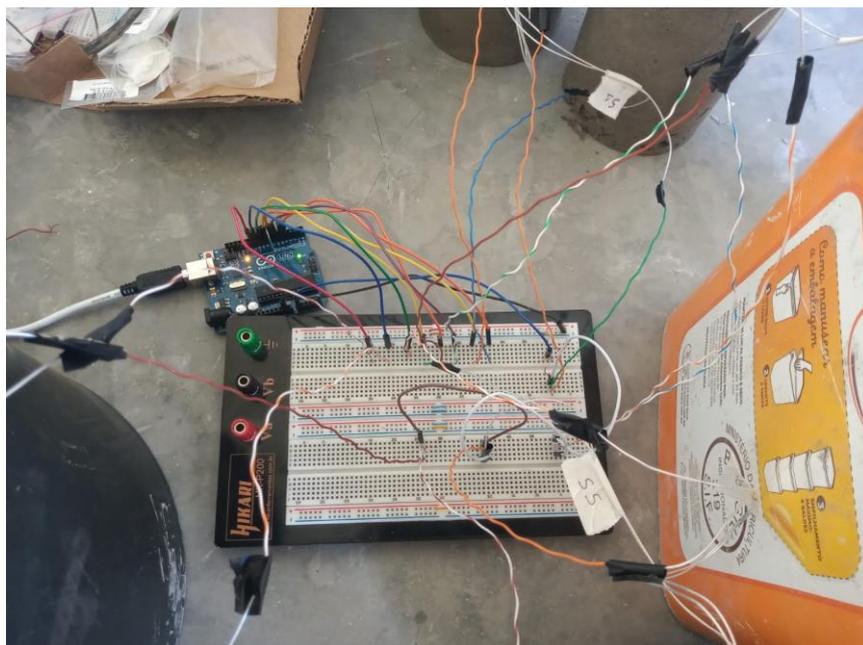
(a) Arduino UNO



(b) Protoboard

Fonte: Autoria Própria.

Figura 9 – Ligação da Protoboard ao Arduino



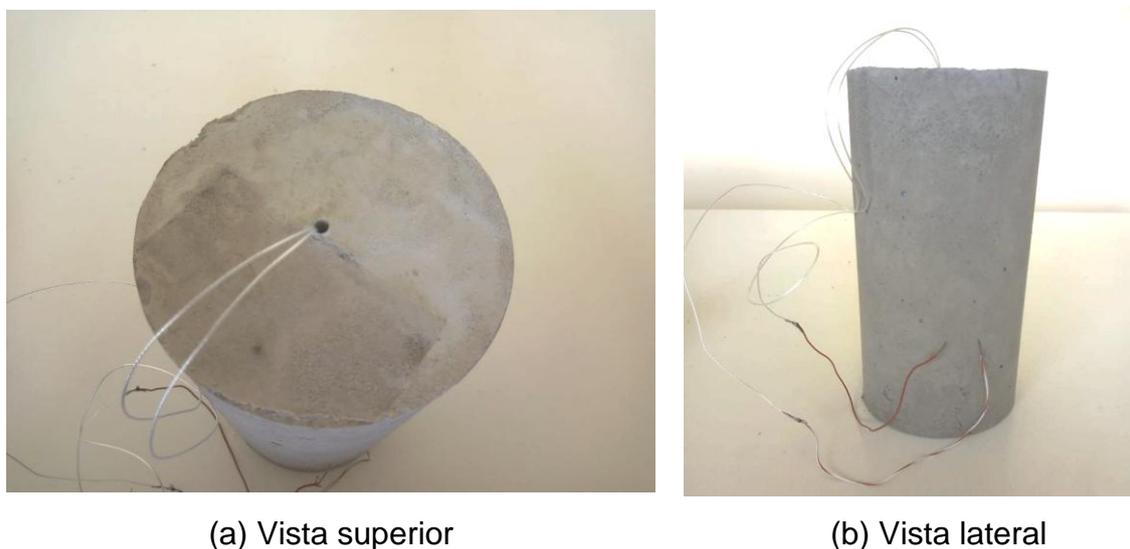
Fonte: Autoria Própria.

### 3.2 Método

Para realizar o estudo do método de maturidade, o procedimento foi baseado na norma ASTM C 1074 (2004) e os ensaios de compressão axial nos corpos de prova foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007).

O concreto estudado possui um  $f_{ck}$  desejado de 20 MPa (traço 1:3:4) e uma relação a/c de 0,5. Considerando a mesma proporção de mistura, foram executadas duas concretagens utilizando diferentes tipos de cimento Portland, isto é, o CP-IV e o CP-V. As concretagens seguiram o procedimento descrito na NBR 12655 (ABNT, 2015), e foram moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016), isto é, 2 camadas com 12 golpes em cada uma. Logo após adensados, os sensores forem inseridos até uma altura de  $\pm 6$  cm do topo dos corpos de prova de concreto, protegidos por um pequeno tubo plástico, para que pudessem ser posteriormente reaproveitados. Em estudo prévio, foi verificado que a proteção não altera os resultados de temperatura obtidos. A Figura 10 ilustra um corpo de prova com o sensor de temperatura.

Figura 10 – Corpo de prova com o sensor PT-100



Fonte: Autoria Própria.

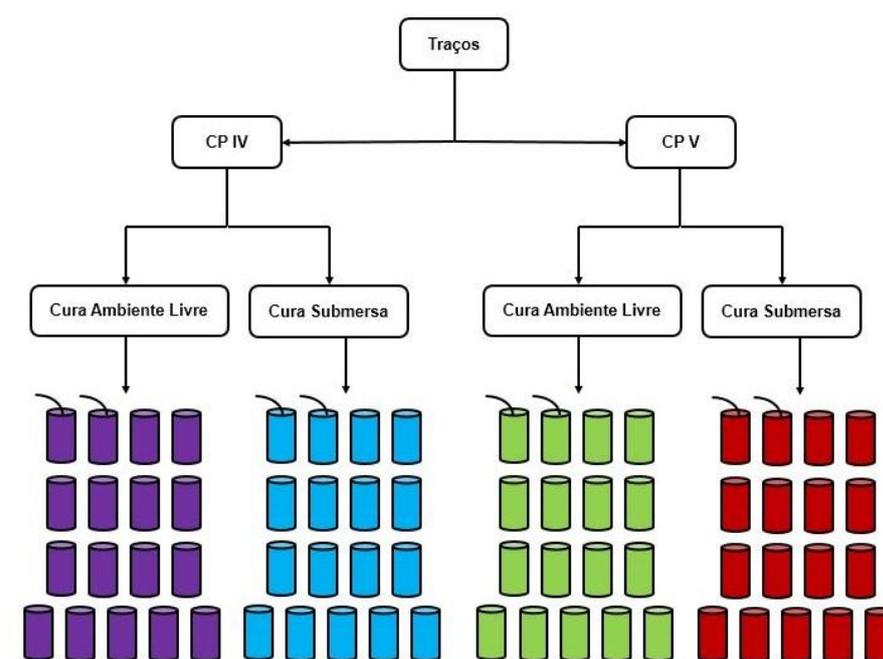
Para o monitoramento, foram moldados corpos de prova para serem ensaiados à compressão simples em diferentes idades: 1, 3, 7, 14, e 28 dias após a concretagem. Após moldados, os corpos de prova foram separados e submetidos a dois diferentes

tipos de cura, isto é, submersa em água e em ambiente livre (laboratório). Para fins de controle, a temperatura e umidade do laboratório foi monitorada pelos 28 dias.

A ASTM C1074 (2004) determina que dois corpos de provas devem ser monitorados por sensores e que, para se obter resultados confiáveis, deve-se analisar três corpos de prova por idade para o ensaio de compressão axial. Já que os resultados dos corpos de prova curados em ambiente livre são comparados aos corpos de prova submetidos a cura submersa, foram, portanto, moldados trinta e quatro corpos de prova para cada mistura, referente a cada cimento Portland estudado (CP-IV e CP-V). A Figura 11, nos mostra de maneira ilustrativa a divisão que foi descrita nos parágrafos anteriores. Para auxiliar no entendimento, a Figura 12 funciona como uma legenda explicando as cores de cada grupo de corpo de prova e também os detalhes distintos.

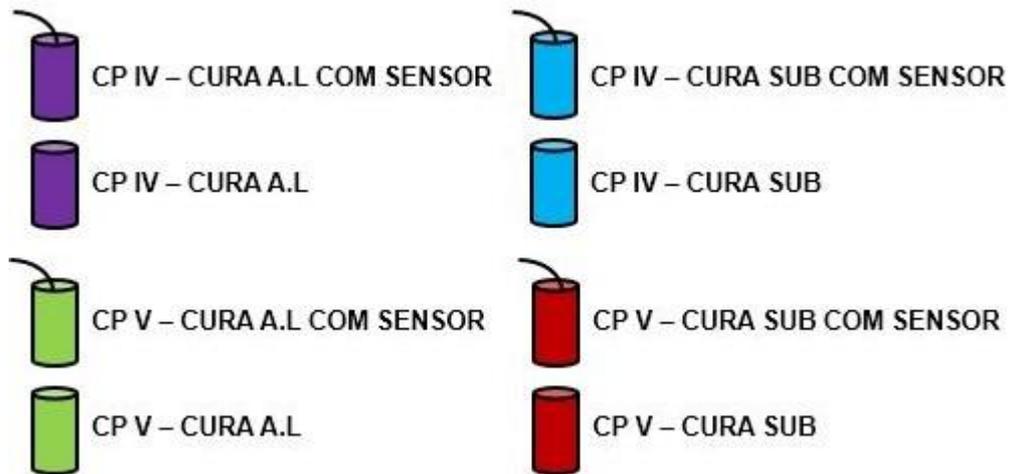
Após a divisão realizada por tipo de cimento Portland e pelo método de cura, os corpos de provas foram monitorados para a obtenção dos dados. O ensaio de compressão axial foi realizado nas idades estabelecidas (1, 3, 7, 14 e 28 dias) para a obtenção dos dados de resistência, e os dados das temperaturas foram recolhidos diariamente dos sensores, até 28 dias, para serem aplicados nas equações. A Figura 13 ilustra a quantidade de corpos de prova por idade.

Figura 11 – Fluxograma de divisão de corpos de prova



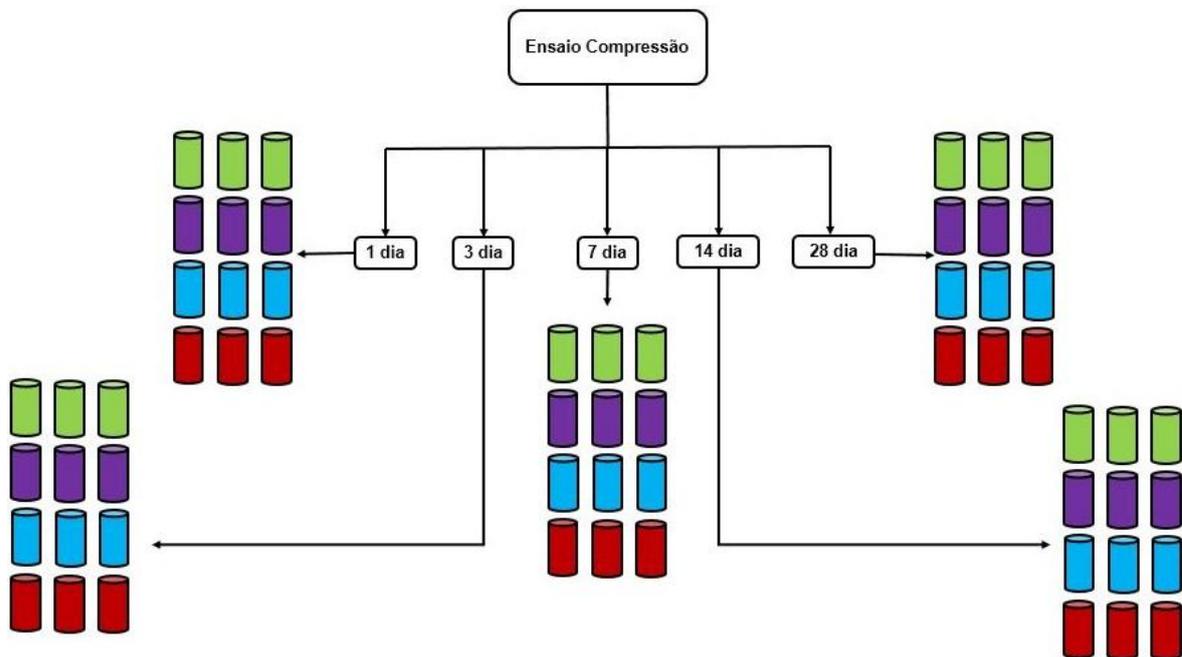
Fonte: Autoria Própria.

Figura 12 – Legenda da Figura 11.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 13 – Quantidade de corpos de prova rompidos por idade



Fonte: Autoria Própria.

Para realizar a coleta dos dados de temperatura foi utilizado o Arduino conforme descrito anteriormente. Para o funcionamento do Arduino na coleta das temperaturas, é necessário a criação de um código em linguagem C, indicando os parâmetros de entrada e saída. Entretanto as informações que eram repassadas para

o Arduino tratavam-se de leituras de tensões que foram convertidas em temperaturas posteriormente. O código desenvolvido para a pesquisa está descrito no Quadro 2.

Para o funcionamento do código e das leituras, foi necessário a criação de um sistema elétrico, através de uma protoboard. Tal estrutura está ilustrada na Figura 9 no item 3.1.5. Para montar as ligações foram utilizados cabos reciclados de antigos cabos de redes sem uso. Para minimizar erros de leituras e interferências elétricas, na emenda entre os cabos e os sensores, foi utilizada uma fita isolante para quando dois cabos se encostassem ou estivessem próximos, não interferindo nas leituras. O esquema elétrico utilizado para realizar tais ligações está ilustrado na Figura 14 a seguir.

As leituras nas primeiras 48 horas foram registradas em um intervalo de tempo de 30 minutos, assim como recomenda a norma ASTM C 1074 (2004). A norma diz que após as 48 horas iniciais as leituras podem ser realizadas em intervalos de tempo maiores. Após o intervalo das 48 horas iniciais, o intervalo de tempo de leitura aumentou para 2 horas até chegar à data de 7 dias, sendo a escolha do intervalo de tempo determinada por escolha pessoal, com o intuito de obter mais dados nas primeiras idades para a verificação do comportamento do concreto. Por fim, de 8 até 28 foram realizadas medições em um intervalo de tempo maior, de 4 horas. Tais dados de leituras podem ser vistos no Anexo A.

Ao realizar testes prévios para verificar as leituras de temperatura do sensor PT-100, observou-se uma pequena variação de leitura. Tal variação pode ser explicada pela estrutura de coleta de dados do Arduino.

O Arduino divide as informações de entrada, ou seja, as leituras que estão sendo realizadas nos sensores, são divididas em 1024 partes, que variam de 0 até 1023. O sensor utilizado na pesquisa possui uma faixa de temperatura de 270°C, iniciando em -70°C até 200°C. Com isso foi possível calcular e verificar previamente que existe uma variação de  $\pm 3,79^\circ\text{C}$ .

Com a pesquisa em andamento, foi desenvolvido uma solução, que diminui a variação para  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Assim, a faixa de temperatura do sensor diminui para 10°C até 88°C, o que foi possível utilizando um amplificador de tensões. Tal variação pode ainda ser melhorada utilizando componentes eletrônicos como auxílio. Devido ao andamento da pesquisa, não foi possível aplicar a solução no experimento. No entanto, a proposta, contendo o esquema elétrico e o código a serem aplicados na solução encontram-se descritos no Anexo B.

Durante o experimento também foi possível avaliar que o Arduino pode ser utilizado para coleta de dados de mais sensores. Para que isso seja viável, é necessário a utilização de componentes eletrônicos para ampliar a sua capacidade de sensores a ele conectados.

Após a realização dos ensaios e medições, foi necessário realizar uma calibragem dos sensores, transformando as informações registradas em temperaturas. Tal calibragem foi realizada sensor por sensor já que cada um demonstrava um comportamento de leituras distintas um do outro. Essa calibragem foi realizada com o auxílio de um Becker onde era depositado água quente, e adicionado cubos de gelos quando era necessário, diminui-se a temperatura da água para a calibragem. Os resultados dessas calibrações estão no Anexo C.

Para determinar o fator tempo-temperatura nas idades estudadas foi levado em consideração a última temperatura registrada antes da realização do ensaio à compressão. Como possuía dois sensores por traço e cura, foi feito uma média entre os dois resultados dos sensores para determinar qual o valor de temperatura seria aplicado na equação de Nurse-Saul.

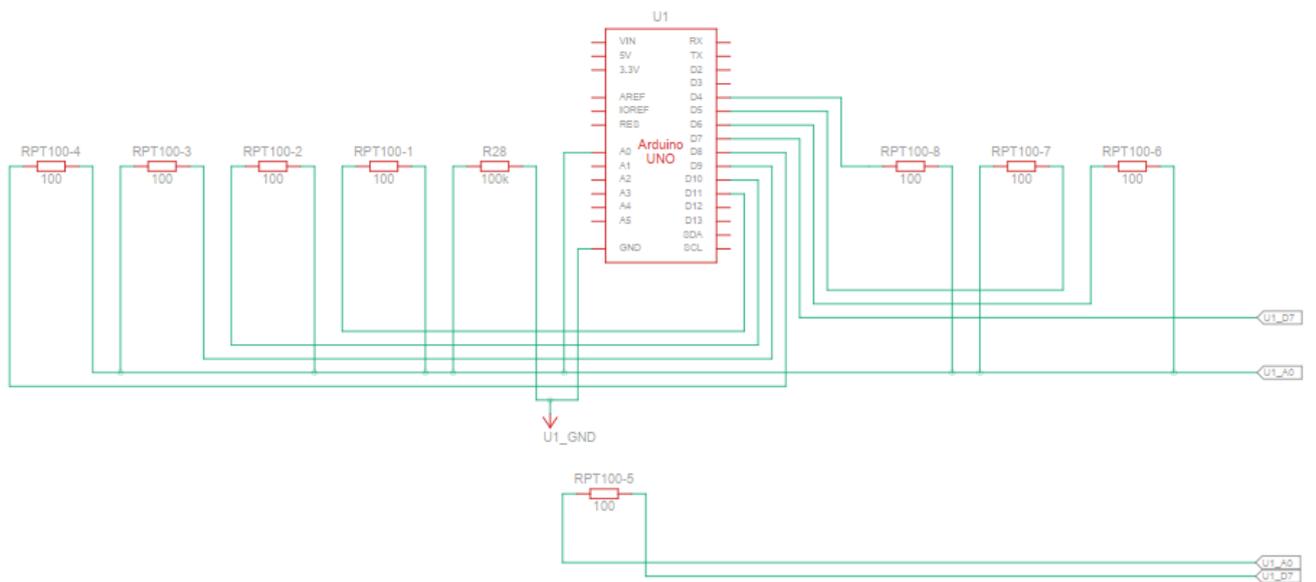
Por fim, após o ensaio de compressão axial nas idades estabelecidas juntamente com os dados obtidos das funções de maturidade calculados através das medições contínuas de temperatura, os resultados serão apresentados em formas de gráficos que irão correlacionar a resistência e o fator de temperatura-tempo e a relação entre a resistência e a idade equivalente.

Quadro 2 – Código utilizado na pesquisa

Código	Função
<pre> byte pinoSensor[]={4,5,6,7,8,9,10,11}; unsigned long changeTime; int sensor = 0; int horas = 4; int minutos = 0; int segundos = 0; void setup(){   Serial.begin(9600);   for (int x=0; x&lt;8; x++) {     Serial.print("S");     Serial.print(x+1);     Serial.print(":");   }    pinMode(pinoSensor[x], OUTPUT);  } Serial.println(); changeTime = millis(); delay(2000); } void loop(){   medicaoSensor(); } void medicaoSensor(){    delay(segundos*1000 + minutos*60000 + horas*3600000);   for(int x=0;x&lt;8;x++){     digitalWrite(pinoSensor[x],LOW);    }   for(int x=0;x&lt;8;x++){     delay(500);     digitalWrite(pinoSensor[x],HIGH);     delay(500);//tempo para leitura      Serial.print((analogRead(A0)));  //Serial.print(analogRead(A0)*5/1023); Serial.print(";"); if(x==7){   Serial.println();  } digitalWrite(pinoSensor[x],LOW); } for(int x=0;x&lt;8;x++){   digitalWrite(pinoSensor[x],LOW);   delay(100); } } </pre>	<p>portas digitais para os 8 sensores</p> <p>Possibilita determinar qual o intervalo de tempo em que as leituras serão realizadas</p> <p>define todos as portas digitais como saídas</p> <p>O tempo é em milissegundos</p> <p>Desliga todos os sensores</p> <p>Registra valores sequencialmente</p> <p>Le saída do sensor para o Arduino e registra</p> <p>Desliga todos os sensores</p>

Fonte: Autoria Própria.

Figura 14 – Esquema elétrico utilizado



Fonte: Autoria Própria.

#### 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para obter os resultados desejados na pesquisa foi utilizada a equação de Nurse-Saul (Equação 1) descrita no item 2.3.1. A escolha pela utilização da equação se deu pelo motivo de que, para utilizar a Equação 2 descrita no item 2.3.2, era necessário realizar ensaios prévios para determinar valores da energia de ativação. Devido ao tempo, tais ensaios não foram possíveis de serem realizados.

O Quadro 3 mostra os resultados da resistência média e o desvio padrão de cada concreto estudado nas suas diferentes idades. No Anexo D estão os valores das resistências à compressão individuais de todos os corpos de provas ensaiados. A Figura 15 mostra os resultados de resistência à compressão média pelo tempo (idade em dias). A legenda dos gráficos refere-se ao tipo de cimento Portland e cura, sendo “SUB” referente a cura submersa e “AL” referente a cura em ambiente de laboratório.

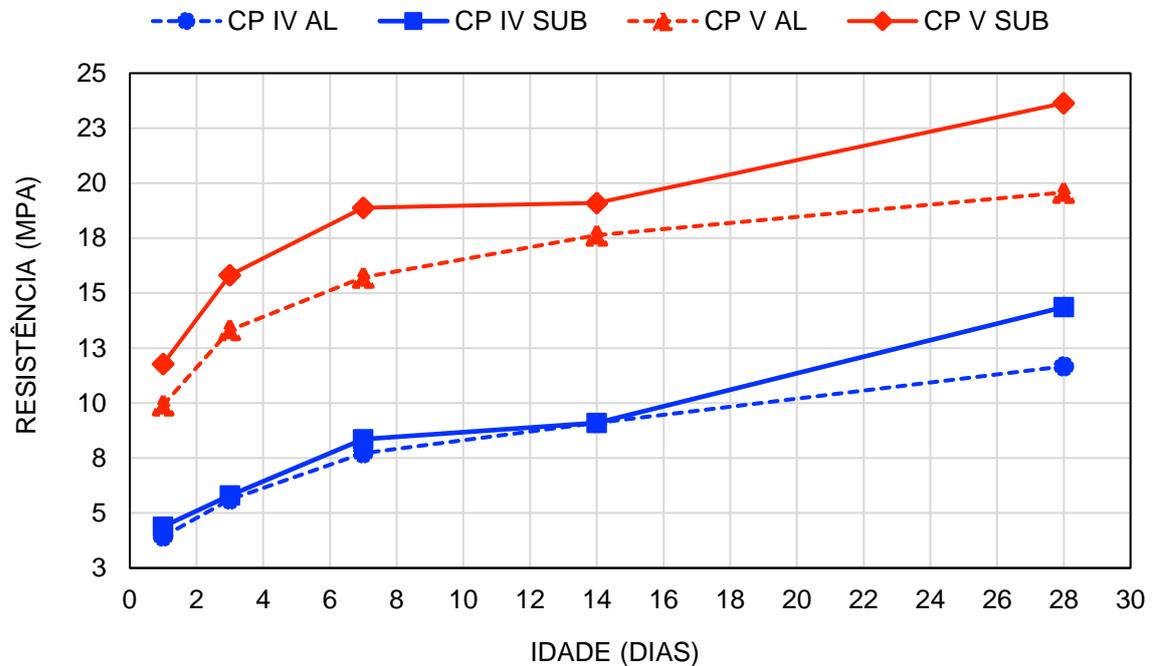
Quadro 3 – Resistências médias e desvio Padrão.

IDADE	CP IV AL		CP IV SUB		CP V AL		CP V SUB	
	MPa, méd.	Sd						
1	3,93	0,301	4,39	0,271	9,91	0,619	11,78	0,237
3	5,62	0,513	5,80	0,184	13,33	0,655	15,82	0,732
7	7,72	0,329	8,36	0,318	15,71	0,836	18,88	0,261
14	9,10	0,642	9,10	0,530	17,63	0,280	19,10	2,207
28	11,67	1,262	14,36	1,936	19,58	1,784	23,64	0,607

Fonte: Autoria Própria.

No gráfico da Figura 15 é possível observar que os concretos que foram executados utilizando o cimento CP V ARI RS obtiveram resultados de resistência maiores que os concretos que utilizaram o cimento CP IV, embora o mesmo traço tenha sido utilizado. Além disso, pode-se observar que o fator cura interferiu sutilmente nos resultados, sendo a cura submersa capaz de fornecer maiores valores de resistência à compressão, principalmente aos 28 dias. Este fato fica mais destacado para o traço com cimento CP V. É importante salientar que as condições climáticas também afetam os resultados. O Quadro 4 mostra os dados de temperatura e umidade no laboratório nas respectivas idades, o que contribuir para o melhor entendimento dos resultados, já que a umidade do ambiente se encontrava predominantemente alta.

Figura 15 – Resistência à compressão média vs. idade.



Fonte: Autoria Própria.

Quadro 4 – Controle temperatura e umidade.

IDADE	Temperatura (°C)	Umidade (%)
1	9,3	81
3	17,9	100
7	9,0	94
14	23,4	82
21	18,8	69
28	17,6	59

Fonte: Autoria Própria.

Com isso foi possível observar que os resultados dos ensaios à compressão dos corpos de provas expostos a cura ao livre na data de 14 dias foram iguais ou muito próximos aos resultados dos corpos de provas em cura submersa. Esse acontecimento se deu pelo motivo dos dias estarem com temperaturas muito baixas e uma porcentagem de umidade extremamente alta. De maneira geral, os resultados

à compressão foram coerentes ao previsto, onde os corpos de prova em cura submersa se mostram mais resistentes que os corpos de prova em cura ao ar livre.

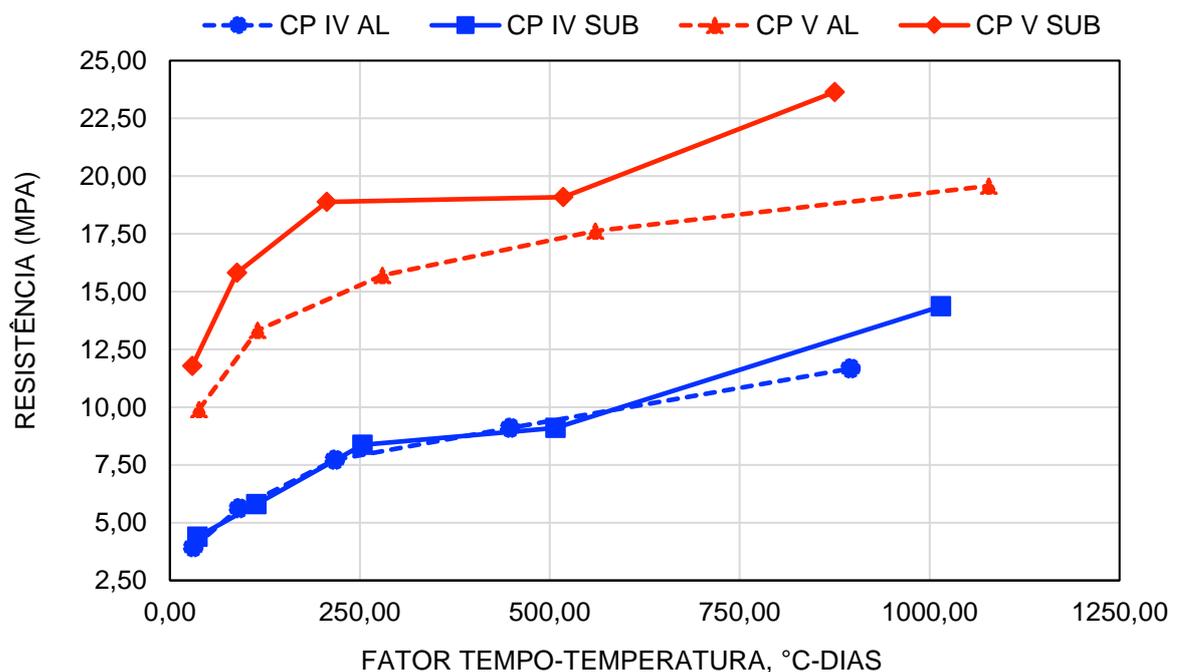
Com os dados obtidos por meio das leituras das temperaturas, resumidos no no Anexo E, foi possível determinar, por meio da Equação 1, a maturidade, ou seja, o fator tempo-temperatura dos concretos estudados. O Quadro 5 demonstra um exemplo de como foram realizados os cálculos. A Figura 16 mostra os dados de resistência à compressão pelo fator tempo-temperatura (Maturidade). Os dados individuais encontram-se descritos no Anexo F.

Quadro 5 – Exemplo de variáveis utilizadas para o cálculo da maturidade utilizando a equação de Nurse-Saul

CP IV AL					Maturidade
Idade	$f_{cm}$ (MPa)	T (°C)	To (°C)	$\Delta t$ (dias)	
1	3,93	21,00	-10	1	31,00
3	5,62	20,25	-10	3	90,75
7	7,72	21,00	-10	7	217,00
14	9,10	22,00	-10	14	448,00
28	11,67	22,00	-10	28	896,00

Fonte: Autoria Própria.

Figura 16 – Resistência à compressão média vs. Fator Tempo-Temperatura



Fonte: Autoria Própria.

Analisando o gráfico da Figura 16, tratando-se dos concretos com cimento Portland CP IV, observa-se que não há uma diferença visível entre as curvas para os dois métodos de cura. A hidratação de concretos com cimento CP IV (pozolânico) ocorre de forma mais lenta que para o CP V (alta resistência inicial) e, devido a umidade do ambiente em laboratório estar mais elevada, os resultados de resistência foram semelhantes para o concreto com CP IV. Por outro lado, é possível constatar que o fator tempo-temperatura do traço submetido a cura submersa é maior que a do traço submetido a cura ao ar livre, tal diferença deve-se pelo fato de que o traço submerso registrou temperaturas maiores que as do traço ao ar livre.

Já para os concretos com cimento Portland CP V, a diferença do tipo de cura fica mais evidente, no qual aqueles submetidos a cura submersa obtiveram uma resistência ligeiramente maior. Observa-se que os valores do fator tempo-temperatura estão deslocados para a direita para a cura ambiente, significando que houve maiores diferenças de temperatura para um determinado intervalo de tempo. Uma vez que a reação do cimento Portland e água é exotérmica, a perda de água para o ambiente através da exsudação e evaporação, pode acarretar na variação da temperatura interna e diminuição da resistência mecânica, principalmente para concretos cujo processo de hidratação é mais acelerado.

Através do gráfico da Figura 16 é possível estimar a resistência do concreto em qualquer idade quando o fator tempo-temperatura do traço for conhecido. Para tanto, é necessário obter os valores de temperatura interna do concreto *in loco* e, através da equação de Nurse-Saul, obter o índice de Maturidade. Assim, estima-se a resistência à compressão equivalente. Cabe ressaltar, no entanto, que é necessário que o concreto *in loco* esteja submetido a condições de cura semelhante ao concreto avaliado pelo método da Maturidade em laboratório.

Os gráficos apresentados na Figuras 16 são as curvas reais ou desejadas, obtidas por meio dos ensaios e aplicações de dados na equação de maturidade para as mesmas condições de cura. Entretanto, tais curvas encontradas muitas vezes não representam de maneira real o que é executado em obras. Como já explicado anteriormente, muitas vezes o concreto não é curado ou é curado de maneira equivocada, assim não atingindo a sua resistência esperada.

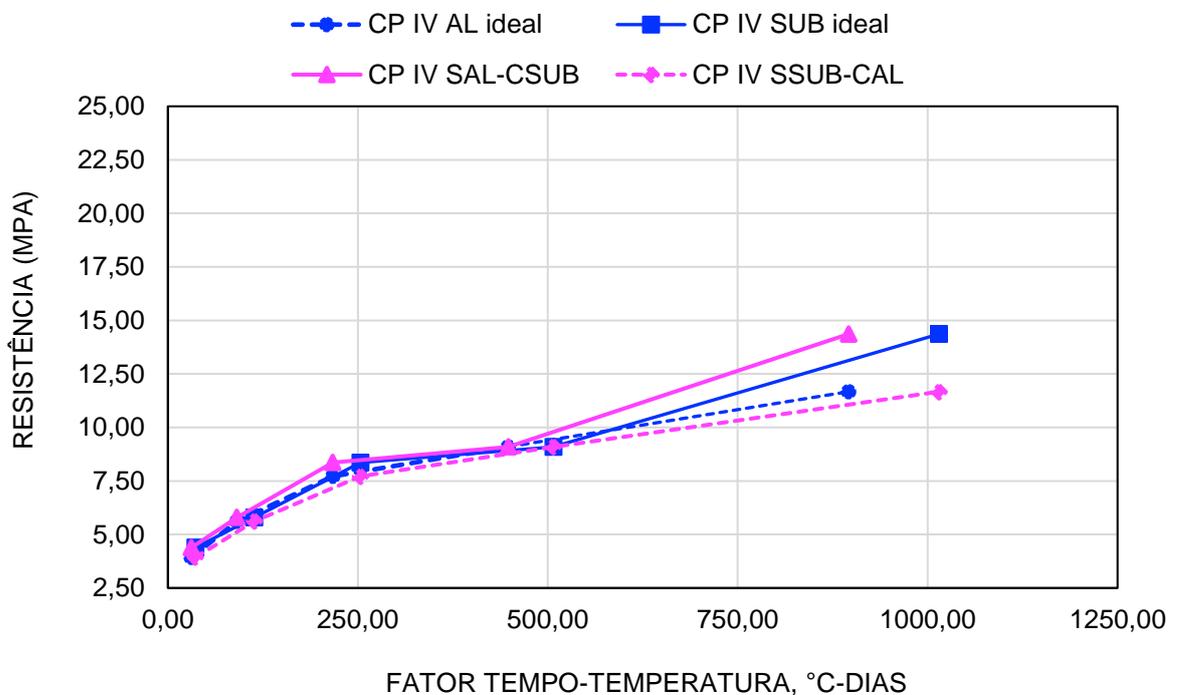
Dessa forma, o método poderá superestimar, ou, até mesmo subestimar os valores de resistência à compressão. Dessa forma, visando comparar os dados de

temperatura obtidos nos corpos de prova curados ao ar, com os valores de resistência obtidos em cura submersa, e vice-e-versa, os dados foram simulados e apresentados nas Figuras 17 e 18.

A Figura 17 mostra os dados para o CP IV, onde “CP IV ideal” refere-se a curva real (mesma condição de cura), “CP IV SAL-CSUB” refere-se à medição do sensor em corpos de prova ao ar livre com resistências obtidas através a cura submersa; e “CP IV SSUB-CAL” refere-se à medição do sensor na cura submersa, com valores de resistência obtidos na cura ao ambiente de laboratório. Da mesma forma, a Figura 18 mostra os valores, seguindo a mesma legenda, para os concretos com cimento CP V.

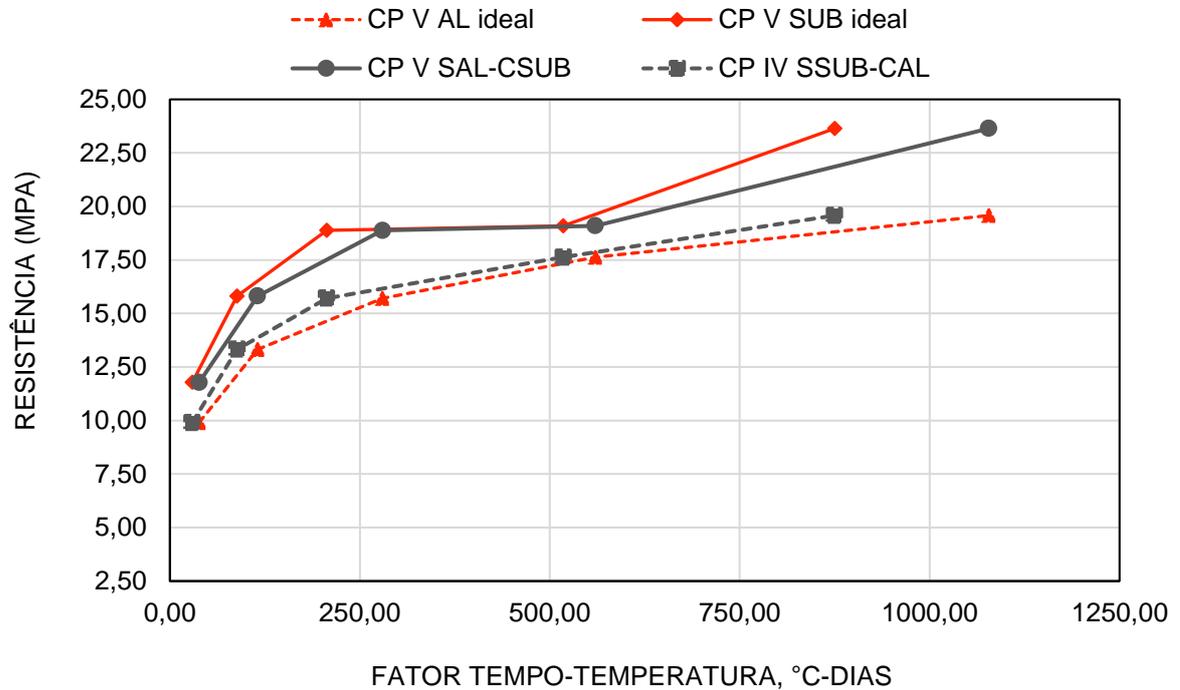
Na Figura 17 e 18 é possível observar que as curvas simuladas ficaram próximas das curvas reais. Entretanto, na Figura 17 pode-se ver que as curvas simuladas parecem formar limites máximos e mínimos onde as curvas reais se encaixam. O contrário ocorre para os concretos com CP V, na Figura 18, onde as curvas simuladas ficaram entre as curvas reais.

Figura 17 – Resistência à compressão vs. Fator tempo-temperatura para concretos com CP IV: curvas comparativas considerando diferentes tipos de cura.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 18 – Resistência à compressão vs. Fator tempo-temperatura para concretos com CP V: curvas comparativas considerando diferentes tipos de cura.



Fonte: Autoria Própria.

Através dos gráficos da Figura 17 e 18, é possível determinar a resistência estimada do concreto em uma idade qualquer, comparando o resultado com as curvas reais e com as curvas simuladas. Para exemplificar esta análise, o Quadro 6 mostra dados de temperatura simulando um valor obtido *in loco*, na idade de 21 dias (escolhida aleatoriamente para análise), para o concreto com cimento CP IV, em condições de cura ambiente. Aplicando os dados na equação de Nurse-Saul, chega-se a um valor para o fator tempo-temperatura, conforme mostrado na coluna Maturidade do Quadro 6.

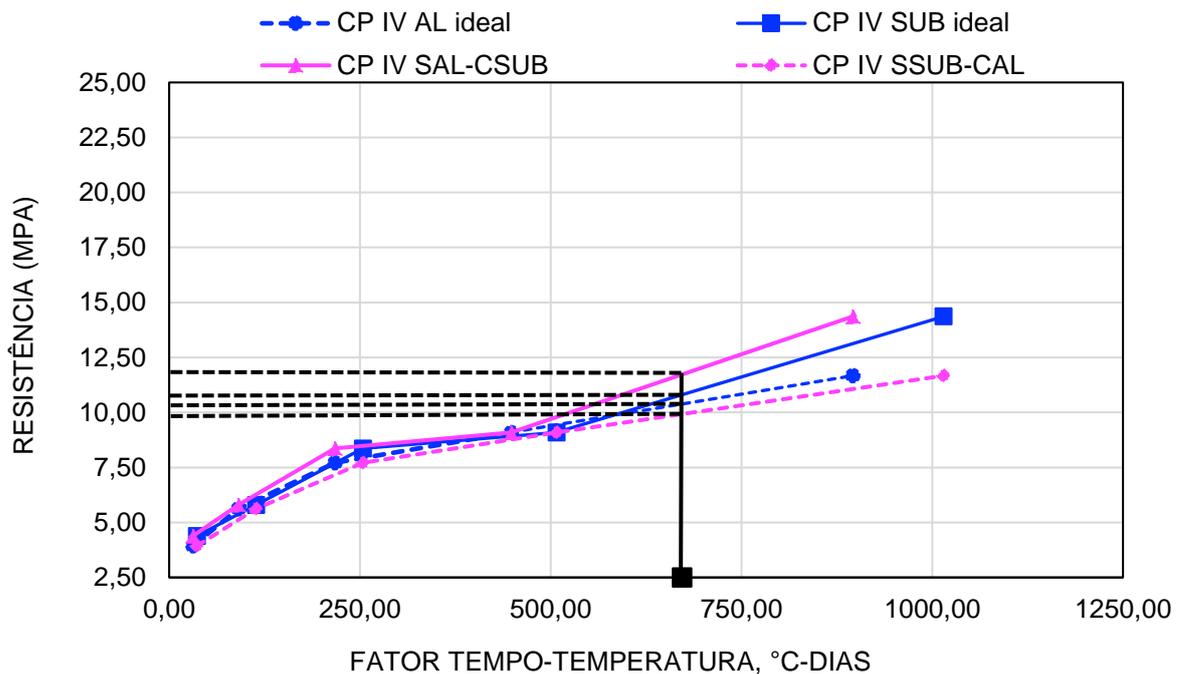
Quadro 6 – CP IV maturidade aos 21 dias

CP IV AL		Maturidade
IDADE	°C	
21	22,00	672,00

Fonte: Autoria Própria.

Através do fator tempo-temperatura é possível estimar a resistência do concreto, através das curvas considerando os diferentes tipos de cura. A Figura 19 ilustra as comparações feitas para o concreto com cimento CP IV. O Quadro 7 descreve os resultados obtidos.

Figura 19 – Resistência estimada CP IV para maturidade aos 21 dias



Fonte: Autoria Própria.

Quadro 7 – Resultados resistência estimada CP IV aos 21 dias

CP IV			
Ideal-SSUB-CSUB	Ideal-SAL-CAL	SAL-CSUB	SSUB-CAL
11,5 MPa	10,5 MPa	12,0 MPa	9,9 MPa

Fonte: Autoria Própria.

Com isso, observamos que a resistência “ideal”, isto é, cura submersa com medição do sensor em corpos de prova submersos (Ideal-SSUB-CSUB), e cura ambiente com medição sensor em corpos de prova curados à mesma temperatura e umidade (Ideal-SAL-CAL), deve ser cerca de 11,5 MPa e 10,5 MPa aos 21 dias, respectivamente. Entretanto, se o concreto analisado tivesse sido exposto a cura

ambiente (aproximadamente 20°C e umidade de 70%) em obra, sendo, portanto, os dados do sensor obtidos nesta mesma condição, estimar-se-ia uma resistência de 12 MPa utilizando a curva SAL-CSUB, para corpos de prova levados ao laboratório e ensaiados a partir de cura submersa. Isto indica que a resistência estaria superestimada em comparação à cura em obra na mesma condição do sensor (SAL-CAL), a qual presumiria uma resistência de 10,5 MPa.

Por outro lado, se o concreto em obra estivesse submetido à cura úmida constante, e, portanto, o sensor na mesma condição, estimar-se-ia uma resistência de 9,9 MPa, caso os corpos de prova levados ao laboratório para teste, estivessem submetidos à cura ambiente em laboratório, isto é, utilizando-se a curva SSUB-CAL. Dessa forma, a resistência estaria subestimada, uma vez que a ideal seria 11,5 MPa (SSUB-CSUB). Assim, é possível, por meio do gráfico, observar a influência do tipo de cura na resistência do concreto e a importância de realizar testes em laboratório de amostras nas mesmas condições da obra. Como geralmente a cura em obra não é tão controlada como ocorre em laboratório, observa-se que é comum obter, portanto, valores de resistência à compressão superestimados.

O Quadro 8 mostra os dados simulados para os concretos com CP V, para a mesma idade exemplificada de 21 dias, considerando as condições de cura em obra a uma temperatura aproximadamente 20°C e umidade de 70%. Aplicando os dados à equação de Nurse-Saul, chega-se a um valor para o fator tempo-temperatura (índice de Maturidade) mostrado no Quadro 8.

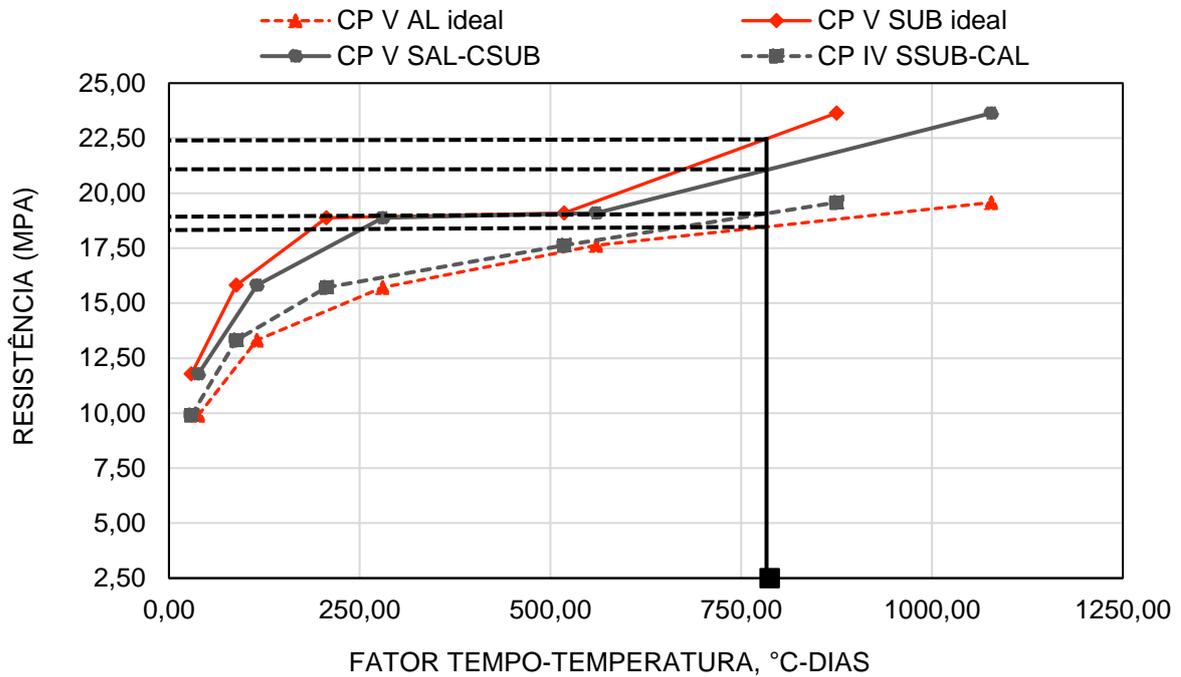
Quadro 8 – CP V maturidade aos 21 dias

CP V AL		Maturidade
IDADE	°C	
21	27,50	787,50

Fonte: Autoria Própria.

Através do fator tempo-temperatura é possível estimar a resistência do concreto, através das curvas considerando os diferentes tipos de cura. A Figura 20 ilustra as comparações e o Quadro 9 mostra os resultados obtidos.

Figura 20 – Resistência estimada CP V para maturidade aos 21 dias



Fonte: Autoria Própria.

Quadro 9 – Resultados resistência estimada CP V aos 21 dias

CP V			
Ideal-SSUB-CSUB	Ideal-SAL-CAL	SAL-CSUB	SSUB-CAL
22,5 MPa	18,5 MPa	21,5 MPa	19,5 MPa

Fonte: Autoria Própria.

Através dos dados, observamos que a resistência “ideal”, isto é, cura submersa com medição do sensor em corpos de prova submersos (Ideal-SSUB-CSUB), e cura ambiente com medição sensor em corpos de prova curados à mesma temperatura e umidade (Ideal-SAL-CAL), deve ser cerca de 22,5 MPa e 18,5 MPa aos 21 dias, respectivamente. Entretanto, se o concreto analisado tivesse sido exposto a cura ambiente (aproximadamente 20°C e umidade de 70) em obra, sendo, portanto, os dados do sensor obtidos nesta mesma condição, estimar-se-ia uma resistência de 21,5 MPa utilizando a curva SAL-CSUB, para corpos de prova levados ao laboratório e ensaiados a partir de cura submersa. Isto indica que a resistência estaria superestimada em comparação à cura em obra na mesma condição do sensor (SAL-

CAL), a qual presumiria uma resistência de 18,5 MPa. Neste caso, ocorre, na idade analisada, uma variação maior que para o cimento CP IV, indicando a maior sensibilidade do cimento CP V às variações de temperatura e umidade devido às reações de hidratação mais aceleradas.

Todavia, se o concreto estivesse submetido à cura úmida constante em obra, e, portanto, o sensor na mesma condição, estimar-se ia uma resistência de 19,5 MPa, caso os corpos de prova levados ao laboratório para teste, estivessem submetidos à cura ambiente em laboratório, isto é, utilizando-se a curva SSUB-CAL. Dessa forma, a resistência poderia estar ligeiramente subestimada, uma vez que a ideal seria 22,5 MPa (SSUB-CSUB). Assim, é possível, por meio do gráfico, observar a influência do tipo de cura na resistência do concreto e a importância de realizar testes em laboratório de amostras nas mesmas condições da obra.

É importante ressaltar que estes são apenas alguns exemplos, e são necessários dados estatísticos para avaliar se as diferenças são significativas ou não. Além disso, observa-se, através das curvas, que estes valores podem ser próximos ou mais distantes dependendo da idade analisada, sendo, portanto, a diferença mais ou menos considerável. Deve-se considerar ainda, que é possível obter diferentes temperaturas, tanto *in loco* quanto em laboratório, dependendo da estação, principalmente em situações de calor extremo, o que pode levar a valores de resistência e curvas diferentes às obtidas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos itens a seguir são discutidas as principais conclusões do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros, visando suprir as delimitações desta pesquisa e contribuir com o avanço do estudo na área.

### 5.1 Conclusões

Neste trabalho foi analisado como o tipo de cimento e o tipo de cura poderia influenciar na resistência à compressão do concreto utilizando o método da maturidade. Para realizar a pesquisa foi necessário realizar uma coletada diária dos dados das temperaturas dos concretos estudados, com o intuito de aplicar esses dados na equação de Nurse-Saul para obter a maturidade dos concretos. Para realizar as curvas de maturidade foram analisadas as resistências em cinco idades em 1, 3, 7, 14 e 28 dias. Através dos dados obtidos foi possível concluir que:

- Por meio do gráfico de resistência, verificou-se que os concretos que utilizaram o cimento CP V ARI RS obtiveram resultados à compressão melhores que os obtidos para os concretos com o cimento CP IV, mostrando que para a pesquisa realizada, o tipo de cimento Portland utilizado para cada concreto exerceu uma influência na resistência à compressão para um mesmo traço estudado. Considerando a exposição ao mesmo tipo de cura, observou-se que o concreto com CP V exposto a cura ambiente em laboratório resultou em uma resistência cerca de 68% maior que o concreto com o cimento CP IV exposto a mesma cura. O concreto com CP V exposto a cura submersa apresentou resultados cerca de 64% maiores que o concreto com CP IV exposto a mesma cura.
- Comparando-se individualmente a influência do tipo de cura na resistência à compressão dos concretos para os diferentes tipos de cimento Portland, observou-se que os concretos executados com cimento CP IV expostos a cura submersa atingiram uma resistência média aos 28 dias 23% maior que o concreto que estava em cura ambiente. Já para o concreto com cimento CP V, a cura submersa apresentou um valor cerca de 21% maior que o exposto a cura ambiente na resistência média aos 28 dias.

- Através dos gráficos de Resistência à compressão vs. Fator tempo-temperatura (índice de maturidade), é possível entender o comportamento dos concretos estudados e possibilitar a previsão da resistência em idades distintas.
- A temperatura e a umidade do ambiente do laboratório exerceram influência nos resultados das curvas de maturidade dos concretos curados em comparação à cura submersa, principalmente para os concretos com cimento CP V.
- Na simulação exemplificada, para uma temperatura interna do concreto com CP IV *in loco* de 22°C aos 21 dias, considerando que a cura do concreto estaria em ambiente (aproximadamente 20°C e umidade de 70%), o valor de resistência à compressão obtido através da curva considerando a cura submersa (SAL-CSUB), estaria **superestimada** cerca de 14,29% comparada com a curva ideal para cura ambiente (i.e., corpos de prova medidos e curados à temperatura ambiente). Entretanto, se o concreto em obra estivesse submetido à cura úmida constante, e fosse utilizado à curva considerando cura ambiente (SSUB-CAL), sua resistência estaria **subestimada** cerca de 13,91% comparada com a curva ideal para cura submersa (i.e., corpos de prova medidos e curados em água).
- Na simulação exemplificada, para uma temperatura interna do concreto com CP V *in loco* de 27,5°C aos 21 dias, considerando que a cura do concreto estaria em ambiente (aproximadamente 20°C e umidade de 70%), o valor de resistência à compressão obtido através da curva considerando a cura submersa (SAL-CSUB), estaria **superestimada** cerca de 16,21% comparada com a curva ideal para cura ambiente (i.e., corpos de prova medidos e curados à temperatura ambiente). Entretanto, se o concreto em obra estivesse submetido à cura úmida constante, e fosse utilizado à curva considerando cura ambiente (SSUB-CAL), sua resistência estaria **subestimada** cerca de 13,33% comparada com a curva ideal para cura submersa (i.e., corpos de prova medidos e curados em água).
- A utilização do Arduino para a coleta de dados das temperaturas apresentou-se como um método viável e econômico. Durante a pesquisa foi possível desenvolver novos códigos que permitiram aumentar a precisão da leitura dos dados, através de peças eletrônicas de baixo custo e substituindo equipamentos de alto valor financeiro. Assim, o Arduino tornar-se uma alternativa viável e de fácil acesso para a realização de pesquisas semelhantes.

Como conclusão geral, para o traço estudado, considerando as mesmas condições de temperatura e umidade (típicas do período de inverno), sugere-se, tanto para os concretos com CP IV como CP V, o uso das curvas considerando a cura ambiente para previsão da resistência à compressão, embora o sensor esteja medindo concretos *in loco* submetidos à cura úmida ou ambiente. As sugestões devem-se ao fato de, assim, ser possível a obtenção de valores subestimados de resistência à compressão (cerca de 13%), estando, portanto, tais valores mais a favoráveis à segurança da estrutura de concreto. Cabe lembrar, que as curvas devem ser utilizadas em épocas do ano em que as condições de temperatura e umidade estejam semelhantes. Novas curvas devem ser traçadas para condições de ambientes típicas do verão, já que podem acelerar o processo de hidratação e diferenciar dos resultados obtidos nesta pesquisa.

## 5.2 Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- A realização de ensaios auxiliares para determinar a Energia de Ativação dos cimentos que serão estudados. Com tal informação é possível utilizar a equação de Equação de Arrhenius – Conceito de Idade Equivalente, que é um método mais eficaz para o estudo do método da maturidade.
- A execução dos ensaios para obtenção das curvas (resistência vs. maturidade) em climas com temperaturas ambientes mais elevadas (típicas do verão) para verificar se há influência nos resultados finais e, assim, obter novas curvas e novas previsões de resistência à compressão.
- Substituir a utilização da Protoboard por uma placa impressa, para que os cabos não sejam mais conectados e sim soldados na placa, impedindo que interferências elétricas possam resultar em leituras equivocadas ou fora dos padrões esperados. Para que as leituras possam ser ainda mais precisas é proposto a utilização do Código do Arduino e o esquema elétrico utilizando um amplificador de tensões, o código e o esquema elétrico estão descritos e ilustrados no Anexo A do trabalho.
- A realização de estudos com outros tipos de traço, cimentos e contendo aditivos e adições minerais, para determinar o seu comportamento.

- A coleta de dados por mais tempo, possibilitando a plotagem de curvas com informações das idades mais avançadas.

## REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials – ASTM. Prática padrão para estimando a resistência do concreto pelo método de maturidade. **ASTM C 1074**. 2004.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Agregados — Determinação massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapmann. **ABNT NBR 9776**. 2003.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Cimento Portland — Requisitos. **ABNT NBR 16697**. 2018.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Concreto — Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. **ABNT NBR 5739**. 2007.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. **ABNT NBR 5738**. 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. **ABNT NBR 12655**. 2015.
- Associação Mercosul de Normalização. Agregado graúdo — Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. **NM 53**. 2009.
- Associação Mercosul de Normalização. Agregados — Determinação da composição granulométrica. **NM 248**. 2001.
- CARINO, N.J; LEW, H.S. **The maturity method: from theory to application**. Estados Unidos da América, 2001.
- CARVALHO, Adriano dos Guimarães. **Energia de ativação dos concretos: experimentação e moldagem**. Rio de Janeiro: 2002.
- CIOTTA, Pablo Henrique; Machado Junior, Francisco R. da Silva. **A importância do controle de qualidade e rastreabilidade do concreto armado usinado *in loco***. **Revista Tecnológica / ISSN 2358-9221**, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 1 - 18, may 2018. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/revista/index.php/revista/article/view/250>>.
- DA SILVA, Julierme Siriano; D’OLIVEIRA, Maria Carolina de P. E.; SCHMITT, Evandro; FAGUNDES, Fabiano. **Viabilidade da aplicação do método da maturidade no monitoramento da resistência de concretos em regiões de clima tropical**. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 10 n. 2 (Agosto, 2018): **TECNOLOGIA & INFORMAÇÃO - ISSN 2176-7270**. Disponível em: < <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/12015>>.
- DINIZ, Hugo A. A.; MONTE JUNIOR, Italo Vale; OLIVEIRA, Samuel Silva; SOUZA, Kalina J. Marques. **Influência da cura por imersão em concretos convencionais**. **Revistas Científicas**, v. 2 n. 3 (2015): **TECNOLOGIA & INFORMAÇÃO - ISSN 2318-9622**.

Disponível em: <<https://repositorio.unp.br/index.php/tecinfo/article/view/1289/868>>.

EVANGELISTA, Ana C. Jorge. **Avaliação da resistência do concreto usando ensaios não destrutivos**. Rio de Janeiro: 2002.

FORTES, Rita Moura; MERIGHI, João Virgílio. **Controle tecnológico e controle de qualidade – um alerta sobre sua importância**. Ilha Solteira: 2002.

GONÇALVES, Jardel Pereira; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; FAIRBAIRN, Eduardo de M. Rego. **Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 83-94 out./dez. 2006.

Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/237842674>>.

HELENE, Paulo R. L. **Controle de qualidade do concreto**. São Paulo: 1986.

HERRERO, C. Vázquez; LAJE, I. Matínez; TEMBLEQUE, F. Sánchez. **A new procedure to ensure structural safety based on the maturity method and limit state theory**. La Coruña, Espanha: 2012.

IKEMATSU, Paula; LAGUNA, Luis Antonio. **A influência da temperatura na desforma do concreto**.

LORENZI, Alexandre; REGINATO, Lucas Alexandre; LORENZI, Luciani Somensi; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto. **Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto**. *Revista de Engenharia Civil IMED*, v.3 n.1 p. 3-13. 2016.

MI, Z. et. al. **Maturity model for fracture properties of concrete considering coupling effect of curing temperature and humidity**. Beijin, China: 2019.

PINTO, R. C. A. **O Método da Maturidade e sua Utilização em Construção Civil**. In: Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, 29, 2000, Punta del Este. Anais, 2000.

RASTRUP, E. **Heat hydration in concrete**. *Magazine of Concrete Research*, London, v.6, n. 17, 1954, p. 79-92.

SALVADOR FILHO, José A. Alves. **Cura térmica dos concretos de alto desempenho: Análise das propriedades mecânicas utilizando o método da maturidade**. Ilha Solteira: 2001.

SANTOS, Beatriz Menezes; AGUILAR, Maria T. Paulino; CHAHUD, Eduardo. **A Construção civil: em uma perspectiva econômica, ambiental e social**. **Editora científica digital**. ISBN: 978-65-89826-06-4, DOI: 10.37885/978-65-89826-06-4, e 1, v 1. 2021. Disponível em:

<<https://downloads.editoracientifica.org/articles/210304010.pdf>>.

SENEFF, Luciano; FOLGUERAS, Marilena V.; HOTZA, Dachamir. **Hidratação do cimento CP V ARI - RS: Influência da água nas reações de hidratação**. 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2005, São Pedro – SP. Joinville: 2005.

SILVA, Carlos A. Rufino. **Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinza de casca de arroz**. Ilha Solteira: 2004.

SOUTSOS, M.; KANAVARIS, F.; HATZITHEODOROU, A. **Critical analysis of strength estimates from maturity functions**. Londres, Reino Unido: 2018.

VOLLPRACHT, Anya; SOUTSOS, Marios; KANAVARIS, Fragkoulis. **Strength development of GGBS and fly ash concretes and applicability of fib model code's maturity function – A critical review**. Aachen, Alemanha: 2018.

YIKICI, T. Alper; CHEN, Hung-Liang (Roger). **Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete**. Morgantown, Estados Unidos: 2015.

## ANEXO A – Dados das leituras do Arduino que devem ser convertidos em Temperaturas

Quadro 10 – Leituras do dia 1 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
112	110	106	106	107	104	102	104
111	109	105	106	107	104	102	104
111	110	106	106	107	104	102	104
112	108	106	106	107	105	102	104
112	109	105	105	107	104	102	103
112	109	106	106	107	104	102	104
111	110	106	106	107	104	102	103
112	109	106	106	107	104	101	103
112	109	105	106	107	105	101	103
112	107	106	106	108	104	102	104
111	109	105	106	107	104	102	104
112	109	105	106	108	104	102	103
111	108	105	106	107	104	102	104
111	109	105	106	108	105	101	104
111	109	105	106	107	104	102	103
112	108	105	106	107	105	102	103
111	109	105	106	107	105	101	103
111	109	105	106	107	105	101	103
111	109	106	106	107	105	101	104
112	109	105	106	107	104	101	103
112	110	105	106	107	104	102	103
111	110	106	106	107	105	101	103
111	109	105	105	107	105	101	103
111	109	105	106	107	104	102	103
111	109	105	106	107	104	101	103
112	109	105	106	107	104	102	103
112	109	105	106	107	105	101	103
112	110	105	106	108	105	101	103
112	110	105	106	107	105	102	103
112	110	105	106	107	105	102	103
112	109	105	106	108	105	102	104
112	110	105	106	107	105	101	102
112	110	105	106	107	105	101	103
111	109	105	106	107	105	101	103
112	110	105	106	107	105	101	103
112	109	105	106	108	105	101	103
111	110	105	106	107	106	101	103
112	110	105	106	108	105	101	103

111	110	105	105	107	105	101	104
112	110	105	106	108	105	101	103
112	109	105	105	107	105	101	103
112	110	105	106	107	105	101	103
112	110	105	106	107	105	101	103
112	110	105	105	107	105	101	103
111	110	105	106	108	105	102	103
112	110	105	106	107	105	101	104
112	110	106	106	108	105	102	103
111	110	105	106	108	105	101	103
111	110	105	106	107	105	101	103
111	110	106	106	107	105	102	103
112	110	105	106	107	104	102	103
111	110	106	106	107	105	101	103
111	110	106	106	107	105	102	104
111	110	105	106	107	104	102	103
111	111	105	106	107	104	102	103
112	110	106	106	107	105	102	103

Fonte: Autoria Própria.

#### Quadro 11 – Leituras do dia 2 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
111	110	106	106	107	104	102	104
111	110	106	106	108	105	102	103
111	110	105	106	108	105	102	103
112	110	106	106	107	105	102	103
111	109	105	107	107	105	102	103
111	110	106	106	107	104	102	103
111	110	105	106	107	104	101	104
111	110	105	106	107	105	102	103
112	110	105	106	108	104	102	103
112	110	105	106	107	105	102	103
112	110	106	106	107	104	101	103
112	110	105	106	107	104	101	103
111	110	105	106	108	105	101	104
112	110	106	106	107	104	102	103
112	109	105	106	108	105	101	103
112	110	106	106	107	105	102	103
112	109	106	106	107	105	101	103
112	109	106	106	108	105	102	103
112	109	105	106	107	105	102	103
112	110	105	106	107	105	101	103
112	109	106	106	108	105	101	103

111	109	105	106	107	105	101	103
112	110	105	106	107	105	102	103
111	110	105	106	108	105	101	103
112	110	105	106	107	105	101	103
111	110	106	106	107	104	102	103
112	110	106	106	107	105	101	103
112	110	106	106	107	104	102	103
112	109	106	105	107	104	102	103
112	111	105	106	107	105	102	103
112	110	106	106	107	104	101	103
111	110	106	106	107	105	102	103
111	109	106	106	108	104	102	102
111	109	105	106	107	104	101	103
112	110	106	106	108	105	102	104
111	110	106	106	107	105	101	103
112	110	106	106	108	105	102	104
111	110	106	106	107	104	102	103
112	110	105	106	107	104	102	103
112	110	106	106	107	105	102	103

Fonte: Autoria Própria.

#### Quadro 12 – Leituras do dia 3 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
112	110	106	107	107	104	101	103
112	110	106	106	107	104	102	103
111	109	106	106	107	105	102	103
111	109	105	107	107	104	101	103
112	110	105	107	107	105	102	103
111	110	105	106	107	105	102	103
112	110	105	106	107	105	102	103
111	110	106	106	107	104	101	103
111	110	105	106	107	104	101	103
111	110	106	106	107	104	102	103
112	110	105	106	107	105	102	104
111	111	105	106	107	105	102	103

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 13 – Leituras do dia 4 ao dia 7 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
112	110	106	106	107	104	102	103
111	109	105	106	107	104	102	103
111	110	106	106	107	104	101	103
111	109	106	106	106	105	101	103
112	109	106	106	107	104	102	103
112	110	106	106	107	104	102	103
112	110	105	106	107	104	102	103
111	110	105	106	107	104	101	103
112	110	105	106	107	104	102	104
111	110	105	106	107	104	103	103
111	110	106	106	108	104	101	103
112	110	105	106	107	104	102	103
111	109	104	106	107	104	102	103
111	110	105	106	107	105	101	103
112	110	105	106	107	104	102	103
112	110	105	106	107	105	101	103
112	110	105	106	107	105	102	103
111	110	106	106	107	104	101	103
111	110	105	106	107	104	102	102
111	110	106	106	107	105	101	103
111	110	106	106	107	105	101	103
112	110	105	107	107	104	101	103
111	110	105	107	107	105	102	103
111	110	106	106	107	104	101	103
111	110	106	106	107	104	102	103
112	110	105	106	106	104	102	103
111	110	105	106	107	105	102	103
111	110	105	106	107	104	101	103
111	110	106	106	107	105	102	103
112	110	105	106	107	105	102	103
112	110	106	106	107	105	102	103
112	110	105	106	107	104	102	103
112	110	105	106	107	105	101	103
111	110	106	106	107	104	102	103
111	110	106	106	107	105	102	103
111	110	106	107	107	104	101	103
111	110	106	107	107	105	102	103
111	110	106	107	107	105	101	103
111	110	106	106	107	105	102	104
112	110	105	107	108	104	102	103

111	110	106	106	107	105	102	103
111	110	105	106	107	104	102	103
112	110	106	106	108	105	101	102
112	111	105	106	108	105	102	103
112	110	106	106	107	104	102	103

Fonte: Autoria Própria.

#### Quadro 14 – Leituras do dia 8 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
112	110	105	106	107	105	102	103
111	110	105	106	108	104	102	103
111	110	105	106	107	105	102	103
111	110	105	106	107	105	102	103
111	110	105	106	107	104	101	103
111	110	106	106	107	105	102	103

Fonte: Autoria Própria.

#### Quadro 15 – Leituras do dia 9 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
111	110	105	106	107	104	102	103
111	110	105	106	107	105	101	103
112	110	106	106	107	105	102	103
113	110	105	107	107	105	101	103
111	110	105	106	107	104	102	103

Fonte: Autoria Própria.

#### Quadro 16 – Leituras do dia 10 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
112	110	106	107	107	104	101	103
111	110	106	106	107	104	101	102
112	110	106	106	107	104	101	103
112	110	106	106	107	104	100	103
111	110	105	106	107	105	101	102
112	110	106	106	107	104	101	102

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 17 – Leituras do dia 11 ao dia 13 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
112	110	106	106	108	104	101	103
112	110	106	106	107	104	101	103
112	110	106	106	107	104	101	102
111	110	106	106	107	104	101	102
112	110	107	106	107	105	101	103
111	110	107	106	107	104	101	102
111	110	107	106	108	104	101	103
112	110	107	106	107	104	101	103
112	110	106	105	107	104	101	102
112	110	107	106	107	104	101	103
112	109	107	106	107	104	101	102
111	110	107	106	107	104	101	103
111	110	106	106	107	104	101	103
112	110	106	106	107	104	101	102
111	110	106	105	107	104	101	102
112	109	106	106	107	104	101	103
112	110	107	106	107	104	101	102
111	109	106	106	107	104	101	103

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 18 – Leituras do dia 14 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
111	109	106	106	107	104	101	103
111	110	106	106	107	104	101	103
111	110	106	105	107	104	101	102
111	110	106	106	107	104	101	102
111	110	106	106	107	104	100	102

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 19 – Leituras do dia 15 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
111	110	106	106	107	104	101	102
111	110	107	106	107	104	101	103
111	110	106	106	108	104	101	102
112	109	106	106	107	104	101	102
111	110	106	105	107	104	101	103
111	110	106	106	107	104	101	103

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 20 – Leituras do dia 16 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
111	110	107	106	107	104	101	103
111	110	107	106	107	104	101	103
111	110	106	106	108	104	101	102
111	110	106	106	107	104	101	102
111	110	106	106	108	104	101	102

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 21 – Leituras do dia 21 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
111	110	107	107	107	104	102	103
111	110	107	107	107	105	101	103
111	110	106	106	107	105	101	103
111	109	106	106	107	104	101	102
111	110	106	107	108	104	102	103

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 22 – Leituras do dia 22 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
111	110	107	106	108	105	101	103
111	110	107	106	107	105	101	103
111	110	107	106	108	105	101	103
111	110	107	106	107	105	101	102
111	110	107	107	107	105	101	103
111	110	107	106	107	105	101	103

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 23 – Leituras do dia 23 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
111	110	106	107	107	105	101	103
111	110	106	106	107	105	101	103
111	110	107	106	108	105	101	103
111	110	107	106	108	105	101	103
111	110	106	106	107	105	101	103

111	110	107	107	107	105	101	103
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fonte: Autoria Própria.

#### Quadro 24 – Leituras do dia 24 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
112	110	106	107	107	105	101	103
111	110	106	106	108	105	101	102
111	110	107	106	108	105	101	103
111	110	106	106	108	104	101	103
111	110	106	107	108	105	101	103

Fonte: Autoria Própria.

#### Quadro 25 – Leituras do dia 25 ao dia 27 a serem convertidas

111	110	107	106	108	105	101	102
111	110	106	106	107	105	101	103
111	110	107	107	108	105	101	102
111	110	107	107	108	105	101	103
111	110	107	106	108	105	102	101
111	109	106	106	108	105	101	103
111	110	107	106	107	105	101	102
111	110	107	107	107	105	101	104
111	110	107	106	108	105	101	102
111	110	107	107	108	105	101	103
111	110	107	106	107	105	101	103
111	110	107	106	107	105	101	103

Fonte: Autoria Própria.

#### Quadro 26 – Leituras do dia 28 a serem convertidas

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
111	109	107	106	107	105	101	103
111	109	107	107	107	105	101	102
111	110	107	106	107	105	101	103
111	110	107	107	108	105	101	102
111	110	107	106	108	105	102	102
111	110	106	106	107	105	101	103

Fonte: Autoria Própria.

## ANEXO B – Código e Esquema elétrico com uso de amplificador

### Quadro 27 – Código com amplificador

```
byte pinoSensor[] = {4,5,6,7,8,9,10,11};
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  for(int x=0;x<8;x++){
    digitalWrite(pinoSensor[x],OUTPUT);
  }
}
void loop()
{
  medicao();
  // medicao1();
}
void medicao1()
{
  digitalWrite(pinoSensor[0],LOW);
  delay(2000);
  digitalWrite(pinoSensor[0],HIGH);
  delay(2000);
}
void medicao()
{
  delay(2000);/*leitura por segundo (para 1 minuto 60000)
  for(int x=0;x<8;x++){// Desliga todos os sensores
    digitalWrite(pinoSensor[x],LOW);
  }
  for(int x=0;x<8;x++){// registra valores sequencialmente
    delay(500);
    digitalWrite(pinoSensor[x],HIGH);
    delay(500);//tempo para leitura

    //Le saida do sensor para o arduino e registra

    Serial.print(analogRead(A1));
    Serial.print("--");
    Serial.print(analogRead(A0));
```

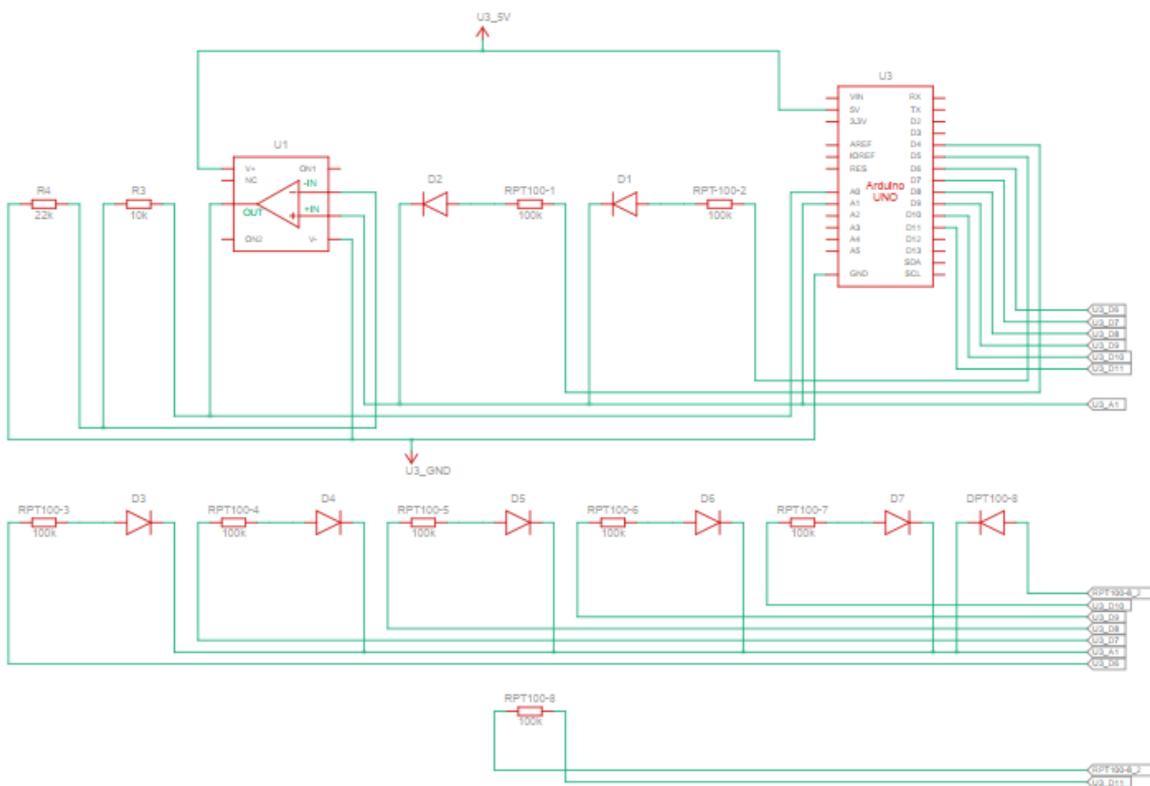
```

Serial.print(";");
if(x==7){
    Serial.println();
}
digitalWrite(pinoSensor[x],LOW);
}
for(int x=0;x<8;x++){// Desliga todos os sensores
digitalWrite(pinoSensor[x],LOW);
delay(100);
}
}

```

Fonte: Autoria Própria.

Figura 21 – Esquema elétrico com amplificador



Fonte: Autoria Própria.

## ANEXO C – Calibragem das temperaturas

Quadro 28 – Temperaturas registradas

Coleta	Temperatura convertida por sensor ( C )							
	CP IV AL							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
113	17,2	X	X	X	X	X	X	X
112	20,5	X	X	X	X	X	X	X
111	22,5	18	X	X	X	X	X	X
110	X	21,5	X	X	X	X	X	X
109	X	24,9	X	X	X	X	X	X
108	X	26,3	X	X	28	X	X	X
107	X	29	22	24	33	X	X	X
106	X	X	25,5	26,7	X	22,6	X	X
105	X	X	28,6	32,8	X	24,2	X	X
104	X	X	X	X	X	26,9	X	18,5
103	X	X	X	X	X	X	X	21
102	X	X	X	X	X	X	18,4	27
101	X	X	X	X	X	X	21,5	30
100	X	X	X	X	X	X	27	35,3

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 29 – Arredondamento das Temperaturas registradas

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
113	17	0	0	0	0	0	0	0
112	20,5	0	0	0	0	0	0	0
111	22,5	18	0	0	0	0	0	0
110	0	21,5	0	0	0	0	0	0
109	0	25	0	0	0	0	0	0
108	0	26	0	0	28	0	0	0
107	0	29	22	24	33	0	0	0
106	0	0	25,5	27	0	23	0	0
105	0	0	29	33	0	24	0	0
104	0	0	0	0	0	27	0	18,5
103	0	0	0	0	0	0	0	21
102	0	0	0	0	0	0	18	27
101	0	0	0	0	0	0	21,5	30
100	0	0	0	0	0	0	27	35

Fonte: Autoria Própria.

## ANEXO D – Resultados das resistências dos corpos de prova por idade

Quadro 30 – Resistências à compressão por idade

		CP IV		CP V	
		AL	SUB	AL	SUB
IDADE 1					
CP 1	3,78	4,45	10,17	11,92	
CP 2	3,74	4,09	9,20	11,51	
CP 3	4,28	4,62	10,35	11,92	
MÉDIA	3,93	4,39	9,91	11,78	
IDADE 3					
CP 1	5,56	6,01	13,87	16,13	
CP 2	6,16	5,72	13,51	14,98	
CP 3	5,14	5,67	12,60	16,34	
MÉDIA	5,62	5,80	13,33	15,82	
IDADE 7					
CP 1	7,95	8,50	16,40	19,13	
CP 2	7,34	8,59	14,78	18,90	
CP 3	7,86	8,00	15,95	18,61	
MÉDIA	7,72	8,36	15,71	18,88	
IDADE 14					
CP 1	9,39	9,54	17,95	16,56	
CP 2	9,54	8,51	17,43	20,15	
CP 3	8,36	9,24	17,51	20,58	
MÉDIA	9,10	9,10	17,63	19,10	
IDADE 28					
CP 1	13,12	15,39	18,90	24,01	
CP 2	11,07	15,57	21,60	22,94	
CP 3	10,82	12,13	18,23	23,97	
MÉDIA	11,67	14,36	19,58	23,64	

Fonte: Autoria Própria.

## ANEXO E – Temperaturas dos cálculos da maturidade

Quadro 31 – Temperaturas utilizadas para o cálculo da maturidade

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Tempo (dias)	CP IV AL		CP IV SUB		CP V AL		CP V SUB	
1	20,50	21,50	25,50	27,00	33,00	24,00	18,00	21,00
2	20,50	21,50	25,50	27,00	33,00	24,00	18,00	21,00
3	22,50	18,00	29,00	27,00	33,00	24,00	18,00	21,00
7	20,50	21,50	25,50	27,00	33,00	27,00	18,00	21,00
8	22,50	21,50	25,50	27,00	33,00	24,00	18,00	21,00
9	22,50	21,50	29,00	27,00	33,00	27,00	18,00	21,00
10	20,50	21,50	25,50	27,00	33,00	27,00	21,50	27,00
13	22,50	21,50	25,50	27,00	33,00	27,00	27,00	27,00
14	22,50	21,50	25,50	27,00	33,00	27,00	27,00	27,00
15	22,50	21,50	25,50	27,00	33,00	27,00	21,50	21,00
16	22,50	21,50	25,50	27,00	28,00	27,00	21,50	27,00
21	22,50	21,50	25,50	24,00	28,00	27,00	18,00	21,00
22	22,50	21,50	22,00	27,00	33,00	24,00	21,50	21,00
23	22,50	21,50	22,00	24,00	33,00	24,00	21,50	21,00
24	22,50	21,50	25,50	24,00	28,00	24,00	21,50	21,00
25	22,50	21,50	22,00	27,00	33,00	24,00	21,50	21,00
28	22,50	21,50	25,50	27,00	33,00	24,00	21,50	21,00

Fonte: Autoria Própria.

## ANEXO F – Cálculos fator tempo-temperatura

Quadro 32 – Fator tempo-temperatura para todas as idades

CP IV AL			Maturidade
IDADE	MPA	°C	
1	3,93	21,00	31,00
3	5,62	20,25	90,75
7	7,72	21,00	217,00
14	9,10	22,00	448,00
28	11,67	22,00	896,00

CP IV SUB			Maturidade
IDADE	MPA	°C	
1	4,39	26,25	36,25
3	5,80	28,00	114,00
7	8,36	26,25	253,75
14	9,10	26,25	507,50
28	14,36	26,25	1015,00

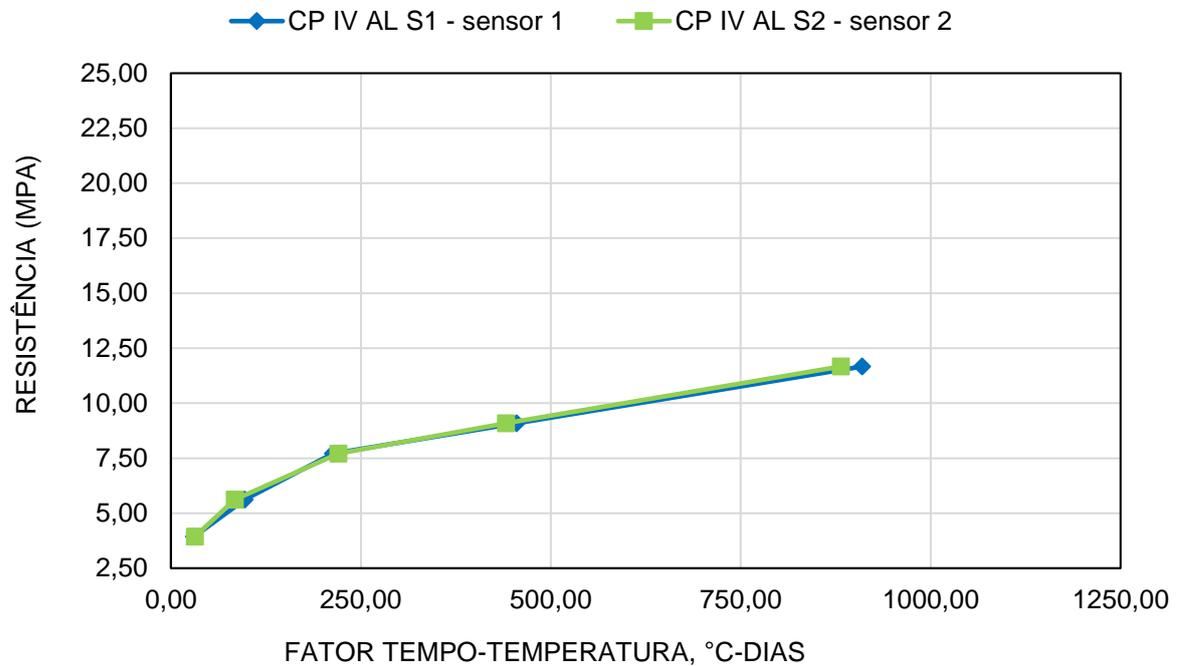
CP V AL			Maturidade
IDADE	MPA	°C	
1	9,91	28,50	38,50
3	13,33	28,50	115,50
7	15,71	30,00	280,00
14	17,63	30,00	560,00
28	19,58	28,50	1078,00

CP V SUB			Maturidade
IDADE	MPA	°C	
1	11,78	19,50	29,50
3	15,82	19,50	88,50
7	18,88	19,50	206,50
14	19,10	27,00	518,00
28	23,64	21,25	875,00

Fonte: Autoria Própria.

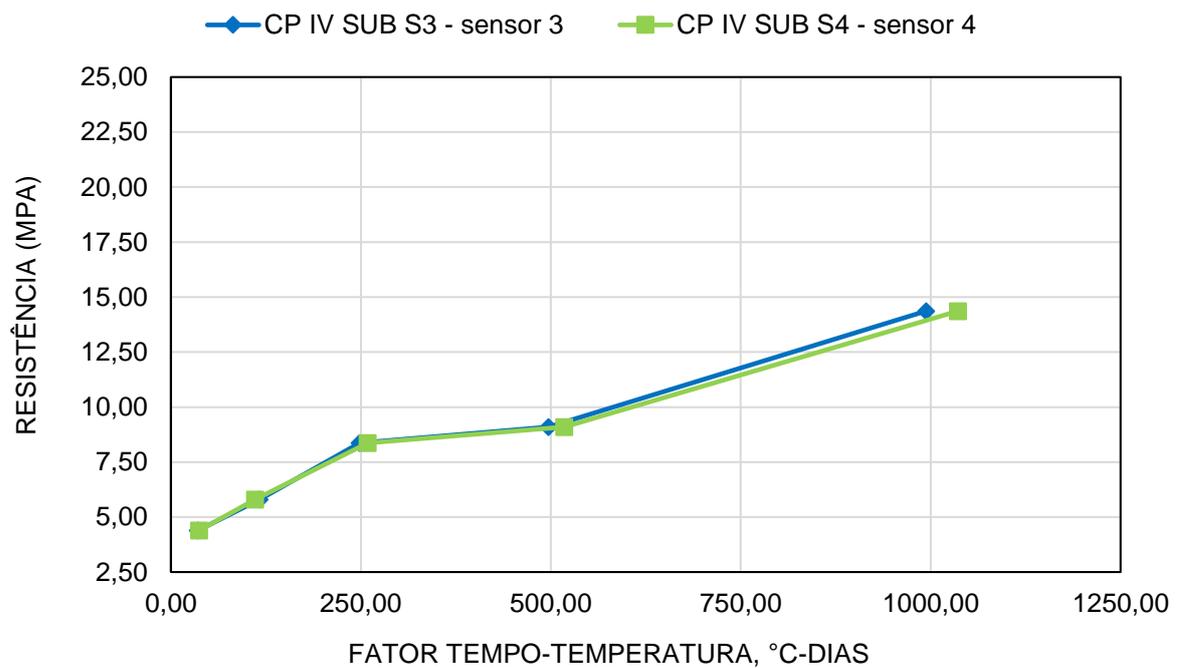
## ANEXO G – Gráficos resistência x fator tempo-temperatura, comparação entre sensores do mesmo traço com curas distintas

Figura 22 – Gráfico CP IV cura ao ar livre



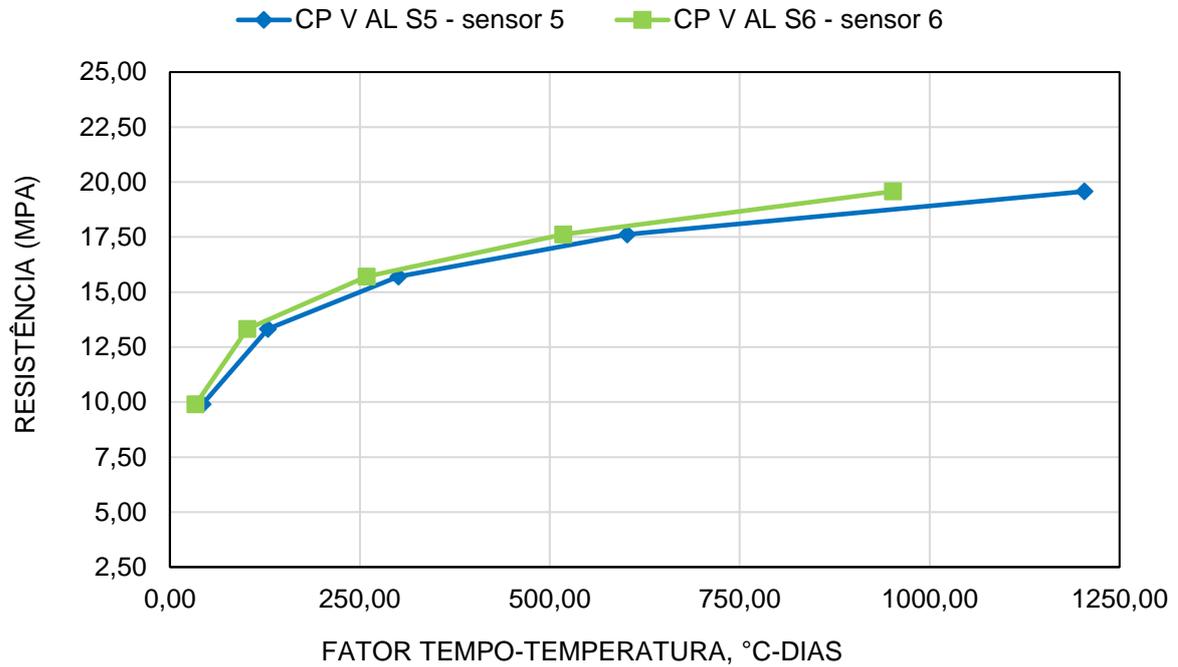
Fonte: Autoria Própria.

Figura 23 – Gráfico CP IV cura submersa



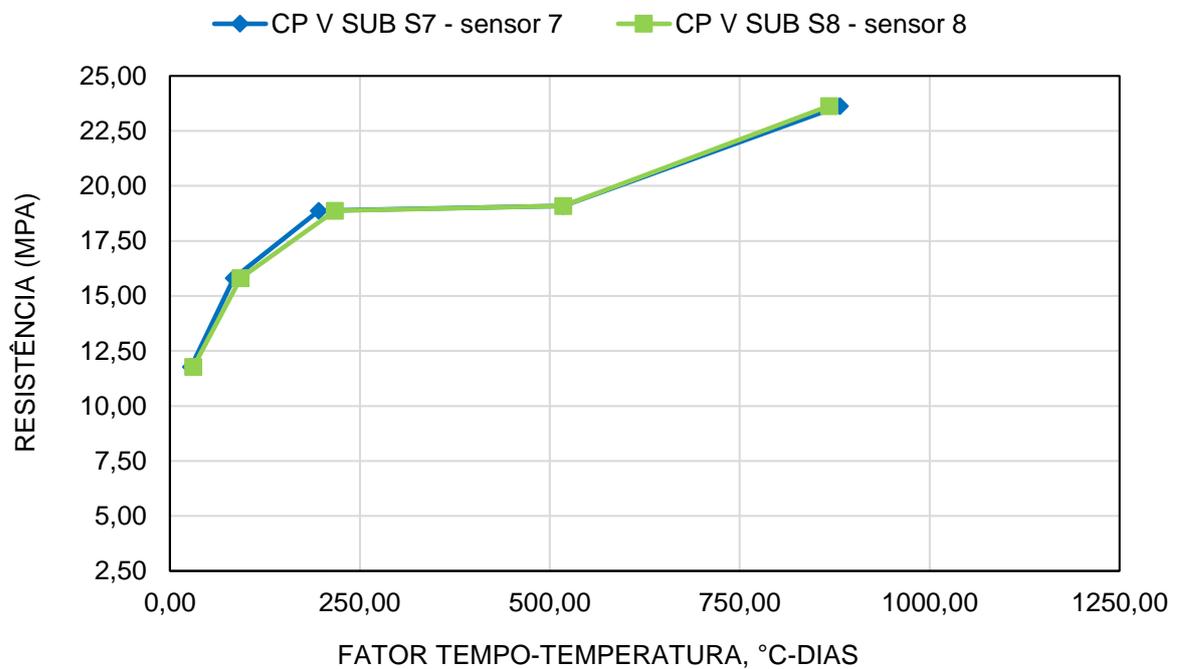
Fonte: Autoria Própria.

Figura 24 – Gráfico CP V cura ao ar livre



Fonte: Autoria Própria.

Figura 25 – Gráfico CP V cura submersa



Fonte: Autoria Própria.