

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Construção Civil

JONATHAN CHEFALY MOCHON ZAPPILE

**Desenvolvimento de sensor baseado em IoT para monitoramento
contínuo das propriedades do concreto moldado in loco**

São Paulo

2024

JONATHAN CHEFALY MOCHON ZAPPILE

Desenvolvimento de sensor baseado em IoT para monitoramento contínuo das propriedades do concreto moldado in loco

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Inovação na Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Flávio Leal Maranhão.

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 05 de Fevereiro de 2024

Assinatura do autor:

Jonathan Z.

Assinatura do orientador:

16

Catálogo-na-publicação

Zappile, Jonathan Chefaly Mochon

Desenvolvimento de sensor baseado em IoT para monitoramento contínuo das propriedades do concreto moldado in loco / J. C. M. Zappile -- versão corr. -- São Paulo, 2024.

113 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Dispositivo IoT 2.Transmissão de Dados 3.RSSI 4.Monitoramento contínuo 5.Maturidade do concreto I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

ZAPPILE, Jonathan Chefaly Mochon. **Desenvolvimento de sensor baseado em IoT para monitoramento contínuo das propriedades do concreto moldado in loco.** 2024. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Aprovado em: 13/12/2023

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Flávio Leal Maranhão - Presidente
Instituição: EP - USP
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Antonio Domingues de Figueiredo
Instituição: EP - USP
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Sandro Martini
Instituição: USJT - Externo
Julgamento: Aprovado

YHWH

AGRADECIMENTOS

Inúmeras foram as pessoas que contribuíram para que o presente trabalho fosse desenvolvido. Pessoas que sem elas, não seria possível a realização deste trabalho. Em via disto, registro os meus mais sinceros agradecimentos

A Deus, Aquele que verdadeiramente me conhece e está presente em todos os momentos de minha vida. Só Ele sabe todas as barreiras superadas neste período, Aquele que através de sua sublime sabedoria me ensina a trilhar O Caminho. Digno é o Cordeiro de Deus de receber toda honra, toda glória e todo o louvor, pelos séculos dos séculos, amém!

Aos meus pais, Fernando e Helaine, e irmão, Richard, por todo amor, incentivo, auxílio em todos os momentos e exemplos de vida. Aos meus avós paternos (*in memorian*), Fernando e Cidinha, e avós maternos, Hélio e Zoraide, por desde pequeno me ensinarem o valor do conhecimento e sempre apoiarem meus estudos. Em especial à professora e diretora Maria Aparecida Branco Zappile (Cidinha). Aos meus tios, Flávio e Helinho, e tias, Cristiane e Heliane (*in memorian*). Agradeço também a minha cunhada Gabriella Leite.

À Brenda, minha namorada, noiva e companheira, que sempre foi um exemplo de motivação, esforço, disciplina, paciência, companheirismo e amor em tudo que faz. Muito obrigado por todo apoio com palavras de incentivo e carinho.

Ao meu orientador e professor, Dr. Flávio Leal Maranhão, que não mediu esforços ao investir no meu conhecimento e no conhecimento adquirido durante a pesquisa. Agradeço por todos os questionamentos, conselhos, sugestões, paciência e apoio nesta etapa.

À Universidade de São Paulo, à Escola Politécnica, ao departamento de construção civil e a todos os profissionais pela dedicação ímpar em promover um ótimo ambiente de ensino e pesquisa. Em especial agradeço aos professores Antônio Figueiredo, Sergio Leal, Mércia Barros, Renata Monte, Franscisco Cardoso, Fabiano Corrêa, Fabio Cozman e Anna Reali. Agradeço também à Eliany Funari, e aos técnicos de laboratório, Adilson, Gilvan, Jéssica e Mario, por todo incentivo e auxílio na realização de todos os ensaios.

Agradeço a todos os integrantes que fizeram e fazem parte do grupo Geovista. Em especial aos engenheiros eletrônicos Gabriel Lima, Giovanni Schiffini, Gustavo Mansur e Sandro Sakata pelas horas de dedicação, discussão e auxílio com os dispositivos IoT (*hardware, firmware e software*). Agradeço ao Renan Andrade pelas extensas horas de discussão e orientação sobre o trabalho como um todo, desde a concepção inicial. Agradeço ao Thomás Covello pelas ricas discussões acerca do controle tecnológico do concreto, ciclos de forma e desforma em obras de infraestrutura e planejamento de ritmo de obra. Agradeço aos arquitetos e urbanistas Eduardo Cordeiro e Laura Adami pelas críticas e discussões de exposição do trabalho. Agradeço também aos engenheiros estatísticos Tiago Marum, Ricardo Nunhez e Ronney Agra pelo auxílio nas análises de resultados. Agradeço também à THM Estatística e Consultoria pelo excelente serviço prestado.

À Universidade São Judas Tadeu onde realizei minha graduação em engenharia civil. Em especial ao Prof. M. Sc. Maurício Marques Resende por me apresentar o mundo da pesquisa, por me apresentar o programa de mestrado profissional Construinova e por ter aberto diversas oportunidades na construção civil. Agradeço também aos professores Sandro Martini, Thaís Cavalheri dos Santos, Eduardo de Azevedo Botter, Celso Luiz Felipini, Tathyana Moratti e Gediael Felipe da Silva.

Aos amigos acadêmicos e profissionais, pelo convívio, experiências compartilhadas, apoio e críticas para o desenvolvimento deste projeto.

Aos amigos, mais próximos do que irmãos, que de alguma forma investiram o seu tempo para concepção, desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

A todos que contribuíram para o desenvolvimento das referências bibliográficas citadas.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Marthin Luther King

RESUMO

ZAPPILE, Jonathan Chefaly Mochon. **Desenvolvimento de sensor baseado em IoT para monitoramento contínuo das propriedades do concreto moldado in loco**. 2024. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

O monitoramento em tempo real de objetos tem sido cada vez mais estudado e aplicado na construção civil nos últimos anos, destacando-se a gestão descentralizada de pavimentos, gestão de ativos públicos e privados, monitoramento contínuo de elementos de concreto, processamento de imagens, consumo de recursos e outras formas de aplicação. Para que isso seja possível, as camadas de coleta, transmissão e processamento de dados são de suma importância uma vez que são responsáveis por fornecer informações para a tomada de decisão por parte dos *stakeholders*. O presente trabalho objetiva desenvolver um sensor baseado em tecnologia IoT capaz de monitorar as propriedades do concreto *in loco* de forma contínua a partir de duas grandes áreas, sendo elas: comunicação e transmissão de dados e estimativa de resistência à compressão pelo método da maturidade. O plano experimental foi realizado de forma individual para as duas áreas supracitadas onde foram delimitadas com o intuito de determinar os componentes eletrônicos que melhor se adequam para desenvolvimento do dispositivo IoT bem como os códigos para processamento de dados em linguagem de programação R Studio. O uso da antena adesiva externa a caixa plástica possibilita um aumento no alcance da conexão do dispositivo IoT, principalmente quando inserido no concreto, sendo o único dispositivo IoT que estabeleceu conexão com dispositivo Rx com distância superior a 20m. Foi validado o posicionamento aleatório dos dispositivos IoT em elementos de concreto com alta relação área/volume, possibilitando assim um sistema de instalação descentralizado. Além disso, o uso de dispositivo IoT embarcado com o método da maturidade se torna uma ferramenta auxiliar de grande valor aos *stakeholders* para tomada de decisão. Ao término do trabalho, são apresentados os cinco pilares principais para desenvolvimento de sensor baseado em IoT para monitoramento das propriedades do concreto, sendo eles: i. Microcontrolador com antena dedicada; ii.

Método da Maturidade do concreto com o uso sensor digital de temperatura; iii. Outro sensor; iv. Material invólucro; e v. fonte de energia.

Palavras-chave: Dispositivo IoT. Transmissão de Dados. RSSI. Monitoramento contínuo. Maturidade do concreto.

ABSTRACT

ZAPPILE, Jonathan Chefaly Mochon. **Desenvolvimento de sensor baseado em IoT para monitoramento contínuo das propriedades do concreto moldado in loco.** 2024. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Real-time monitoring of objects has been increasingly studied and applied in civil construction in recent years, including the decentralized inspection of pavements, management of public and private assets, real-time monitoring of concrete elements, image processing, tracking resources consumption and other forms of application. To make this possible, the data collection, transmission and processing layers are of paramount importance as they are responsible for providing information for stakeholder decision-making. The present work aims to develop a sensor based on IoT technology capable of monitoring continuously the concrete properties in situ from two major areas, namely: communication and data transmission and estimation of compressive strength using the maturity method. The experimental plan was carried out individually for the two aforementioned areas where they were delimited in order to determine the electronic components that are best suited for the development of the IoT device as well as the R programming language codes for data processing. The use of the adhesive antenna external to the plastic box allows an increase in the connection range of the IoT device, especially when inserted into concrete, being the only IoT device that established a connection with an Rx device at a distance greater than 20m. The random positioning of IoT devices in concrete elements with a high area/volume ratio was validated, thus enabling a decentralized installation system. Furthermore, the use of an embedded IoT device with the maturity method becomes an auxiliary tool of great value to stakeholders for decision making. At the end of the work, the five main pillars for developing an IoT-based sensor for monitoring concrete properties are presented, namely: i. Microcontroller with dedicated antenna; ii. Concrete Maturity Method using a digital temperature sensor; iii. Another sensor; iv. Enclosure material; and v. power supply.

Keywords: IoT device. Data transmission. RSSI. Real-time monitoring. Concrete maturity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cadeia produtiva do Controle Tecnológico do Concreto	3
Figura 2 – Proposta de reconfiguração da cadeia produtiva mediante inserção de dispositivo IoT	3
Figura 3 – Empresas que prestam serviço de monitoramento das propriedades do concreto	5
Figura 4 – Forma de instalação dos dispositivos no concreto	6
Figura 5 – Microcontroladores disponíveis no mercado (da esquerda para direita: ESP8266, ESP32, ESP32 mini, ESP D1 mini e ESP07).....	7
Figura 6 – Estrutura da dissertação	8
Figura 7 – Arquitetura IoT para monitoramento de saúde estrutural	18
Figura 8 – Programa Experimental do capítulo 2	20
Figura 9 – Programa experimental da primeira etapa do capítulo 2.....	21
Figura 10 – Programa experimental da segunda etapa do capítulo 2.....	22
Figura 11 – Processo de coleta de dados	24
Figura 12 – Dispositivo IoT e sensor de referência	25
Figura 13 – Programa experimental do capítulo 3.....	49
Figura 14 – Coleta de dados para cada elemento de concreto	49
Figura 15 – Forma de madeira utilizada para cada traço de concreto (700 x 700 x 300 mm).....	53
Figura 16 – (a) setup do dispositivo 1 e (b) setup do dispositivo 2.....	55
Figura 17 – Delimitação do quadrante delimitado ao sensoriamento e o posicionamento dos sensores.....	55

Figura 18 – Croqui do dispositivo IoT desenvolvido no presente trabalho74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo da especificação dos microcontroladores	22
Tabela 2 – Caracterização dos materiais	23
Tabela 3 – Especificações dos recipientes	24
Tabela 4 – Resumo das especificações do sensor de temperatura	25
Tabela 5 – Resultados da segunda etapa para referência e Wi-Fi.....	36
Tabela 6 – Normas para execução do método da maturidade.....	48
Tabela 7 – Resumo das especificações do microcontrolador	50
Tabela 8 – Resumo das especificações do sensor de temperatura	51
Tabela 9 – Traços de concreto.....	51
Tabela 10 – Equações Maturidade X Resistência à Compressão e R ² ajustado	54
Tabela 11 – Posicionamento dos sensores em relação ao eixo de referência.....	56
Tabela 12 – Valores de resistência relativa para o traço CC640.....	61
Tabela 13 – Valores de resistência relativa para o traço CC320.....	61
Tabela 14 – Variação de idades para uma mesma resistência à compressão (Traço CC640).....	64
Tabela 15 – Variação de idades para uma mesma resistência à compressão (Traço CC320).....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Histórico de publicações em monitoramento contínuo de elementos de concreto	2
Gráfico 2 – Quantidade de leituras em função da distância	28
Gráfico 3 – RSSI para cada dispositivo IoT imerso em diferentes recipientes	29
Gráfico 4 – RSSI para cada dispositivo IoT em função da altura do dispositivo IoT	30
Gráfico 5 – RSSI para materiais de características diferentes	30
Gráfico 6 – Densidade (kg/m^3) X RSSI (dBm) em boxplot e violino para o dispositivo A	32
Gráfico 7 – Densidade (kg/m^3) X RSSI (dBm) em boxplot e violino para o dispositivo B	32
Gráfico 8 – Densidade (kg/m^3) X RSSI (dBm) em boxplot e violino para o dispositivo C	33
Gráfico 9 – Distribuição dos dados de RSSI em função da densidade e distâncias X de avaliação (2 a 24 m).....	34
Gráfico 10 – Densidade x RSSI para 2, 12 e 24 metros de distância X	35
Gráfico 11 – Fator Wi-Fi/referencial em função da distância.....	37
Gráfico 12 – Conceito de Maturidade.....	41
Gráfico 13 – Estimativas de resistência para concretos de 50 MPa para cura adiabática	46
Gráfico 14 – Relação entre as resistências estimadas e reais para cura adiabática.....	47
Gráfico 15 – (a) análise térmica TG e DTG; e (b) difratograma de raios-x do CII-F-32	52

Gráfico 16 – Curva granulométrica da areia e brita	53
Gráfico 17 – Demonstração do cálculo da variação relativa	57
Gráfico 18 – Variações de idade e resistência à compressão entre o corpo de prova e a resistência estimada média através do método da maturidade.....	58
Gráfico 19 – Histórico de temperatura do elemento de concreto para os três primeiros dias (traço CC640)	59
Gráfico 20 – Histórico de temperatura do elemento de concreto para os três primeiros dias (traço CC320)	59
Gráfico 21 – Resistência à compressão estimada para os 8 sensores (traço CC640)	60
Gráfico 22 – Resistência à compressão estimada para os 8 sensores (traço CC320)	60
Gráfico 23 – Resistência à compressão média estimada dos traços CC640 e CC320	62
Gráfico 24 – Curva de resistência estimada média x Rupturas de corpos de prova (traço CC640).....	63
Gráfico 25 – Curva de resistência estimada média x Rupturas de corpos de prova (traço CC320).....	64

LISTA DE SIGLAS

- A** *AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials*
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI – American Concrete Institute
ADC – Analog To Digital Converter
AMP OP – Amplificador Operacional
ASTM – American Society for Testing and Materials
- B** *BLE – Bluetooth Low-Energy*
- D** *DBM – Decibel-milliwatts*
DC – Direct Current
DOT – Department of Transportation
DTG – Termogravimetria derivada
- E** *END – Ensaios Não Destrutivos*
ER – Erro Relativo
- F** *FTT – Fator Tempo Temperatura*
- I** *IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto*
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IoT – Internet of Things
IR – Infravermelho

M	<i>MNS – Modified Nurse-Saul</i>
N	<i>NBR – Norma Técnica Brasileira</i> <i>NDT – Non-Destructive Techniques</i>
R	<i>RSSI – Received Signal Strength Indication</i>
S	<i>SHM – Structural health monitoring</i>
T	<i>TG – Termogravimetria</i>
U	<i>UWB – Ultra Wideband</i>

SUMÁRIO

1.	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	7
1.2	METODOLOGIA E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	8
1.3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	10
2.	COMUNICAÇÃO SEM FIO E TRANSMISSÃO DE DADOS EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	17
2.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	20
2.1.1	Materiais	22
2.1.2	Métodos	24
2.2	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	27
2.2.1	Primeira etapa	27
2.2.2	Segunda Etapa	35
2.3	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	37
2.4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
3.	MÉTODO DA MATURIDADE DO CONCRETO	41
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
3.1.1	Materiais	50
3.1.2	Métodos	54
3.2	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	58
3.3	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	67
3.4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
4.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
4.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
A –	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	75

B –	AVALIAÇÃO DOS REQUISITOS DOS SENSORES DISPONÍVEIS NO	
	MERCADO	84
C –	CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE	90

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A tecnologia baseada em internet das coisas (do inglês *Internet of Things* – IoT), aplicada no âmbito da construção civil, permite que objetos transfiram dados a respeito do seu comportamento tornando-o um agente ativo no monitoramento ao longo de sua vida útil. Os dados coletados durante o monitoramento podem tanto ser utilizados para verificar a integridade de uma estrutura propriamente dita quanto propriedades ligadas ao seu pleno funcionamento, sendo que as áreas mais desenvolvidas na construção civil são, gestão descentralizada de pavimentos (K. TOMIYAMA et al., 2012; PAIXÃO, MARANHÃO, 2020), monitoramento contínuo da evolução de resistência do concreto (PERRY et al., 2017; SERAFINI et al., 2020; ZUO et al., 2021), monitoramento de estruturas de concreto (ADDABBO et al., 2019; HASNI et al., 2018; RATNAM; OOI; YEN, 2019), processamento de imagens (GHOSH MONDAL et al., 2020; HOU et al., 2019; JIA et al., 2021), controle de qualidade de vibração de concreto (KHEIRATI; GOLROO, 2022; WANG et al., 2021) e consumo de recursos (SERRANO, 2022).

A literatura demonstra que os principais grupos de pesquisa sobre a o método da maturidade do concreto e sua aplicação na construção civil estão localizados nos: Estados Unidos, China, França, Coreia do Sul e no Reino Unido. Outros países como Canadá, Alemanha, Espanha, Japão, Índia e Brasil também apresentam algumas publicações relevantes. No Brasil, boa parte das publicações sobre o tema vêm de São Paulo, com algumas contribuições de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

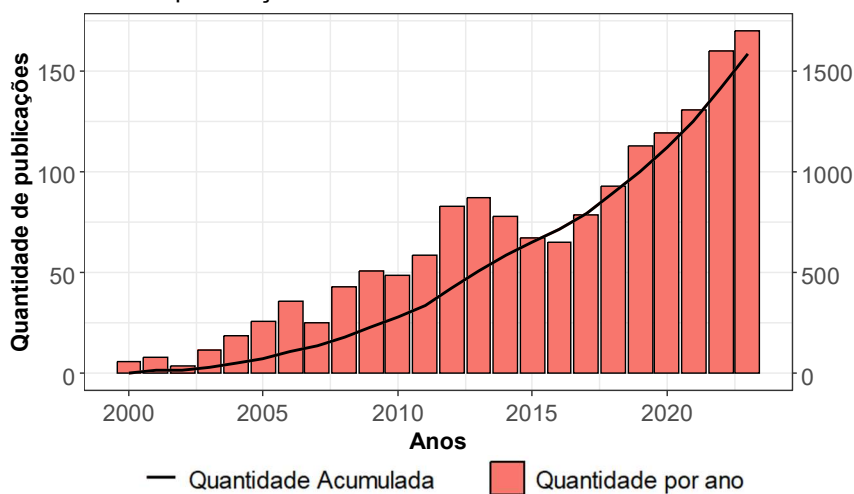
Com relação aos maiores canais destas publicações podemos destacar os Journals: *Construction and Building Materials*; *ACI Materials Journal*; *Cement And Concrete Composites*, *Magazine Of Concrete Research*, *Cement And Concrete Research*, *Journal Of Materials In Civil Engineering*, *Advanced Materials Research* e *Transportation Research*. Dos canais de publicações nacionais, é possível encontrar trabalhos publicados em revistas como *Revista Matéria*, *Ambiente Construído*, *Concreto & Construções*, *Revista de Engenharia e Tecnologia*, congresso como *Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído* e *IBRACON*.

Na Engenharia de Construção Civil, a aplicação do método da maturidade tem sido estudada e utilizada ao longo dos anos em diversas aplicações e uso do concreto,

dentre elas, podem-se elencar: a remoção de formas e escoramento (RUDELI; SANTILLI; ARRAMBIDE, 2015; TEIXEIRA; SANTILLI; PUENTE, 2017), a liberação de trânsito para pavimento de concreto (CARUFEL et al., 2018; CDOT - COLORADO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2011; TXDOT - TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2004), o Método Tilt-up (ABI-NADER, 2009; CARUFEL et al., 2018), em estruturas pós-tensionadas (CARUFEL et al., 2018; SOFI; MENDIS; BAWEJA, 2012), em elementos pré-moldados e pré-fabricados de concreto (CARUFEL et al., 2018; RANZ et al., 2016), em concreto massa (CARUFEL et al., 2018; YIKICI; CHEN, 2015), em concreto projetado (GALOBARDES et al., 2015; SECANELLAS et al., 2019) e principalmente, controle de temperatura (LEE et al., 2016; RANZ et al., 2016).

A literatura demonstra que os principais grupos de pesquisa sobre o monitoramento contínuo de elementos de concreto estão localizados na China e Estados Unidos. Outros países como Itália, Índia, Coreia do Sul, Reino Unido e Alemanha também apresentam publicações relevantes. No Brasil este assunto é ainda pouco discutido e publicado quando comparado com os principais grupos de pesquisa. O Gráfico 1 apresenta a evolução de publicações desde o início do século, apresentando um crescimento contínuo até o mês de dezembro de 2023 (ELSEVIER, 2023). As palavras-chaves utilizadas para consulta na base de dados Scopus foram “real-time”, “monitoring” e “concrete”.

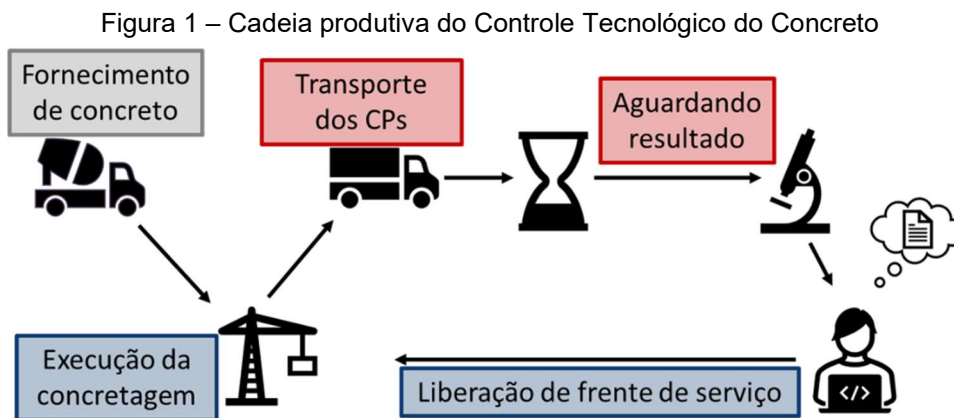
Gráfico 1 – Histórico de publicações em monitoramento contínuo de elementos de concreto



FONTE: Elsevier (2023)

A Figura 1 ilustra, resumidamente, a configuração atual da cadeia produtiva do controle de resistência do concreto em obras de construção civil onde destaca-se o

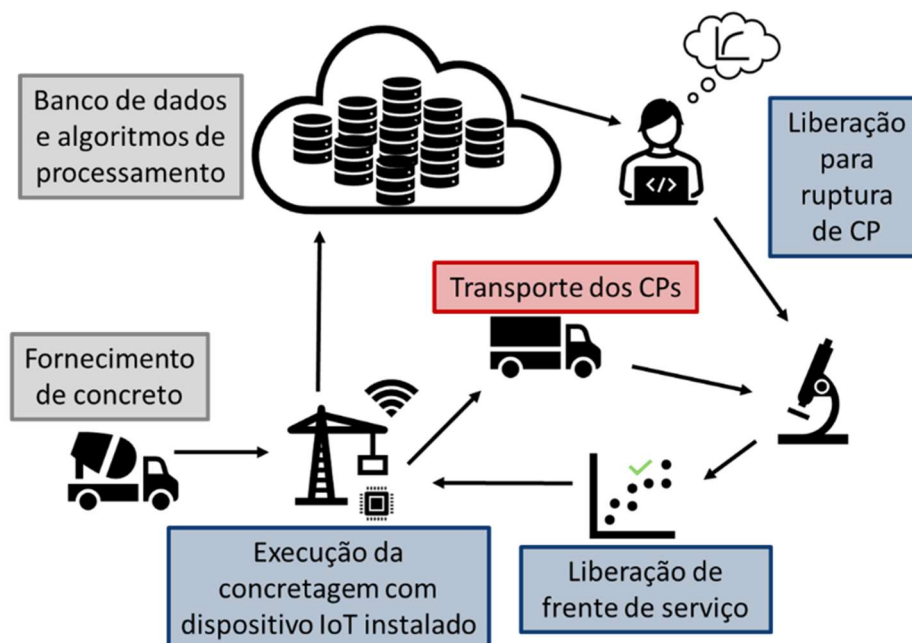
período de espera para ruptura dos corpos de prova e posterior liberação de frente de serviço.



FONTE: Zappile, Andrade e Maranhão (2022)

Atualmente com o uso de dispositivos IoT a informação em tempo real da evolução das propriedades do concreto se tornou uma ferramenta auxiliar para o controle de resistência de um elemento de concreto. Dentre elas, podemos elencar a antecipação da ruptura de corpos de prova e a possibilidade da redução na quantidade de rupturas de corpos de prova, principalmente para as rupturas com menos de 14 dias (MILLER; HO; TALEBIAN, 2022; MISHRA; LOURENÇO; RAMANA, 2022a; SERAFINI et al., 2020). A Figura 2 ilustra a proposta de reconfiguração da cadeia produtiva elaborada por Zappile, Andrade e Maranhão (2022).

Figura 2 – Proposta de reconfiguração da cadeia produtiva mediante inserção de dispositivo IoT

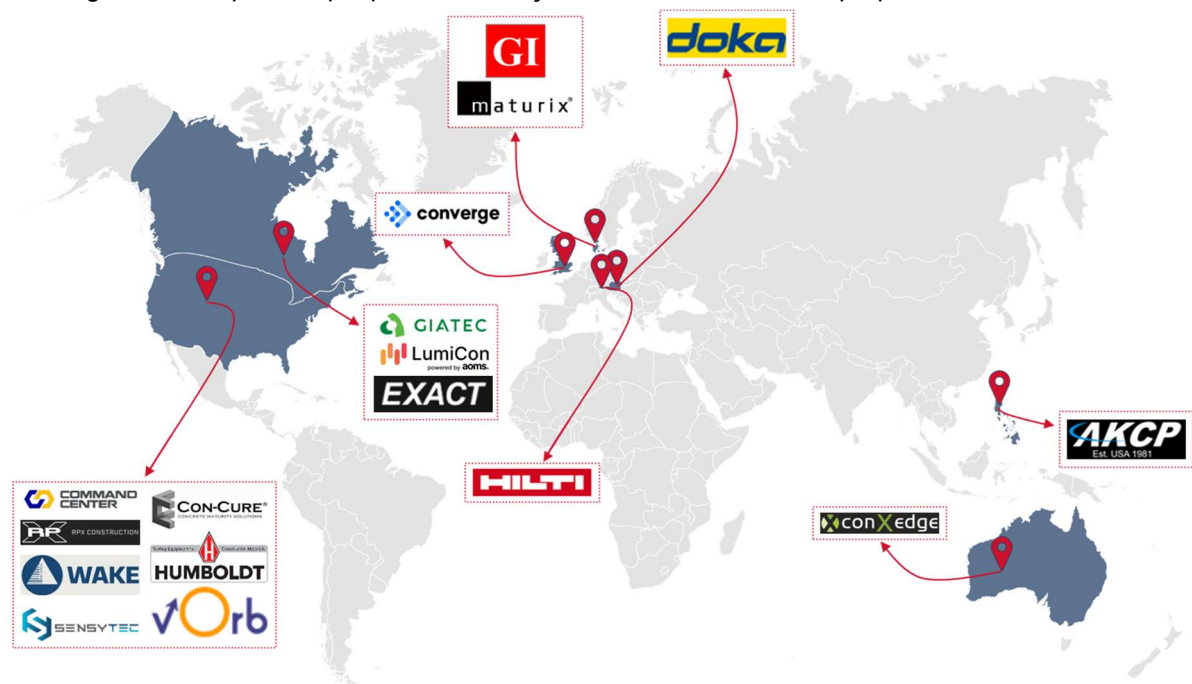


FONTE: Zappile, Andrade e Maranhão (2022)

Diante da utilização do uso de dispositivos IoT para monitoramento contínuo da evolução da resistência à compressão do concreto é possível reduzir períodos de espera para ruptura de corpos de prova e antecipar a liberação de frentes de serviço uma vez que é fornecida a informação de que o concreto atingiu a resistência desejada antes do prazo (BENAICHA; BURTSHELL; ALAOUI, 2016; SOFI; MENDIS; BAWEJA, 2012; TEIXEIRA; SANTILLI; PUENTE, 2017). Um exemplo comum e com grande aplicabilidade na construção civil brasileira atualmente é o seu uso para auxiliar a tomada de decisão de desforma de paredes de concreto. A nova versão da NBR 16055 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022) especifica os requisitos para o controle de aceitação do concreto no estado endurecido (seção 19.9.3) onde estabelece que o controle da resistência do concreto na idade de desforma pode ser realizado a partir do uso do método da maturidade em conformidade com a ASTM C1074 (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2019).

Sua utilização com o intuito de antecipar operações como desforma, retirada de escoramento, protensão e liberação de tráfego em pavimentos de concreto têm sido evidenciadas por empresas de tecnologia sediadas no exterior como uma prestação de serviço (Figura 3). Dentre as empresas avaliadas podem ser elencadas: Converge (CONVERGE, 2021), Giatec Scientific (GIATEC, 2022), Maturix (MATURIX, 2022), Command Center (COMMAND CENTER, 2020), LumiCon aoms (LUMI CON, 2022), Hilti (HILTI, 2022), SensyTec (SENSYTEC, 2022), Wake (WAKE, 2018), RPX Construction (RPX TECHNOLOGIES, 2021), Exact Technology (EXACT TECHNOLOGY, 2022), ConXedge (CONXEDGE, 2020), AKCP (AKCP, 2021), vOrb (VORB, 2022), Doka (DOKA GMBH, 2022), Humboldt (HUMBOLDT MFG, 2022), Con-Cure (CON CURE, 2022) e Germann Instruments (GERMANN, 2021). No Apêndice B são apresentados os requisitos dos dispositivos IoT levantados durante a etapa de mapeamento do mercado de sensores.

Figura 3 – Empresas que prestam serviço de monitoramento das propriedades do concreto

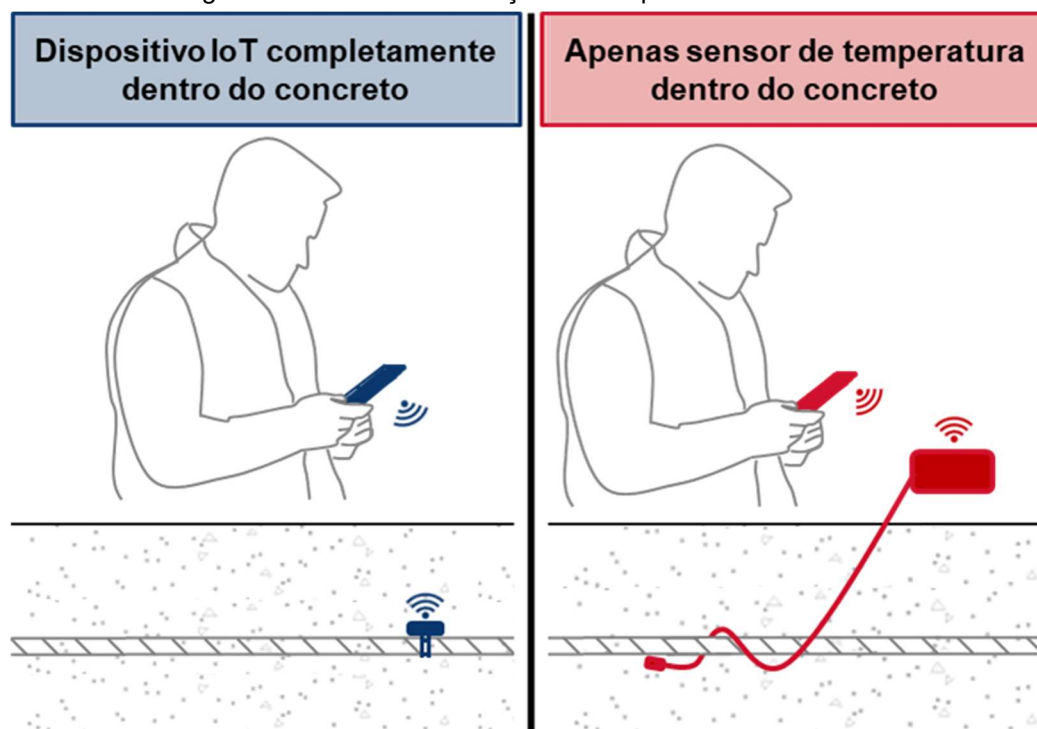


FONTE: O Autor

Todas as empresas supracitadas apresentam estudos de casos reais mediante as vantagens de seu uso como: redução de ciclos de forma e desforma, antecipação da execução da protensão, controle térmico do concreto e ainda reduções no custo quando comparados ao método tradicional de controle de resistência à compressão. Vale ressaltar que a utilização dos dispositivos IoT servem como ferramenta auxiliar na tomada de decisão para pequenas idades (menores que 14 dias) e não substituem, até o presente, o ensaio normatizado de resistência à compressão aos 28 dias (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2019).

Dentre os diversos tipos de sensores avaliados, destacam-se duas modalidades de dispositivos IoT sendo eles: i. dispositivo IoT completamente imerso no concreto e ii. apenas o sensor de temperatura imerso no concreto, isto é, o transmissor de dados não é inserido dentro do concreto (Figura 4). As duas propostas dos dispositivos IoT permitem abordagens diferentes quanto a reutilização dos dispositivos, alcance de sinal, tipologia de sensor de temperatura (analogico e digital), dimensões do dispositivo e bateria, sendo estes fatores de suma importância para concepção de um dispositivo IoT.

Figura 4 – Forma de instalação dos dispositivos no concreto



FONTE: Zappile, Andrade e Maranhão (2022)

Apesar dos diversos avanços tecnológicos e aplicações reais dos dispositivos IoT para monitoramento contínuo das propriedades do concreto, alguns questionamentos persistem quanto a possibilidade de instalação do dispositivo IoT em elementos de concreto de forma descentralizada, como:

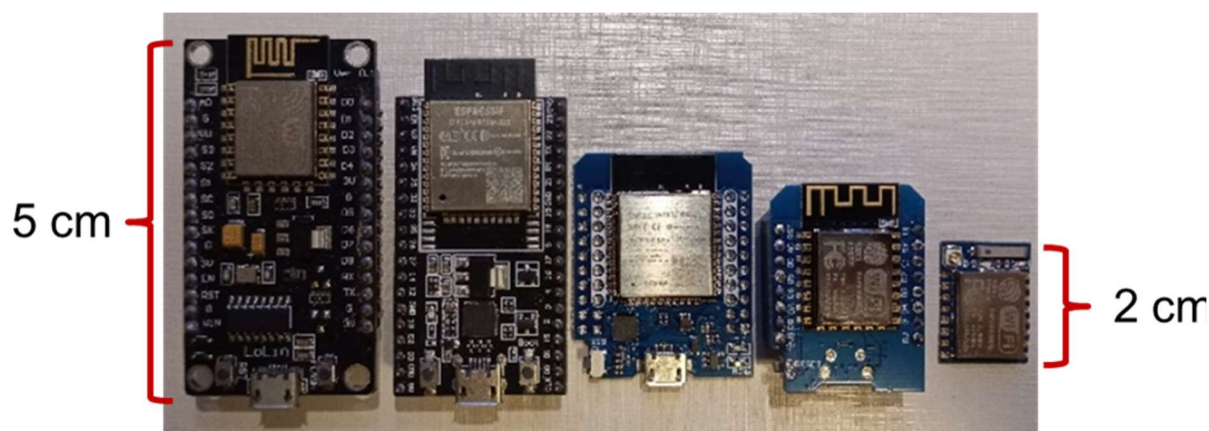
- O posicionamento do dispositivo IoT no elemento de concreto influencia significativamente na resposta do monitoramento contínuo de suas propriedades?
- Esta variação pode ser significativa ao ponto de ser necessário determinar a posição exata do sensor no elemento?
- Qual a frequência necessária de aquisição das informações através do dispositivo IoT?
- Qual a frequência de aquisições que une um melhor aproveitamento da vida útil da bateria e a confiabilidade das informações coletadas?

Sabe-se que o método da maturidade, assim como outras abordagens e métodos para estimativa de resistência, possui suas limitações. Para isso, questiona-se a possibilidade de unir diferentes tipos de medidas para estimativa das propriedades físicas do elemento de interesse. Uma combinação que tem sido

estudada é a combinação do método da maturidade com a resistividade elétrica do concreto (MISHRA; TRIPATHI, 2017; TAGLIAFERRI et al., 2021).

Por fim, um último questionamento que não deve ser negligenciado é a viabilidade econômica do seu uso no Brasil devido aos elevados custos envolvidos com a importação do dispositivo IoT e atual valor da moeda nacional. Para que seja possível promover um monitoramento contínuo das propriedades do concreto com custo reduzido, tem se evidenciado a publicação de trabalhos que utilizam o método da maturidade embarcado em microcontroladores com sensor de temperatura (CABEZAS et al., 2018; MILLER; HO; TALEBIAN, 2022; UTEPOV et al., 2019). Sendo uma grande oportunidade uma vez que microcontroladores estão disponíveis no mercado a preços acessíveis. A Figura 5 apresenta cinco modelos de microcontroladores comercializados atualmente, porém existem outros modelos e fabricantes disponíveis no mercado nacional.

Figura 5 – Microcontroladores disponíveis no mercado (da esquerda para direita: ESP8266, ESP32, ESP32 mini, ESP D1 mini e ESP07)



FONTE: O Autor

Diante do atual cenário o uso de dispositivos IoT para monitoramento contínuo das propriedades do concreto, verifica-se grande potencial de aplicação para todos os agentes da cadeia produtiva do concreto, porém ainda não é uma ferramenta difundida no Brasil.

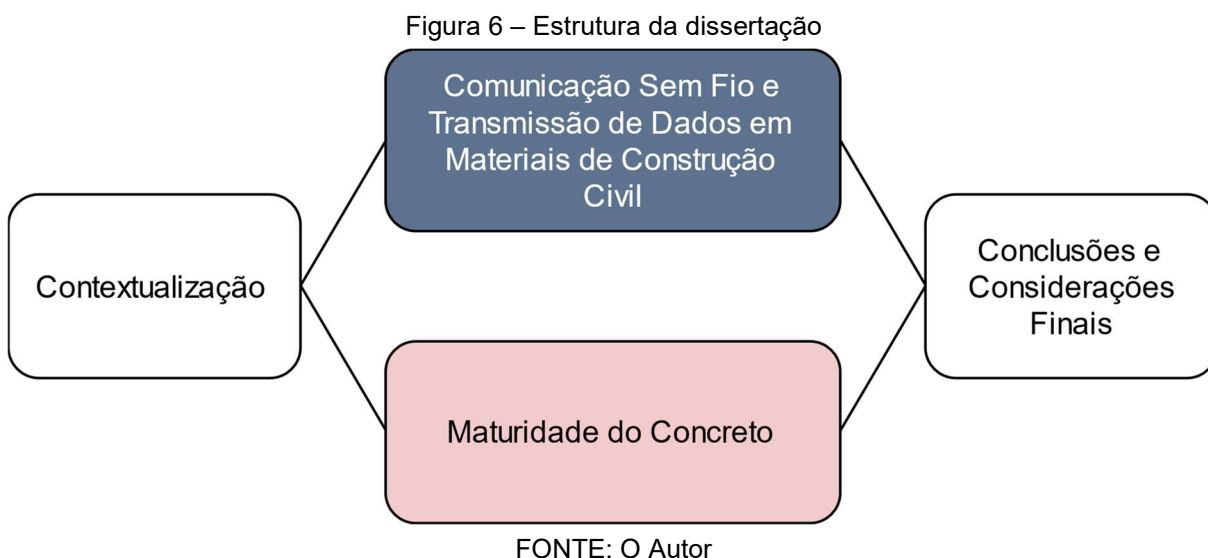
1.1 Objetivos

A presente pesquisa busca desenvolver um dispositivo IoT capaz de monitorar as propriedades do concreto a partir de micro controladores embarcados com sensor de temperatura. Os objetivos específicos podem ser elencados como:

- Analisar a influência que a densidade do material em que um dispositivo IoT está inserido causa na transmissão de dados e alcance de sinal;
- Avaliar o impacto da intensidade de sinal na confiabilidade da leitura dos dados realizada por dispositivo IoT;
- Avaliar a representatividade da temperatura e maturidade do concreto a partir da utilização de sensores espalhados de forma aleatória em um elemento de concreto;
- Listar os requisitos para o desenvolvimento dispositivo IoT.

1.2 **Metodologia e Estrutura da Dissertação**

O presente trabalho é de cunho experimental dividido em etapas não sequenciais. A dissertação foi estruturada em quatro capítulos onde dois destes foram elaborados de forma independente, isto é, em cada capítulo são apresentados a revisão bibliográfica, a descrição do programa experimental, a apreciação e discussão dos resultados, as conclusões parciais e as referências bibliográficas utilizadas. A Figura 6 ilustra estrutura do presente trabalho. Ao final serão discutidas as principais conclusões, análise expedita e as sugestões para pesquisas futuras.



No primeiro capítulo da presente dissertação é contextualizado o uso de sensores baseados em tecnologia IoT na construção civil e seu grande potencial de aplicação. Também são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos, a metodologia, a estrutura da dissertação e as referências bibliográficas.

No capítulo 2, **Comunicação sem fio e transmissão de dados em materiais de construção civil**, são discutidas as principais influências que o meio em que um dispositivo IoT está inserido na capacidade de transmissão de dados. Sendo assim, foram avaliados 3 tipos de antenas com conexão Wi-Fi e foram avaliadas, a quantidade de leituras realizadas, a intensidade de sinal e o alcance de conexão. Todas essas avaliações foram realizadas para materiais amplamente utilizados na construção civil, variando a densidade de cada material. Também foi atestado que a variação na intensidade de conexão entre dispositivo IoT com a internet não influencia a qualidade da leitura dos dados.

O capítulo 3, **Método da Maturidade do Concreto**, aborda a utilização do método da maturidade e seus respectivos benefícios quando utilizados concomitantemente com dispositivos IoT. Para isso, foi avaliado se a posição do sensor de temperatura no elemento de concreto impacta significativamente no valor da resistência à compressão estimada. Posterior a esta análise foram discutidos os benefícios diante do uso de dispositivos IoT para monitoramento das propriedades do concreto a partir do método da maturidade. Foram avaliados 2 traços de concreto aplicados em um elemento de concreto que simula as dimensões de uma peça maciça de concreto (700x700x300) mm.

Por fim, no último capítulo, **Conclusões e Considerações Finais**, serão apresentadas e discutidas as principais conclusões do presente trabalho abordando os dois capítulos estudados e ainda sua compatibilização, visando um dispositivo IoT apto a monitorar continuamente as propriedades do concreto. Também serão apresentadas sugestões para pesquisas futuras.

1.3 **Referências bibliográficas**

ABI-NADER, GUY GEORGES. **Erection Stresses in Reinforced Concrete Tilt-Up Wall Panels**. 2009. PhD Tehsis - University of Florida, Florida, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16055: Parede de Concreto Moldada no Local para a Construção de Edificações - Requisitos e Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2022.

ADDABBO, Tommaso; FORT, Ada; MUGNAINI, Marco; PANZARDI, Enza; POZZEBON, Alessandro; VIGNOLI, Valerio. A city-scale IoT architecture for monumental structures monitoring. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 131, p. 349–357, 2019. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.08.058. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.058>.

AKCP. **AKCP Home**. 2021. Disponível em: <https://www.akcp.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1074: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method maturity index and maturity method, p. 1–11, 2019. DOI: 10.1520/C1074-19.2. Disponível em: www.astm.org.

BENAICHA, Mouhcine; BURTSHELL, Yves; ALAOUI, Adil Hafidi. Prediction of compressive strength at early age of concrete - Application of maturity. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 119–125, 2016. DOI: 10.1016/j.jobbe.2016.03.003.

CABEZAS, Joaquín; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, Trinidad; GÓMEZ-GALÁN, Juan Antonio; CIFUENTES, Héctor; CARVAJAL, Ramón González. Compact embedded wireless sensor-based monitoring of concrete curing. **Sensors (Switzerland)**, v. 18, n. 3, 2018. DOI: 10.3390/s18030876.

CARUFEL, Sarah De; FAHIM, Andrew; GHODS, Pouria; ALIZADEH, Aali. **Concrete Maturity From Theory to Application e-Book**. 1. ed. Ottawa: Giatec, 2018. Disponível em: www.giatec.ca.

CDOT - COLORADO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Standard specifications for Road and Bridge Construction**. 2011. Disponível em: <https://www.codot.gov/>. Acesso em: 5 jan. 2023.

COMMAND CENTER. **Command Center Home**. 2020. Disponível em: <https://www.commandcenterconcrete.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

CON CURE. **Con-Cure Home**. 2022. Disponível em: <https://www.concure.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

CONVERGE. **Converge Home**. 2021. Disponível em: <https://www.converge.io/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

CONXEDGE. **ConXedge Home**. 2020. Disponível em: <https://www.conxedge.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

DOKA GMBH. **Doka Home**. 2022. Disponível em: <https://www.doka.com/en/index>. Acesso em: 24 dez. 2022.

ELSEVIER. **Scopus. Analyze search results: real-time AND monitoring AND concrete**. 2023. Disponível em: <https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=9397ba68acc10363e732a11e11cf8656&sot=a&sdt=a&sl=48&s=TITLE-ABS-KEY%28real-time+AND+monitoring+concrete%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results>. Acesso em: 31 dez. 2023.

EXACT TECHNOLOGY. **Exact Home**. 2022. Disponível em: <https://www.exacttechnology.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

GALOBARDES, Isaac; CAVALARO, Sergio H.; GOODIER, Chris I.; AUSTIN, Simon; RUEDA, Ángel. Maturity method to predict the evolution of the properties of sprayed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 357–369, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.038. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.038>.

GERMANN. **Germann Instruments Home**. 2021. Disponível em: <https://www.germanninstruments.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

GHOSH MONDAL, Tarutal; JAHANSHAH, Mohammad R.; WU, Rih Teng; WU, Zheng Yi. Deep learning-based multi-class damage detection for autonomous post-disaster reconnaissance. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 27, n. 4, p. 1–15, 2020. DOI: 10.1002/stc.2507.

GIATEC. **Giatec Scientific Home**. 2022. Disponível em: <https://www.giatecscientific.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

HASNI, Hassene; JIAO, Pengcheng; ALAVI, Amir H.; LAJNEF, Nizar; MASRI, Sami F. Structural health monitoring of steel frames using a network of self-powered strain and acceleration sensors: A numerical study. **Automation in Construction**, v. 85, n. October 2017, p. 344–357, 2018. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.022>.

HILTI. **Hilti Home**. 2022. Disponível em: <https://www.hilti.com.br/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

HOU, Rui; PAN, Ming Ming; ZHAO, Yun Hao; YANG, Yang. Image anomaly detection for IoT equipment based on deep learning. **Journal of Visual Communication and Image Representation**, v. 64, p. 102599, 2019. DOI: 10.1016/j.jvcir.2019.102599. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2019.102599>.

HUMBOLDT MFG. **Humboldt Home**. 2022. Disponível em: <https://www.humboldtmfg.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

JIA, Yang; CHEN, Weiguang; YANG, Manjiang; WANG, Liangwu; LIU, Dongcai; ZHANG, Qixing. Video smoke detection with domain knowledge and transfer learning from deep convolutional neural networks. **Optik**, v. 240, n. March, p. 166947, 2021. DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.166947. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166947>.

K. TOMIYAMA; KAWAMURA, A.; S. NAKAJIMA; T. ISHIDA; M. JOMOTO. A MOBILE PROFILOMETER FOR ROAD SURFACE MONITORING BY USE OF ACCELEROMETERS. **7th Symposium on Pavement Surface Characteristics: SURF**, p. 1–10, 2012.

KHEIRATI, Afarin; GOLROO, Amir. Machine learning for developing a pavement condition index. **Automation in Construction**, v. 139, n. April, p. 104296, 2022. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104296. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104296>.

LEE, Songhee; NGUYEN, Ngocchien; LE, Thi Suong; LEE, Chadon. Optimization of Curing Regimes for Precast Prestressed Members with Early-Strength

Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 3, p. 257–269, 2016. DOI: 10.1007/s40069-016-0154-7.

LUMI CON. **LumiCon Home**. 2022. Disponível em: <https://lumicon.io/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

MATURIX. **Maturix Home**. 2022. Disponível em: <https://maturix.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

MILLER, Dane; HO, Nhat Minh; TALEBIAN, Nima. Monitoring of in-place strength in concrete structures using maturity method – An overview. **Structures**, v. 44, p. 1081–1104, 2022. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.08.077.

MISHRA, Mayank; LOURENÇO, Paulo B.; RAMANA, G. V. Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things : A review. **Journal of Building Engineering**, v. 48, n. January, p. 103954, 2022. DOI: 10.1016/j.job.2021.103954. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103954>.

MISHRA, R. K.; TRIPATHI, R. K. Early Age Strength and Electrical Resistivity of Concrete as Durability Indicator through Maturity. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, v. 10, n. 3, p. 677–682, 2017. DOI: 10.21276/ijee.2017.10.0328. Disponível em: www.cafetinnova.org.

PAIXÃO, Marcio José Serra; MARANHÃO, Flavio Leal. Geovista – Gestão Descentralizada Das Condições Do Pavimento Em Ambiente Urbano. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 53235–53244, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-825.

PERRY, Marcus; FUSIEK, Grzegorz; NIEWCZAS, Pawel; RUBERT, Tim; MCALORUM, Jack. Wireless concrete strength monitoring of wind turbine foundations. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 12, p. 1–22, 2017. DOI: 10.3390/s17122928.

RANZ, J.; APARICIO, S.; FUENTE, J. V.; ANAYA, J. J.; HERNÁNDEZ, M. G. Monitoring of the curing process in precast concrete slabs: An experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 406–416, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.041.

RATNAM, Mani Maran; OOI, Boon Yaik; YEN, Kin Sam. Novel moiré-based crack monitoring system with smartphone interface and cloud processing. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 26, n. 10, p. 1–17, 2019. DOI: 10.1002/stc.2420.

RPX TECHNOLOGIES. **RPX Construction**. 2021. Disponível em: <https://construction.rpxtech.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

RUDELI, N.; SANTILLI, A.; ARRAMBIDE, F. Striking of vertical concrete elements: An analysis using the maturity method. **Engineering Structures**, v. 95, p. 40–48, 2015. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.021.

SECANELLAS, S. A.; HERNÁNDEZ, M. G.; SEGURA, I.; MORATA, M.; ANAYA, J. J. A system designed to monitor in-situ the curing process of sprayed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 823–834, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.117.

SENSYTEC. **Sensy Tec Home**. 2022. Disponível em: <https://sensytec.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

SERAFINI, Ramoel; RAMBO, Dimas Alan Strauss; DE FIGUEIREDO, Antonio Domingues; CURTI, Rubens; SOMOGYI, Robert. Controle Contínuo Da Resistência De Estruturas De Concreto Pelo Método Da Maturidade. **CONCRETO & Construções**, v. XLVIII, n. 98, p. 85–90, 2020. DOI: 10.4322/1809-7197.2020.98.0009.

SERRANO, Will. iBuilding: artificial intelligence in intelligent buildings. **Neural Computing and Applications**, v. 34, n. 2, p. 875–897, 2022. DOI: 10.1007/s00521-021-05967-y.

SOFI, M.; MENDIS, P. A.; BAWEJA, D. Estimating early-age in situ strength development of concrete slabs. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 659–666, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.019.

TAGLIAFERRI, Mayra D. G.; SANCHEZ, Leandro F. M.; SOUZA, Diego J. D.; ISMAIL, Lamiaa; NOEL, Martin; DECARUFEL, Sarah. Evaluation of electrical resistivity and maturity for estimating the early-age properties of pre-packaged concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 2021.

TEIXEIRA, S.; SANTILLI, A.; PUENTE, I. Demoulding vertical elements: Recommendations for apply maturity functions. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 392–401, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.006.

TXDOT - TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Standard specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets and Bridges**. 2004. Disponível em: <https://www.txdot.gov/>. Acesso em: 5 jan. 2023.

UTEPOV, Yelbek B.; ANISKIN, Aleksej; IBRASHOV, Azamat P.; TULEBEKOVA, Assel. Maturity sensors placement based on the temperature transitional boundaries. **Magazine of Civil Engineering**, v. 90, n. 6, p. 93–103, 2019. DOI: 10.18720/MCE.90.9.

VORB. **vOrb Home**. 2022. Disponível em: <https://vorb.io/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

WAKE. **Wake Home**. 2018. Disponível em: <https://www.wakeinc.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

WANG, Dong; REN, Bingyu; CUI, Bo; WANG, Jiajun; WANG, Xiaoling; GUAN, Tao. Real-time monitoring for vibration quality of fresh concrete using convolutional neural networks and IoT technology. **Automation in Construction**, v. 123, n. August 2020, p. 103510, 2021. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103510. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103510>.

YIKICI, Tahsin Alper; CHEN, Hung Liang. Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 802–812, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.026.

ZAPPILE, Jonathan; ANDRADE, Renan; MARANHÃO, Flávio. O Uso de Smart Objects como Proposta de Inovação na Cadeia Produtiva do Controle Tecnológico do Concreto no Brasil. **XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído ENTAC 2022**, Porto Alegre, p. 1–13, 2022. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2000>.

ZUO, Zibo; HUANG, Yulin; PAN, Xi; ZHAN, Yijian; ZHANG, Longlong; LI, Xinkui; ZHU, Mintao; ZHANG, Lulu; DE CORTE, Wouter. Experimental research on remote real-time monitoring of concrete strength for highrise building machine during construction. **Measurement: Journal of the International Measurement**

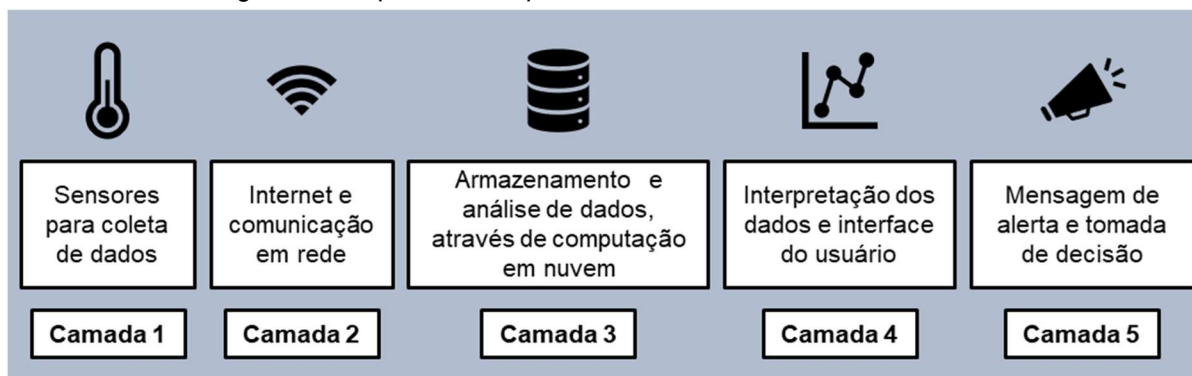
Confederation, v. 178, n. April, p. 109430, 2021. DOI:
10.1016/j.measurement.2021.109430. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109430>.

2. COMUNICAÇÃO SEM FIO E TRANSMISSÃO DE DADOS EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

A comunicação sem fio e transmissão de dados são a base do desenvolvimento de um sensor baseado em IoT uma vez que é a camada responsável por conectar a camada de coleta de dados com a camada de análise de dados (MISHRA; LOURENÇO; RAMANA, 2022b). Neste sentido, as barreiras para sua implantação são diferentes em função da aplicação desejada. Por exemplo: i. em pavimentos as maiores dificuldades estão ligadas à transmissão e processamento das informações, ii. em sistemas de drenagem estão ligadas à geolocalização e duração da bateria utilizada para os dispositivos; iii. Em pontes, viadutos e sistemas de monitoramentos de deslizamentos de taludes, as barreiras estão ligadas ao tempo de substituição das baterias e a transmissão das informações quando em áreas remotas; iv. Em aplicações metro ferroviárias, as maiores barreiras estão ligadas à transmissão das informações, devido à alta frequência de aquisição necessária.

Para a execução de um bom sistema de coleta, transmissão e análise de dados a partir da tecnologia IoT, Mishra *et al* (MISHRA; LOURENÇO; RAMANA, 2022a) ilustra as 5 camadas presentes em um sistema de monitoramento de saúde estrutural (do inglês *Structural health monitoring* – SHM), sendo elas: i. sensores e atuadores; ii. internet e comunicação (objetivo principal do presente capítulo); iii. análise de dados e computação em nuvem; iv. interpretação e; v. alerta ao usuário. Dentre as 5 camadas (Figura 7), destacam-se as duas primeiras camadas que são responsáveis pela coleta e transmissão dos dados. Na primeira camada os sensores, que podem ser instalados internamente ou externamente ao elemento em análise, são responsáveis por coletar os dados necessários para monitoramento de suas condições de uso. Estas informações são utilizadas para a tomada de decisão quanto à necessidade e urgência da intervenção. Para isso, faz-se necessário que os sistemas tenham medições confiáveis e que os ruídos nos sinais consigam ser filtrados de modo a permitir o desenvolvimento de modelos probabilísticos a ele atrelados.

Figura 7 – Arquitetura IoT para monitoramento de saúde estrutural



FONTE: Adaptado de Mishra, Lourenço, Ramana (2022)

A transmissão de dados atua como um intermediador entre os sensores e os servidores em nuvem a partir de meios de comunicação que são dependentes do tipo de dados. Em geral as redes de internet como LoraWan e SizBee são mais adequadas para baixas frequências (CHEN et al., 2008). Posto isto, para que seja executada este papel de intermediador, microcontroladores e placas de desenvolvimento como Arduino, Raspberry Pi, caninos loucos e NodeMCU são boas opções e estão disponíveis no mercado a um baixo custo (MISHRA; LOURENÇO; RAMANA, 2022a).

Dentre as diversas modalidades de conexões disponíveis, como sensor ultrassônico, infravermelho (IR), Bluetooth Low-Energy (BLE), Redes Wi-Fi, Ultra Wideband (UWB) e ZigBee, cada um possui características e métodos específicos de comunicação promovendo alcance de conexão e taxa de transmissão de dados diferentes. O uso da conexão Wi-Fi para a transmissão de informações a partir de microcontroladores NodeMCU tem apresentado grande popularidade nos últimos anos (MISHRA; LOURENÇO; RAMANA, 2022a). A modalidade de conexão Wi-Fi pertence ao *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), família de padrões 802.11, utilizando principalmente bandas de rádio de 2.4 GHz a 5 GHz para permitir comunicação entre dispositivos até 150 metros.

Um emissor Wi-Fi utiliza uma antena para propagar sinais eletromagnéticos sem fio e sua intensidade pode ser medida a partir de um dispositivo receptor de sinal Wi-Fi (CHEN et al., 2008; SNEHA; NAGARAJAN, 2020) que segundo Kong *et al.* (KONG et al., 2011), depende da potência da fonte, características da antena, distância de conexão, permeabilidade magnética, permissividade e refração. A eficiência da transmissão é medida pelo *Received Signal Strength Indication* (RSSI),

que mede a intensidade do sinal entre os dispositivos transmissor de sinal (Tx) e receptor de sinal (Rx), sendo que quanto maior a distância, menor o valor. O RSSI geralmente é medido em decibel-milliwatts (dBm) (LIPINSKI; LEPLAWY, 2019; MORA et al., 2006; REN et al., 2020).

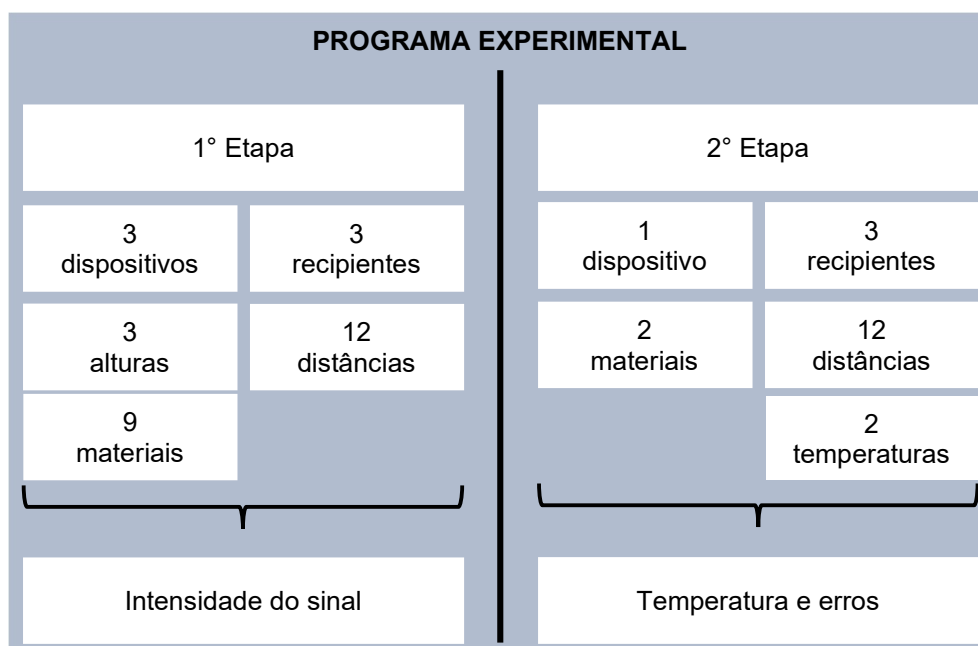
A partir dos modelos de simulação disponíveis pode-se verificar que fatores como intensidade do sinal na distância de referência (geralmente medida a 1m), distância entre dispositivos (Tx e Rx), índice de perda e também, obstáculos que o sinal irá ultrapassar, como por exemplo, elementos de madeira, drywall, vidro, concreto e entre outros influenciam diretamente no resultado final do RSSI (FANG; JIA, 2001; HASHEMI, 1993; LIPINSKI; LEPLAWY, 2019; REN et al., 2020; ZAFARI; GKELIAS; LEUNG, 2019). Uma vez que cada tipo de material exerce uma influência específica na atenuação do sinal em função das propriedades físicas, como por exemplo densidade, permeabilidade, morfologia e espessura do elemento que o sinal irá atravessar (FANG; JIA, 2001; HASHEMI, 1993; LIPINSKI; LEPLAWY, 2019).

Apesar de todos os avanços no uso de dispositivos IoT na construção civil, questiona-se o quanto materiais de diferentes densidades e os sistemas de formas para elementos de concreto (madeira, metálica e PVC) influenciam o alcance de sinal de diferentes dispositivos IoT. Também, questiona-se a confiabilidade dos dados coletados pelo sensor em função da intensidade do sinal entre dispositivos. Para isso, o presente capítulo busca avaliar a confiabilidade de coleta e envio de dados de dispositivos IoT inseridos em diversos materiais da construção civil, por meio de um programa experimental desenvolvido em ambiente de laboratório que avaliou o impacto da densidade do material em que o dispositivo IoT está instalado no RSSI.

2.1 Programa Experimental

O programa experimental é dividido em duas etapas (Figura 8).

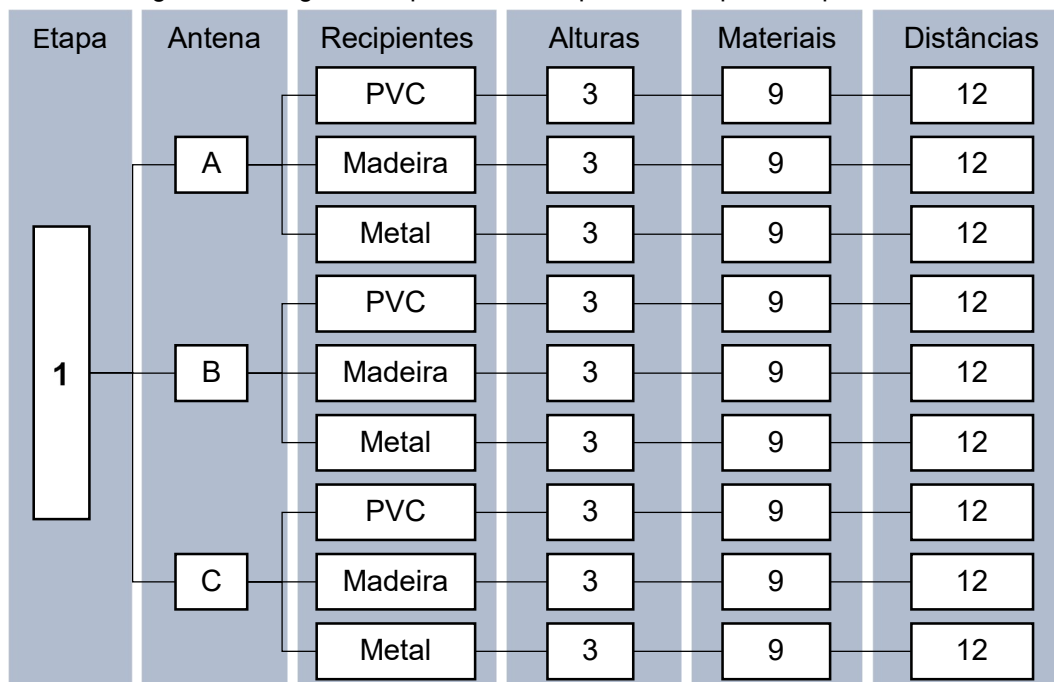
Figura 8 – Programa Experimental do capítulo 2



FONTE: O Autor

Na primeira etapa é avaliada a intensidade de recepção do sinal (RSSI) de 3 modelos de antenas de dispositivos IoT imersos em 9 tipos de materiais da construção (6 materiais em pó seco e 3 materiais no estado fresco), dispostos em 3 recipientes de diferentes materiais ao longo de 12 pontos de conexão entre dispositivos e 3 alturas de medições. Para cada ponto de leitura são realizadas 3 medições a cada 2 m (de 2 a 24 m), totalizando 8.748 medições (2.917 para cada dispositivo IoT). A Figura 9 mostra o programa experimental realizado para a primeira etapa.

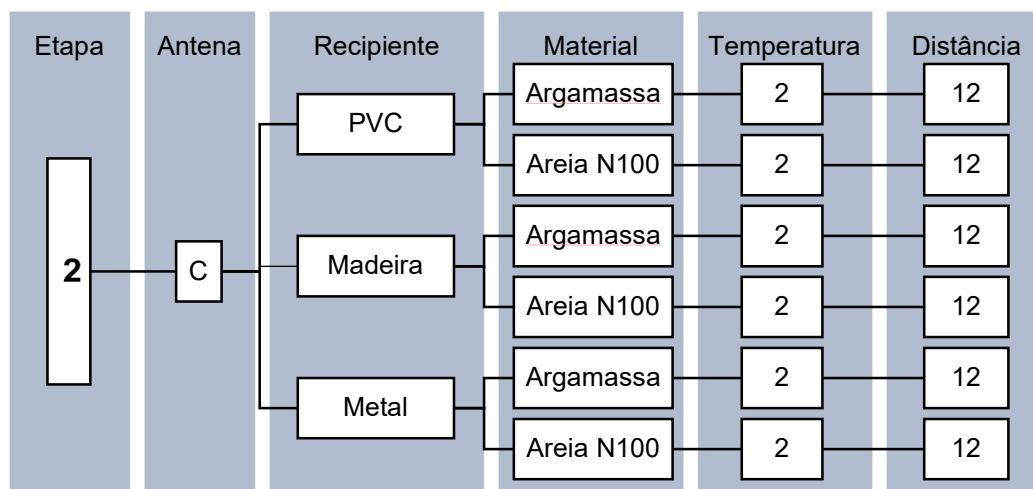
Figura 9 – Programa experimental da primeira etapa do capítulo 2



FONTE: O Autor

Na segunda etapa focou-se na confiabilidade da transmissão de dados por meio da medição de temperatura com o uso do dispositivo C embarcado com um sensor de temperatura (DS18B20) imerso em 2 tipos de materiais com temperatura ambiente e aquecidos artificialmente. A Figura 10 apresenta o programa experimental realizado. Nesta etapa, 432 medições foram realizadas (3 medidas para cada condição). Para permitir comparação e avaliação da confiabilidade, os valores medidos são comparados com sensor de medição de temperatura referencial. Desta forma, foram obtidas 432 medições para o dispositivo com conexão Wi-Fi (dispositivo C) e 432 medições para o dispositivo com conexão via cabo (referencial). A partir destes resultados, foi realizado um agrupamento dos valores de RSSI para um mesmo ponto de medição (distância x) e calculada a média do RSSI. Logo em seguida, foram definidas 4 classes (material e condição de temperatura) para análise de resultados entre os dispositivos, sendo elas: Areia N100 Ambiente, Areia N100 Aquecida, Argamassa Ambiente e Argamassa Aquecida. Desta forma, cada uma das 12 distâncias obtidas abrange um conjunto de 9 medições para o dispositivo via Wi-Fi e para o dispositivo via cabo.

Figura 10 – Programa experimental da segunda etapa do capítulo 2



FONTE: O Autor

2.1.1 Materiais

A Tabela 1 apresenta as características dos três microcontroladores usados (dispositivos A, B e C). Os dispositivos IoT foram protegidos por meio de caixas plásticas e encapsulados com resina epoxídica. Todos os *hardwares* contaram com porta e cabos USB compatíveis para transmissão de dados e de energia, assim a alimentação dos microcontroladores é feita via fonte de energia portátil. Os dispositivos A e C são os mesmos modelos (ESP D1 mini), no entanto no dispositivo C foi adicionada uma antena adesiva externa a caixa encapsulada.

Tabela 1 – Resumo da especificação dos microcontroladores

Itens	Unidades	Especificações		
		A	B	C
Nome comercial		ESP D1 mini	ESP 8266	ESP D1 mini
Dimensões do módulo	mm	34 x 26 x 7	48 x 26 x 13	34 x 26 x 7
Modos de operação	-	STA/AP/STA+AP	STA/AP/STA+AP	STA/AP/STA+AP
Wi-Fi	-	IEEE 802.11 b/g/n	IEEE 802.11 b/g/n	IEEE 802.11 b/g/n
Tensão de operação	V	2,58 ~ 3,60	2,58 ~ 3,60	2,58 ~ 3,60
Portas GPIO	Unidades	11	11	11
Corrente de consumo	mA	68	109	68
Taxa de transferência	bps	110-460800	110-460800	110-460800

Antena	-	Antena embutida	Antena embutida	Antena Externa (Molex 1558-1610MHZ GNSS Flex Antenna)
Conector micro-usb	-	Sim	Sim	Sim
Fonte de energia	-	Portátil	Portátil	Portátil

FONTE: O Autor

Foram utilizados nove tipos de materiais, sendo seis materiais em pó e secos e três materiais no estado fresco. Suas densidades variam de 1265 kg/m³ até, aproximadamente, 2225 kg/m³. A Tabela 2 apresenta os materiais utilizados e respectiva característica, massa unitária e teor de vazios.

Tabela 2 – Caracterização dos materiais

Nome	Característica	Massa unitária (kg/m ³)	Teor de vazios (%)
Areia N° 100 ¹	Pó seco	1265	55
Areia N° 50 ¹	Pó seco	1275	54
Areia N° 30 ¹	Pó seco	1310	53
Brita	Pó seco	1330	58
Areia N° 16 ¹	Pó seco	1335	52
Areia	Pó seco	1460	48
Gesso	Estado fresco	1895	9
Argamassa de revestimento	Estado fresco	1945	5
Concreto	Estado fresco	2225	3

¹ Areia normal brasileira utilizada para determinar a resistência à compressão do Cimento Portland de acordo com a NBR7214 (ABNT, 2015)

FONTE: O Autor

Os recipientes utilizados para a inserção dos dispositivos IoT e enchimentos com diferentes densidades são divididos em 3 tipologias de materiais amplamente utilizados na construção civil, principalmente em sistemas de formas para elementos de concreto (LI et al., 2022; MICHEL et al., 2019; SHRIVASTAVA; CHOURASIA; SAXENA, 2020). Os recipientes metálico e PVC possuem formato cilíndrico e o de madeira prismático. A Tabela 3 apresenta os recipientes e suas respectivas dimensões.

Tabela 3 – Especificações dos recipientes

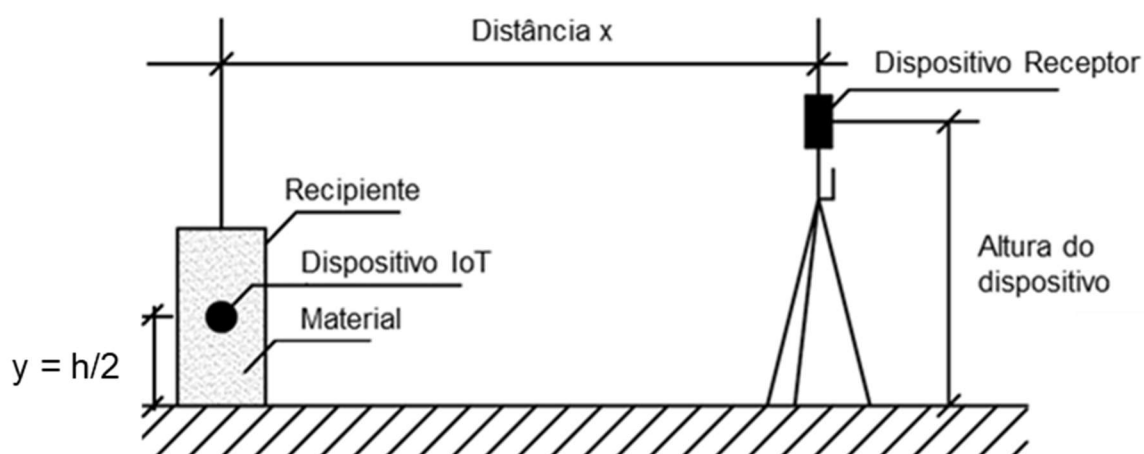
Recipiente	Material	Formato	Dimensões (mm)
1	Metal	Cilíndrico	$\varnothing = 150 \times H=300$
2	PVC	Cilíndrico	$\varnothing = 150 \times H=300$
3	Madeira	Prismático	L=150, C=150, H=300

2.1.2 Métodos

As medições do presente programa experimental foram realizadas em ambiente laboratorial com temperatura ambiente variando entre 21°C e 24°C. Em posse do recipiente, o material em estudo é inserido até 5 cm acima da metade da altura total do recipiente ($y = h/2 + 5\text{cm}$) para posicionamento do dispositivo IoT e em seguida o recipiente foi preenchido com o material até a superfície. Os dispositivos IoT foram conectados a fonte de energia externa.

Finalizado o *setup*, foi iniciado o ensaio onde foram realizadas as leituras de intensidade de sinal (RSSI). A Figura 11 ilustra o processo de coleta de dados e todas as variáveis em estudo, na qual podemos elencar: Dispositivo IoT, material, recipiente, altura do dispositivo e distância x.

Figura 11 – Processo de coleta de dados



FONTE: O Autor

Na segunda etapa, é avaliada a confiabilidade da medição de temperatura com a utilização do dispositivo IoT C e adição de um sensor digital de temperatura à prova d'água (DS18B20). A Tabela 4 apresenta as especificações técnicas do sensor selecionado para a coleta de dados de temperatura.

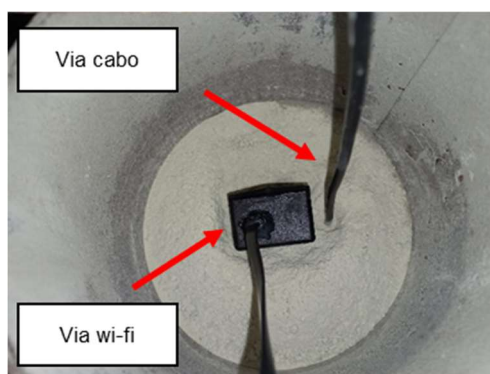
Tabela 4 – Resumo das especificações do sensor de temperatura

Itens	Unidades	Especificações
Tipo	-	Sensor digital
Tensão de operação	V	3,0 até 5,5
Faixa de leitura	°C	-55 até 125
Acurácia entre -10°C e +85°C	°C	±0,5
Resolução programável	Bits	9 até 12
Resolução	°C	0,5 até 0,0625

FONTE: Dallas (2022)

Com o intuito de permitir comparação do dispositivo IoT imerso nos materiais de preenchimento é utilizado um segundo microcontrolador (referencial) fora do recipiente e com sensor de temperatura posicionado ao lado do sensor interno. Uma vez mantido o controlador fora do recipiente, a transmissão de seus dados não é influenciada pelo material de preenchimento e suas respectivas densidades. Desta forma, ambos os sensores foram posicionados no centro do recipiente de forma em que os dois sensores DS18B20 (via Wi-Fi e via cabo) fiquem próximos um do outro (Figura 12). Os microcontroladores foram programados para realizar as leituras no mesmo instante (HUB, 2018), promovendo a mesma condição de temperatura para ambos os sensores e reduzindo variações de temperatura devido agentes externos.

Figura 12 – Dispositivo IoT e sensor de referência



FONTE: O Autor

Com o intuito de compreender se a variação da temperatura do material de preenchimento também interfere na qualidade da leitura do dado lido pelos dispositivos IoT, foram realizadas medições de temperatura com os materiais em temperatura ambiente no intervalo entre 21°C e 24°C e após aquecimento em intervalo

de temperatura entre 60°C e 61,2°C. O processo de aquecimento foi realizado por meio do posicionamento de dois refletores compostos por lâmpadas halógenas com potência de 500W em torno do recipiente até a estabilização da temperatura interna do material em 60°C. O processo de aquecimento foi feito em duas tipologias de material de preenchimento: (i) Areia N°100 (densidade aparente de 1265 kg/m³) e; (ii) Argamassa (densidade aparente de 1945 kg/m³). Após o processo de aquecimento e estabilização da temperatura foram realizadas as medições através do dispositivo IoT e pelo sensor de temperatura com transmissão externa (referencial).

A metodologia utilizada para análise dos resultados com base nas variáveis supramencionadas do presente programa experimental inicia-se com a avaliação da quantidade de leituras registradas por cada dispositivo IoT em função da distância. As quantidades de leituras registradas foram agrupadas em função das 12 distâncias de conexão estabelecidas. Em seguida foram realizadas análises com o intuito de avaliar os impactos que as variáveis definidas causam na comunicação e transmissão de dados de dispositivos IoT a partir de gráficos *boxplot*. Desta forma, são percorridas análises referentes ao material do recipiente, a altura de conexão em relação ao dispositivo IoT, o tipo de material (estado seco e estado fresco) e a densidade do material em que o dispositivo IoT está inserido. As análises são percorridas tanto a partir de representações gráficas quanto por medidas resumo. Por fim, foi realizado um agrupamento dos dados de RSSI em função da distância de conexão e da densidade em que o dispositivo IoT está inserido a partir de gráficos de dispersão. Estes têm como intuito visualizar a possibilidade de tendência na variação do RSSI em função da densidade para uma mesma distância de conexão. Esta análise é mais aprofundada para as distâncias 2, 12 e 24m.

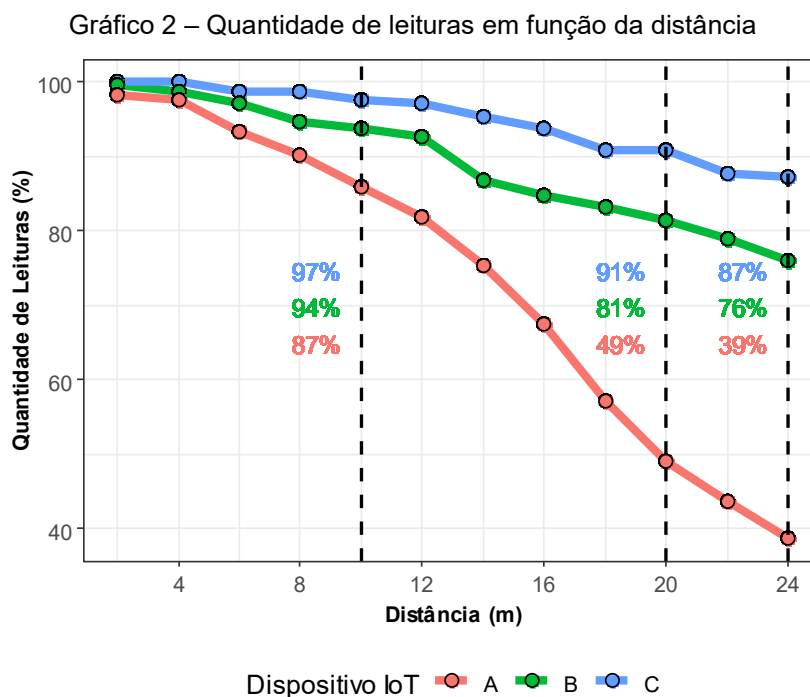
Na segunda etapa do programa experimental, é avaliado se o RSSI pode influenciar o valor lido pelo dispositivo IoT. Desta forma, são apresentados os erros relativos dos valores de temperatura lidos pelo sensor de temperatura conectado ao dispositivo IoT em relação sensor de temperatura referencial em forma de tabela. Por fim, é calculado o fator wi-fi/referencial (°C/°C) em função da distância de conexão com o intuito de avaliar tendências de influência nos valores de temperatura.

2.2 Apresentação e Análise de Resultados

2.2.1 Primeira etapa

O Gráfico 2 apresenta a quantidade de leituras registradas por cada dispositivo IoT para cada ponto do programa experimental onde é possível verificar que a medida em que há aumento na distância entre dispositivos, há uma redução na quantidade de coleta de dados para os três dispositivos IoT avaliados. Isto, devido ao fato que tanto a distância de conexão entre dispositivos quanto as interferências presentes (material de preenchimento e recipiente) exercem influências negativas no RSSI até que seja interrompida a conexão entre o dispositivo transmissor e receptor de sinal (FANG; JIA, 2001; HASHEMI, 1993; LIPINSKI; LEPLAWY, 2019; MORA et al., 2006; REN et al., 2020; ZAFARI; GKELIAS; LEUNG, 2019).

Em posse destas quantidades é possível verificar que o dispositivo C apresentou maior quantidade de leituras em relação aos demais dispositivos e que para a distância máxima de 24m, foi possível realizar 87% das medições projetadas. Já para o dispositivo B, foi verificado uma maior quantidade de perdas de conexão em relação ao C, porém, com exceção das distâncias de 22 e 24m, foram realizadas mais de 80% das medições projetadas, sendo que em seu pior cenário, 24 m de distância entre dispositivos, foram realizadas 76% das medições. Por fim, tratando-se do dispositivo A, foi verificado um elevado índice de interrupção de conexão com o dispositivo receptor, apresentando perda de conexão para distância a partir da primeira medida, 2m, até que a partir da distância de 20 m não houve conexão em mais de 50% das condições medidas.



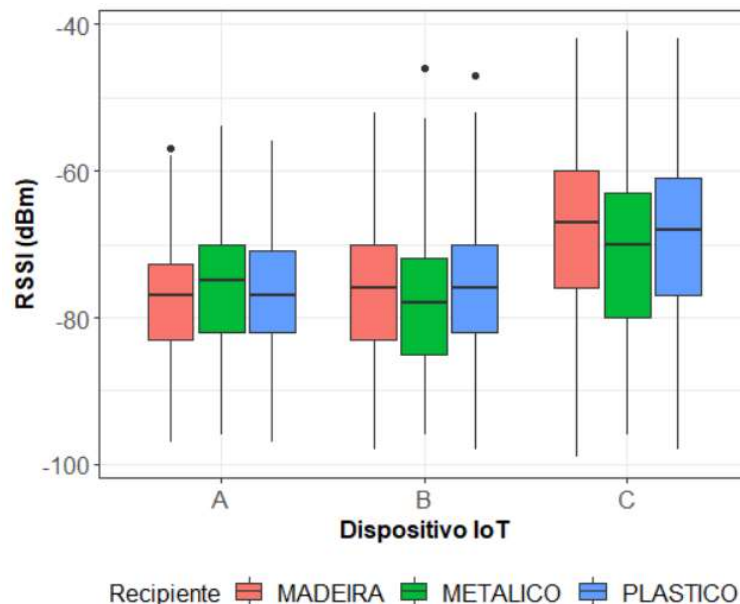
FONTE: O Autor

As variações com relação a quantidade de leituras registradas por cada dispositivo podem estar associadas ao modelo de antena utilizado (KONG et al., 2011). Assim, conforme observado por Kong *et al.* (2011), uma vez que as características da antena podem influenciar diretamente a intensidade do sinal Wi-Fi, foi observado que a partir da utilização de uma antena externa à caixa plástica e não submetida ao processo de encapsulamento, foram observadas maiores quantidades de medições.

O Gráfico 3 apresenta gráficos de *boxplot* com intensidades de sinal (RSSI) na unidade de decibéis-miliwatt para os três dispositivos (eixo x) em função do recipiente que os dispositivos estão inseridos. O dispositivo C apresentou a concentração de valores de RSSI entre -80 e -61 dBm, o dispositivo B entre -85 e -70 dBm e o dispositivo A entre -83 e 71 dBm. O dispositivo C apresentou capacidade de transmissão de sinais de maiores intensidades quando comparado com os demais dispositivos. Resultados semelhantes foram apresentados por Kong *et al.* (KONG et al., 2011). Não foram encontradas grandes diferenças entre os dispositivos A e B no âmbito do RSSI. Também, não foram encontradas tendências de influência para o tipo de recipiente uma vez que a concentração dos resultados de RSSI para cada

dispositivo se apresentaram próximos. Isso demonstra que o recipiente de preenchimento, de maneira isolada, não exerceu influências significativas no RSSI.

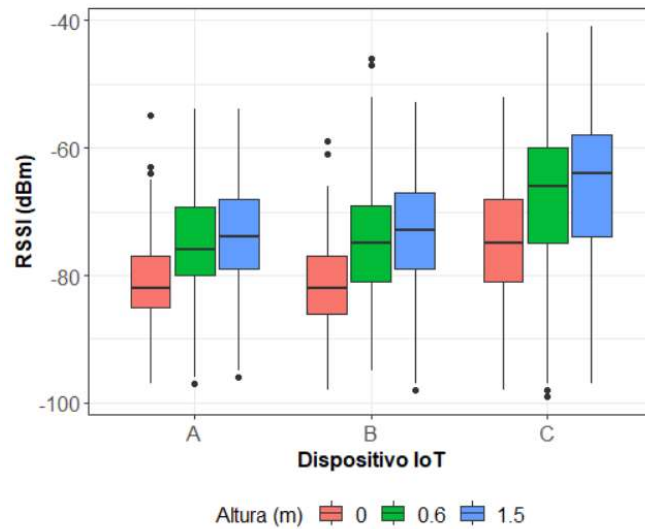
Gráfico 3 – RSSI para cada dispositivo IoT imerso em diferentes recipientes



FONTE: O Autor

O Gráfico 4 apresenta gráficos de *boxplot* do RSSI em função da altura de leitura do dispositivo receptor de sinal, sendo elas: 0 m, 0,60 m e 1,50 m em relação ao solo. Novamente foi observado que o dispositivo C apresentou melhor desempenho que os demais dispositivos quando avaliado o RSSI, porém ressalta-se que foi verificado um comportamento comum para os três dispositivos IoT quando avaliado o RSSI em função da altura do dispositivo receptor. Quando o dispositivo se encontra encostado no solo (0 m), há uma maior redução no valor do RSSI, porém à medida que aumenta sua altura, verifica-se um aumento nos valores de RSSI. Este comportamento contribui quando projetado que o dispositivo IoT embutido no concreto irá se comunicar com um celular (dispositivo receptor) que estará com o usuário, isto é, uma altura maior que 0,60 m em relação ao dispositivo IoT.

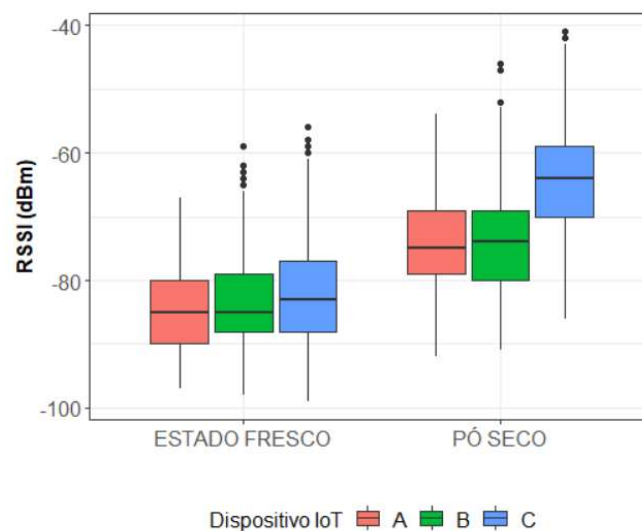
Gráfico 4 – RSSI para cada dispositivo IoT em função da altura do dispositivo IoT



FONTE: O Autor

O Gráfico 5 apresenta o agrupamento dos resultados de RSSI (eixo y) em gráfico de *boxplot* de cada dispositivo IoT em função dos dois tipos de materiais avaliados, pó seco (seis materiais) e estado fresco (três materiais). Os valores de RSSI indicam que para os dispositivos A e B, há uma variação de aproximadamente 10 dBm entre materiais pó seco e estado fresco. Para o dispositivo C foi verificado o mesmo comportamento, porém com uma variação de aproximadamente 20 dBm entre os materiais.

Gráfico 5 – RSSI para materiais de características diferentes



FONTE: O Autor

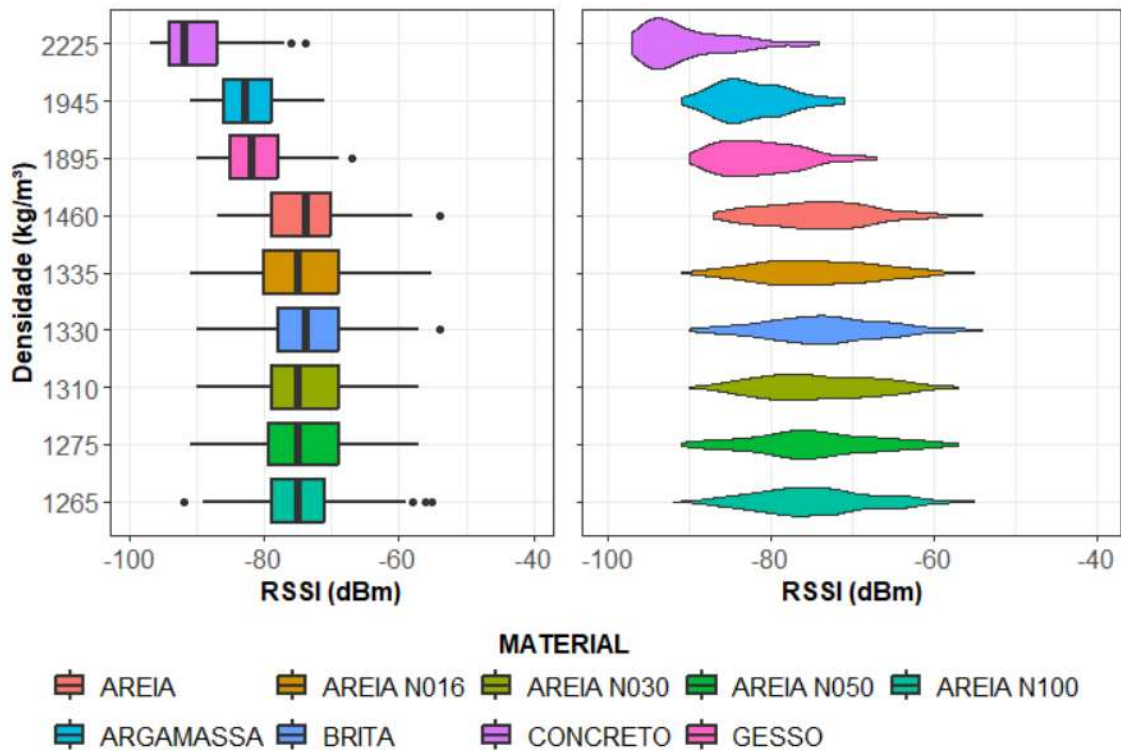
Os Gráficos 6, 7 e 8 mostram os resultados do RSSI em função dos nove materiais de preenchimento com diferentes densidades. Os resultados são

apresentados na forma de bloxplots e violinos, onde são combinados os valores de RSSI para os diferentes tipos de recipientes, as três alturas do dispositivo receptor, as doze distâncias de avaliação e as três tipologias de dispositivos IoT. Este agrupamento das variáveis supracitadas promovem uma maior amplitude dos resultados, porém são ideais para avaliação da influência do material (densidade) no RSSI de cada dispositivo IoT.

Assim como observado no gráfico anterior (Gráfico 5), é possível observar a variação dos resultados de RSSI entre os materiais no estado pó seco e no estado fresco. Os materiais de preenchimento no estado pó seco, apesar de apresentarem variação na densidade, apresentaram resultados muito próximos de RSSI (densidade entre 1265 e 1460 kg/m³). É possível observar a partir dos gráficos de violinos (à direita) que há um comportamento similar com maior amplitude e tendência média.

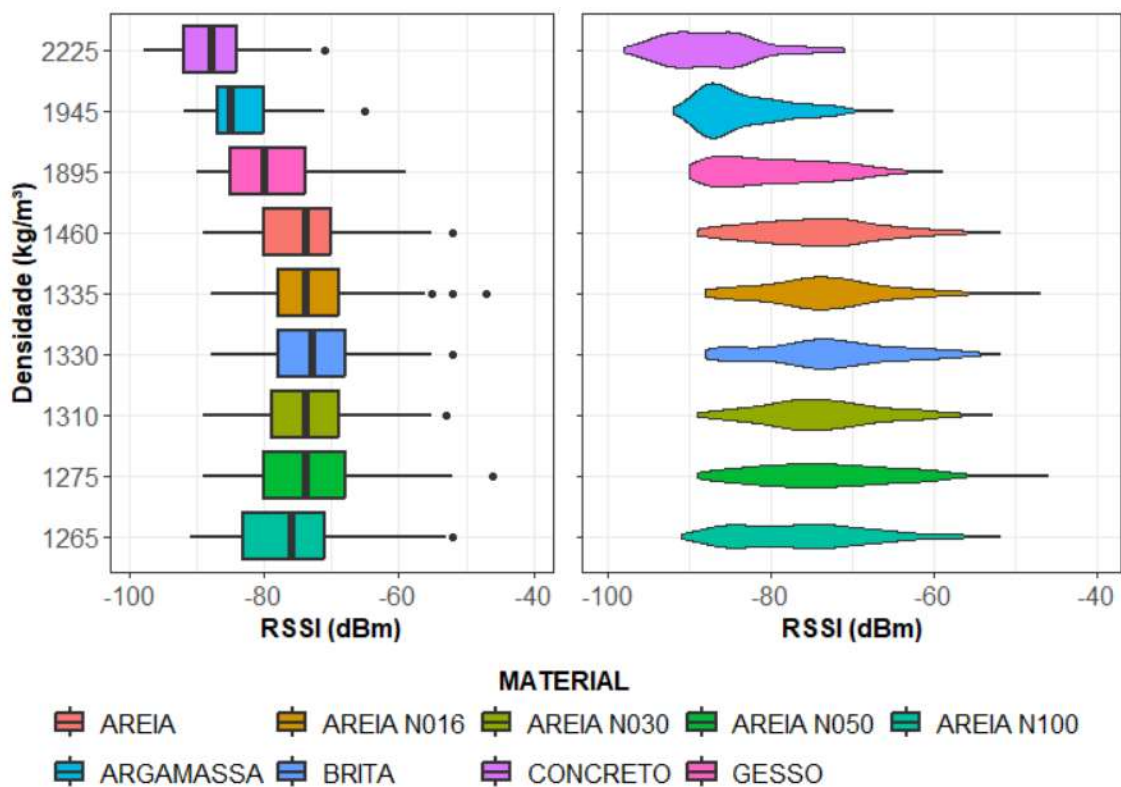
Para os materiais de preenchimento no estado fresco (densidade entre 1895 e 2225 kg/m³), é verificado que há uma obstrução maior da intensidade de transmissão do sinal entre dispositivos e conseqüente diminuição dos valores do RSSI. Além de ser possível verificar um comportamento na distribuição dos dados diferente do que os materiais no estado pó seco a partir dos gráficos de violinos. Para os materiais no estado fresco é possível observar que a distribuição não apresenta grande amplitude como para os materiais no estado pó seco, e sim com uma amplitude menor e com maior concentração de dados à esquerda devido a interrupção de sinal e por conseqüência não medição do RSSI. Este comportamento é identificado devido ao aumento de interrupção de conexão entre os dispositivos IoT e o dispositivo receptor, desta forma não sendo possível registrar valores de RSSI inferiores a -96 dBm.

Gráfico 6 – Densidade (kg/m³) X RSSI (dBm) em boxplot e violino para o dispositivo A

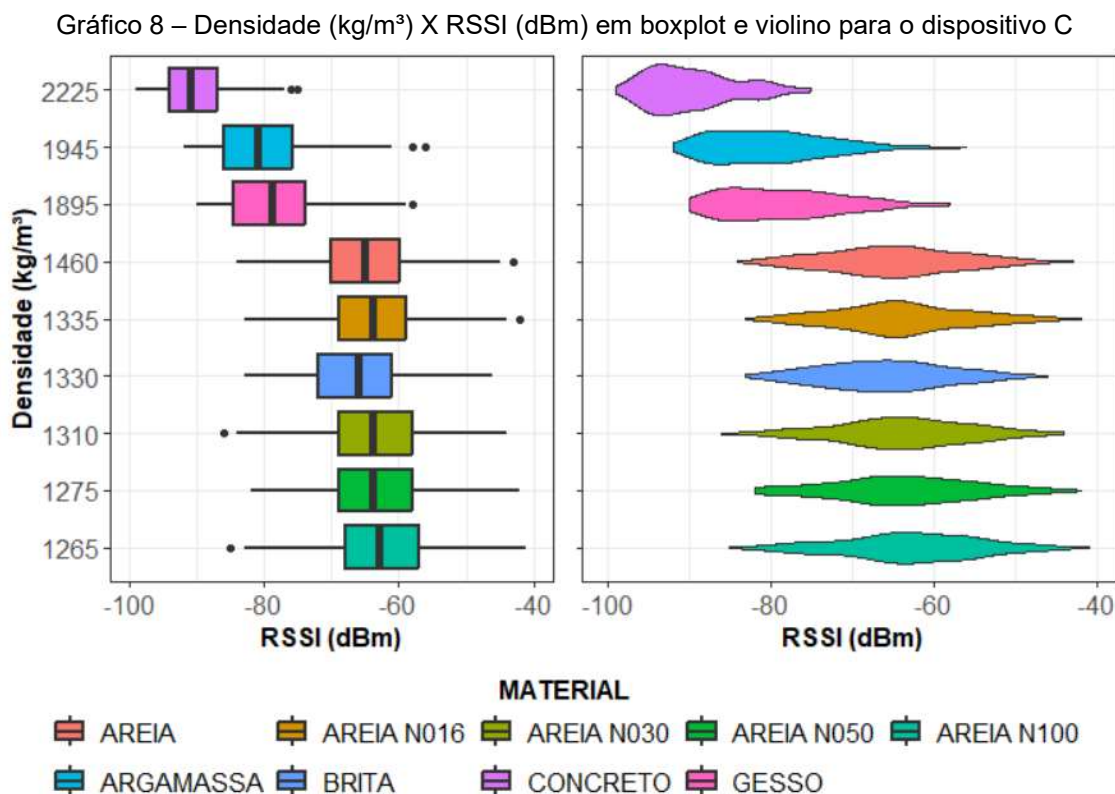


FONTE: O Autor

Gráfico 7 – Densidade (kg/m³) X RSSI (dBm) em boxplot e violino para o dispositivo B



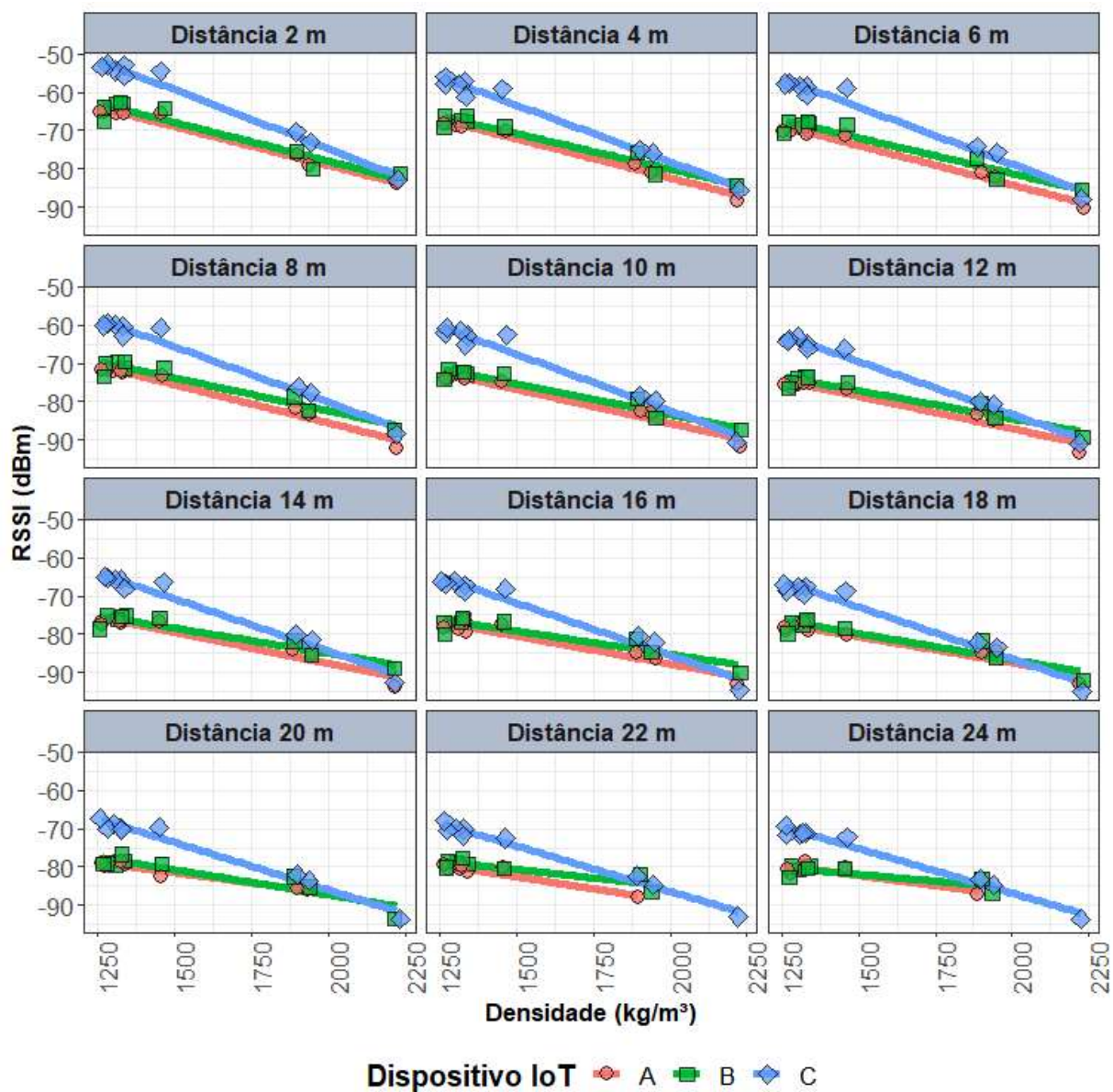
FONTE: O Autor



FONTE: O Autor

No Gráfico 9 são apresentados os resultados de RSSI para todas as distâncias (2 a 24 metros) com os três dispositivos IoT. As imagens mostram que a partir dos pontos obtidos é possível observar uma tendência onde para menores densidades avaliadas no presente projeto, a utilização de uma antena adesiva promove um aumento do RSSI, entretanto, à medida que se aumenta os valores de densidade esta amplitude na variação dos valores de RSSI reduzem até valores próximos.

Gráfico 9 – Distribuição dos dados de RSSI em função da densidade e distâncias X de avaliação (2 a 24 m)

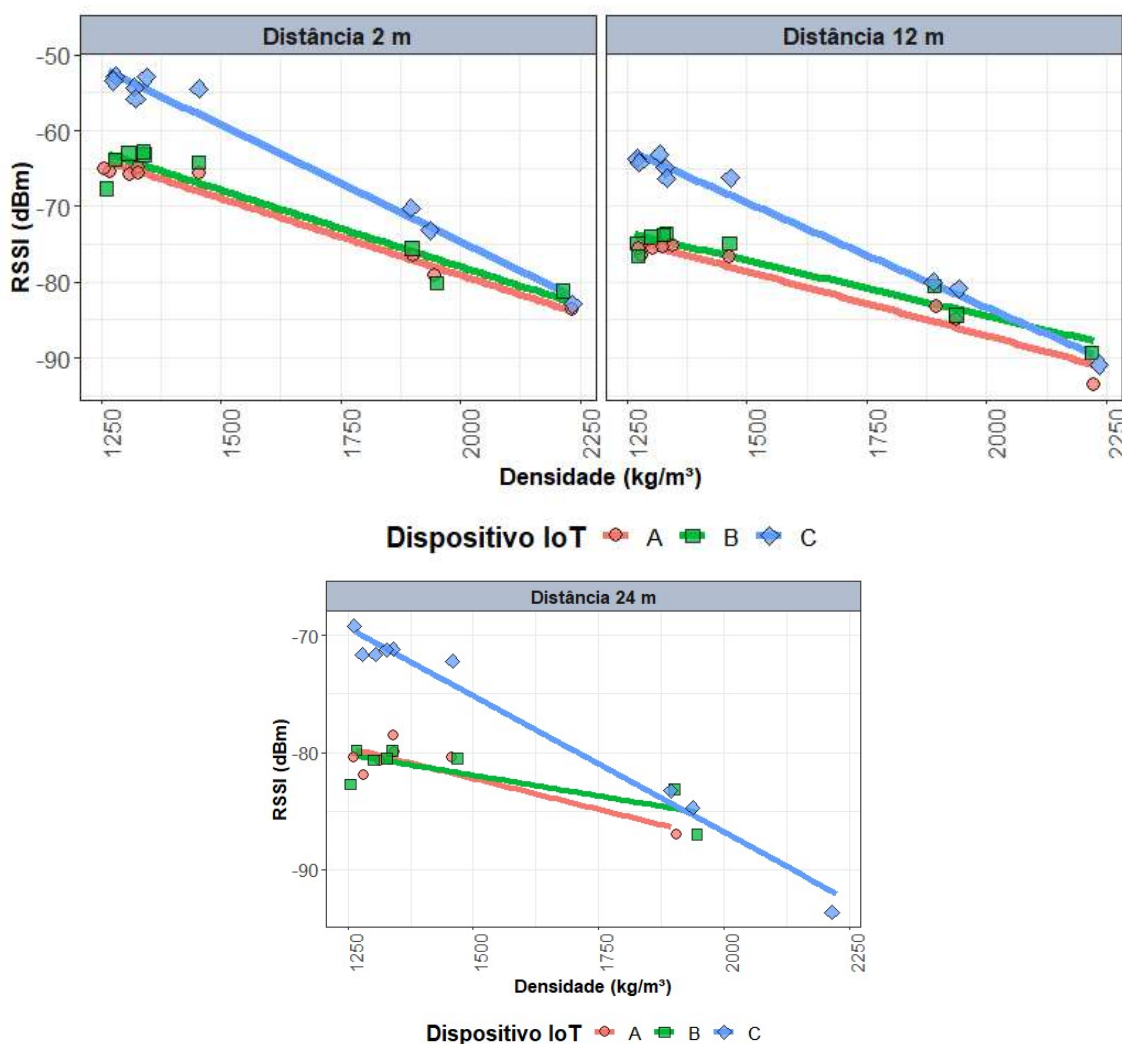


FONTE: O Autor

Avaliando o RSSI em função densidade para as distâncias de 2m (menor distância), 12m (distância média) e 24m (maior distância) a partir do Gráfico 10 é possível identificar o comportamento discutido principalmente para as distâncias de 2 e 12 m. Para distância de 24 m além de haver uma redução dos valores de RSSI para os 3 dispositivos avaliados, os dispositivos A e B não conseguiram estabelecer conexão com o dispositivo receptor para densidades superiores a 2000 kg/m³, desta forma, não apresentando valores de RSSI.

Em posse dos valores obtidos e idealizando uma aplicação de dispositivo IoT inserido em um elemento de concreto para monitoramento de suas propriedades (foco do presente trabalho), o dispositivo C apresenta maior capacidade de permitir uma conexão Wi-Fi e transmitir os dados coletados pelo sensor para distâncias de até 20 m. Já para o caso dos dispositivos A e B, a transmissão também é possível, porém com uma distância entre o dispositivo IoT e o dispositivo receptor menor que 20 m.

Gráfico 10 – Densidade x RSSI para 2, 12 e 24 metros de distância X



FONTE: O Autor

2.2.2 Segunda Etapa

A Tabela 5 apresenta as médias de temperaturas medidas (referencial e dispositivo IoT C) para os dois tipos de materiais em função da distância de medição. Os resultados mostram pequenas variações nos valores medidos (inferior a 0,5%) ao

longo das 12 distâncias para uma mesma classe material temperatura. Para a classe Areia N100 Aquecida, foi verificado valores de erro relativo (ER) próximos a zero, apresentando uma amplitude, em módulo, igual à 0,2%. Já para o caso da classe Areia N100 Ambiente, apesar de ser a classe que apresentou os maiores valores de ER (%), os valores ainda são inferiores a 3,0% e apresentam estabilidade em função da distância uma vez que a amplitude máxima em módulo é igual à 0,5%. Para as classes Argamassa Aquecida e Argamassa Ambiente, foram verificados tendências e valores similares de amplitude para as respectivas condições de temperatura, sendo elas, 0,2% e 0,5%, respectivamente

Tabela 5 – Resultados da segunda etapa para referência e Wi-Fi

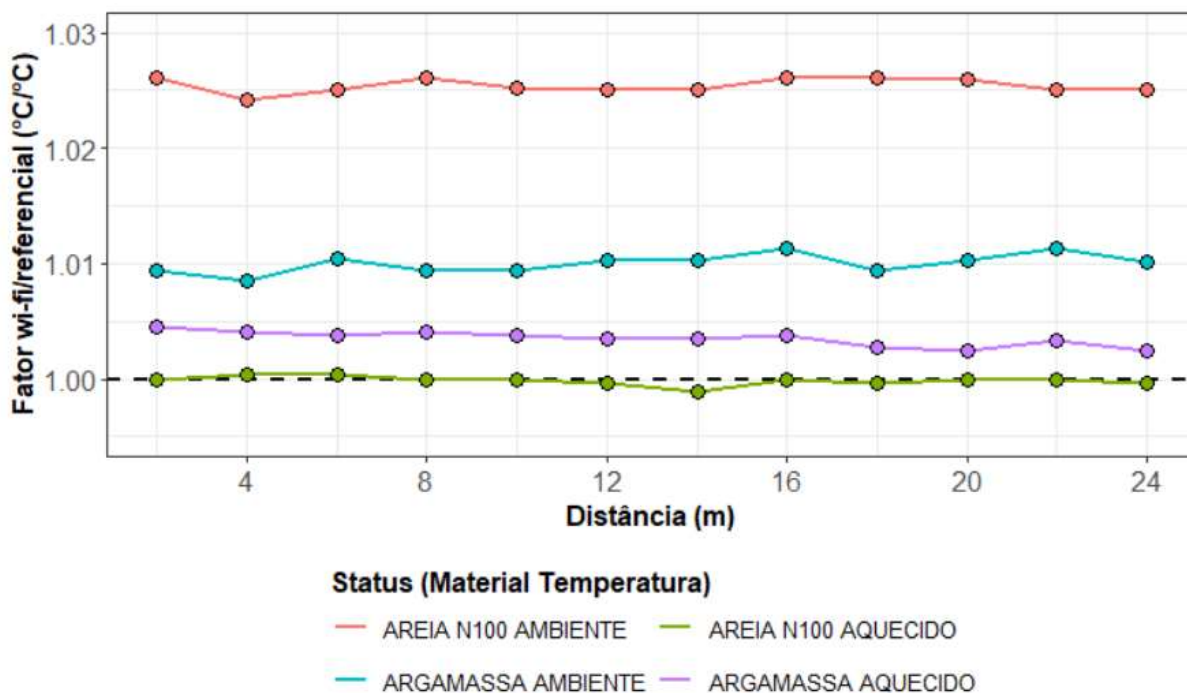
DIST.	Areia N100 Ambiente			Areia N100 Aquecida			Argamassa Ambiente			Argamassa Aquecida		
	Ref	Wi-Fi	ER	Ref	Wi-Fi	ER	Ref	Wi-Fi	ER	Ref	Wi-Fi	ER
2	22,7	23,3	2,6%	60,8	60,8	0,0%	22,5	22,8	1,3%	60,4	60,8	0,7%
4	22,7	23,3	2,6%	60,8	60,8	0,0%	22,6	22,8	0,9%	60,4	60,8	0,7%
6	22,8	23,3	2,2%	60,8	60,9	0,2%	22,6	22,8	0,9%	60,5	60,8	0,5%
8	22,7	23,3	2,6%	60,8	60,9	0,2%	22,6	22,8	0,9%	60,5	60,9	0,7%
10	22,8	23,4	2,7%	60,8	60,9	0,2%	22,6	22,8	0,9%	60,5	60,8	0,5%
12	22,8	23,4	2,6%	60,8	60,9	0,2%	22,6	22,8	0,9%	60,5	60,9	0,7%
14	22,8	23,4	2,6%	60,8	60,9	0,2%	22,6	22,8	0,9%	60,4	60,8	0,7%
16	22,8	23,4	2,6%	60,8	60,9	0,2%	22,6	22,8	0,9%	60,4	60,8	0,7%
18	22,8	23,4	2,6%	60,8	60,9	0,2%	22,6	22,8	0,9%	60,4	60,7	0,5%
20	22,8	23,4	2,6%	60,8	60,9	0,2%	22,6	22,9	1,3%	60,4	60,7	0,5%
22	22,8	23,4	2,6%	60,8	60,9	0,2%	22,7	23	1,3%	60,4	60,7	0,5%
24	22,8	23,4	2,6%	60,8	60,9	0,2%	22,8	23	0,9%	60,5	60,8	0,5%

FONTE: O Autor

O Gráfico 11 apresenta os resultados de temperatura medido pelo dispositivo IoT inserido no recipiente medida pelo sensor referencial. A abordagem de apresentação dos resultados é feita a partir de uma razão temperatura via wifi/temperatura referencial em função da distância. Sendo assim, quanto mais próximo de 1 o valor da razão supramencionada, menor será a diferença entre os valores de temperatura medidos pelos sensores. Apesar de para o caso da classe Areia N100 Ambiente ter apresentado o maior fator (aproximadamente 1,025), para as 4 classes avaliadas é possível observar que não há uma relação entre a distância

de conexão com a temperatura medida pelo dispositivo IoT, devido a linearidade horizontal dos resultados.

Gráfico 11 – Fator Wi-Fi/referencial em função da distância



FONTE: O Autor

2.3 Conclusões Parciais

As principais conclusões do presente capítulo são:

- A antena de conexão Wi-Fi influencia diretamente na intensidade e alcance do sinal. O dispositivo C com antena adesiva externa a caixa encapsulada apresentou ótimos indicadores de transmissão de dados. Este dispositivo transmitiu 94,6% dos dados medidos para o dispositivo receptor. O dispositivo B, 88,4% das medições totais e o dispositivo A, 73,7% das medições totais.
- Os recipientes de PVC, Madeira e Metal não exerceram influência na quantidade de medições e intensidade do RSSI, podendo dizer que o tipo de material utilizado para formas de elementos de concreto não causa influências significativas no RSSI.
- A densidade do material avaliado influencia diretamente no RSSI dos três dispositivos IoT avaliados.

- Para uma mesma distância de conexão há uma redução do RSSI devido ao aumento da densidade do material avaliado.
- As medições realizadas sejam em temperatura ambiente ou após aquecimento não apresentaram grandes variações ou interferências quando comparadas com as medições por transmissão wireless através do dispositivo IoT e a medição referencial.
- A distância entre dispositivos e variação do RSSI não influenciam na qualidade do dado lido pelo dispositivo IoT.
- Não há uma correlação entre a distância de conexão entre dispositivos com a qualidade do dado lido pelo dispositivo IoT.
- Intensidade de sinal superior a -85 dBm são suficientes para permitir confiabilidade na conexão e dado coletado.

2.4 Referências Bibliográficas

CHEN, Yingying; CHANDRASEKARAN, Gayathri; ELNAHRAWY, Eiman; FRANCISCO, John Austen; KLEISOURIS, Konstantinos; LI, Xiaoyan; MARTIN, Richard P.; MOORE, Robert S.; TURGUT, Begumhan. GRAIL: A general purpose localization system. **Sensor Review**, v. 28, n. 2, p. 115–124, 2008. DOI: 10.1108/02602280810856679.

DALLAS. **Datasheet Sensor Ds18B20**. 2022.

FANG, Binxing; JIA, Yan. A Multi-Wall-and-Floor Model for Indoor Radio Propagation. **Vehicular Technology Conference Spring**, v. 53, p. 464–468, 2001. DOI: 10.1515/9783110599435.

HASHEMI, Homayoun. The Indoor Radio Propagation Channel. **Proceedings of the IEEE**, v. 81, n. 7, p. 943–968, 1993. DOI: 10.1109/5.231342.

HUB, Eletronics. **DS18B20 Temperature Sensor with ESP8266 and ThingSpeak**. 2018. Disponível em: <https://www.electronicshub.org/ds18b20-temperature-sensor-with-esp8266/>. Acesso em: 5 jun. 2022.

KONG, Sunkyu; HWANG, Chulsoon; KIM, Kiyeong; KIM, Heegon; PARK, Laehyuk; PARK, Unkyoo; KIM, Jiseong; KIM, Joungho. Analytical model for predicting the electromagnetic fields intensity in wireless power transfer systems. **2011 IEEE**

Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium, EDAPS 2011, p. 7–10, 2011. DOI: 10.1109/EDAPS.2011.6213734.

LI, Wei; LIN, Xiaoshan; BAO, Ding Wen; MIN XIE, Yi. A review of formwork systems for modern concrete construction. **Structures**, v. 38, n. January, p. 52–63, 2022. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.01.089. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.089>.

LIPINSKI, Piotr; LEPLAWY, Marcin. WiFi Electromagnetic Field Modelling for Indoor Localization. **Open Physics**, v. 17, n. 1, p. 352–357, 2019. DOI: 10.1515/phys-2019-0039.

MICHEL, Murillo A.; TUTIKIAN, Bernardo F.; ORTOLAN, Vinicius; OLIVEIRA, Marcos L. S.; SAMPAIO, Carlos H.; GÓMEZ P, Leandro; SILVA, Luis F. O. Fire resistance performance of concrete-PVC panels with polyvinyl chloride (PVC) stay in place (SIP) formwork. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 5, p. 4094–4107, 2019. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.07.018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.018>.

MISHRA, Mayank; LOURENÇO, Paulo B.; RAMANA, G. V. Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 48, n. October 2021, p. 103954, 2022. a. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103954. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103954>.

MISHRA, Mayank; LOURENÇO, Paulo B.; RAMANA, G. V. Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 48, n. January, p. 103954, 2022. b. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103954. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103954>.

MORA, J.; OTÍN, R.; DADVAND, P.; ESCOLANO, E.; PASENAU, M. A.; OÑATE, E. Open tools for electromagnetic simulation programs. **COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering**, v. 3, n. 25, p. 7, 2006.

REN, Qianqian; ZHANG, Yang; NIKOLAIDIS, Ioanis; LI, Jinbao; PAN, Yu. RSSI quantization and genetic algorithm based localization in wireless sensor networks. **Ad**

Hoc Networks, v. 107, p. 102255, 2020. DOI: 10.1016/j.adhoc.2020.102255. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102255>.

SHRIVASTAVA, Apurv; CHOURASIA, Devarshi; SAXENA, Shilpam. Planning of formwork materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 7060–7063, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.121. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.121>.

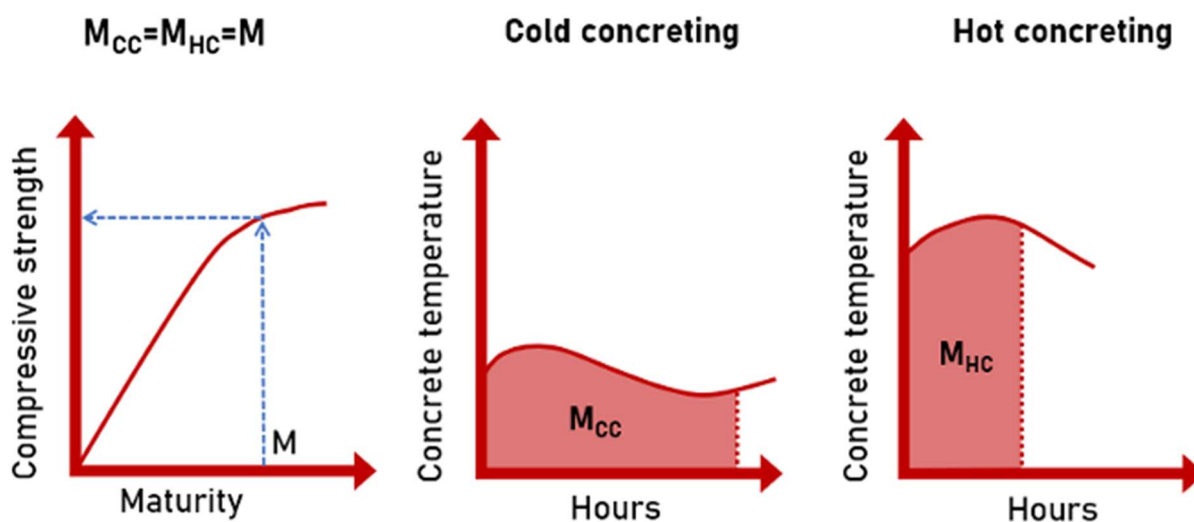
SNEHA, V.; NAGARAJAN, M. Localization in Wireless Sensor Networks: A Review. **Cybernetics and Information Technologies**, v. 20, n. 4, p. 3–26, 2020. DOI: 10.2478/cait-2020-0044.

ZAFARI, Faheem; GKELIAS, Athanasios; LEUNG, Kin K. A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 21, n. 3, p. 2568–2599, 2019. DOI: 10.1109/COMST.2019.2911558.

3. MÉTODO DA MATURIDADE DO CONCRETO

O método da maturidade foi idealizado por Saul (1951) na Europa baseado na reação de hidratação do cimento que possui características exotérmicas. Pode ser definido como um método não destrutivo utilizado para estimar a resistência à compressão do concreto *in loco* em tempo real, relacionando-o diretamente com seu histórico de temperatura. Este histórico, normalmente medido em horas-graus celsius, é conhecido como índice de maturidade. Para Saul, um concreto de mesma família e mesmo índice de maturidade possui aproximadamente a mesma resistência à compressão, isto é, um concreto curado com temperatura baixa em 10 dias pode ter a mesma resistência que um concreto curado com temperatura alta em 5 dias, desde que ambos tenham o mesmo índice de maturidade (Gráfico 12).

Gráfico 12 – Conceito de Maturidade



FONTE: Miller, Ho e Talebian (2022)

Partindo deste princípio, uma amostra de concreto utilizada para controle da resistência à compressão irá apresentar um menor índice de maturidade para uma idade X quando comparado com o índice de maturidade do elemento de concreto *in loco*, por exemplo. Isto se deve ao fato de que o elemento de concreto apresentou maior calor de hidratação devido seu maior volume de concreto quando comparado ao corpo de prova cilíndrico (10x20 cm) que irá apresentar menor calor de hidratação. Estas variações no índice de maturidade para uma mesma idade X irão apresentar

estimativas de resistência à compressão diferentes, onde o elemento de concreto irá apresentar uma resistência maior que o corpo de prova.

Como consequência da redução dos prazos de obra e antecipação na remoção do escoramento de obras, duas grandes falhas infelizes foram notadas pela mídia na década de 70, o colapso do edifício Skyline Plaza na Virgínia em 1973 (DELATTE; BOSELA, 2013) e o colapso da torre de resfriamento 1978 (LEW et al., 1979). Ambos os acidentes provocaram a morte de mais de 60 profissionais da construção civil e graves ferimentos em outros 30 funcionários (DELATTE; BOSELA, 2013). Desta forma, foi verificado um interesse por estimar a resistência à compressão do concreto *in loco* com o intuito de promover a remoção do escoramento de forma rápida e segura. Posteriormente foi verificado o desenvolvimento de sensores e equipamentos para determinação da resistência à compressão *in loco* a partir do método da maturidade (COMMAND CENTER, 2020; CONVERGE, 2021; DOKA GMBH, 2022; GIATEC, 2022; HILTI, 2022; LUMI CON, 2022; MATURIX, 2022; WAKE, 2018).

A literatura demonstra que os principais grupos de pesquisa sobre a o método da maturidade do concreto e sua aplicação na construção civil estão localizados nos: Estados Unidos, China, França, Coréia do Sul e no Reino Unido. Outros países como Canadá, Alemanha, Espanha, Japão, Índia e Brasil também apresentam algumas publicações relevantes. No Brasil, boa parte das publicações sobre o tema vêm de São Paulo, com algumas contribuições de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Com relação aos maiores canais destas publicações podemos destacar os *Journals: Construction and Building Materials; ACI Materials Journal; Cement And Concrete Composites, Magazine Of Concrete Research, Cement And Concrete Research, Journal Of Materials In Civil Engineering, Advanced Materials Research e Transportation Research*. Dos canais de publicações nacionais, é possível encontrar trabalhos publicados em revistas como Revista Matéria, Ambiente Construído, Concreto & Construções, Revista de Engenharia e Tecnologia, congresso como Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído e IBRACON.

Na Engenharia de Construção Civil, a aplicação do método da maturidade tem sido estudada e utilizada ao longo dos anos em diversas aplicações e uso do concreto, dentre elas, podem-se elencar: a remoção de formas e escoramento (RUDELLI; SANTILLI; ARRAMBIDE, 2015; TEIXEIRA; SANTILLI; PUENTE, 2017), a liberação de

trânsito para pavimento de concreto (CARUFEL et al., 2018; CDOT - COLORADO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2011; TXDOT - TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2004), o Método Tilt-up (ABI-NADER, 2009; CARUFEL et al., 2018), em estruturas pós-tensionadas (CARUFEL et al., 2018; SOFI; MENDIS; BAWEJA, 2012), em elementos pré-moldados e pré-fabricados de concreto (CARUFEL et al., 2018; RANZ et al., 2016), em concreto massa (CARUFEL et al., 2018; YIKICI; CHEN, 2015), em concreto projetado (GALOBARDES et al., 2015; SECANELLAS et al., 2019) e principalmente, controle de temperatura (LEE et al., 2016; RANZ et al., 2016).

Em síntese, o método da maturidade é empregado como um método de ensaio não destrutivo para o campo da construção civil, dado o fato da possibilidade de estimar a resistência do concreto *in loco* em tempo real e de forma contínua, na qual se baseia no histórico de temperatura do elemento, permitindo um melhor acompanhamento de sua temperatura interna. Assim sendo, torna-se necessário fomentar iniciativas brasileiras de aplicação do método da maturidade do concreto em campo com o intuito de promover uma melhor gestão da qualidade do concreto *in loco* e antecipar a liberação de frentes de serviço.

Ao longo dos anos, diversas funções foram propostas com o intuito de apresentar melhor correlação entre o índice maturidade e a resistência à compressão do concreto. Dentre as equações que obtiveram melhores resultados e popularidade no meio acadêmico, destacam-se as funções elaboradas por: Nurse-Saul (Fator Tempo Temperatura), Guo, Freiesleben Hansen e Pedersen (Função Arrhenius), Rastrup, Weaver e Sadgrove, Fib Model Code, De Vree e Tegelaar (Função Maturidade Ponderada), e recentemente por Soutsos e Kanavaris (Função Modificada de Nurse-Saul) (MILLER; HO; TALEBIAN, 2022; SAUL, 1951; SOUTSOS; KANAVARIS; HATZITHEODOROU, 2018; SOUTSOS; KANAVARIS, 2018; SOUTSOS; KANAVARIS; ELSAGEER, 2021). A seguir serão resumidas as avaliações de cada equação conforme as três abordagens do método da maturidade existentes: i. Fator Tempo Temperatura, ii. Idade Equivalente e iii. Maturidade Ponderada.

Iniciando pelas equações englobadas pela abordagem Fator Tempo Temperatura temos a equação proposta por Saul (1) que em 1987 foi normatizada pela ASTM C 1074 e atualmente é uma das equações mais utilizadas devido sua

simplicidade matemática. Saul sugere calcular a maturidade utilizando uma temperatura de referência onde é considerado que nesta temperatura a hidratação do cimento é paralisada, normalmente considerada 0°C. Entretanto, a ASTM C 1074 apresenta a metodologia para determinação do valor da temperatura de referência (T_0).

Saul	Onde:	(1)
$M = \sum_t (T - T_0) \cdot \Delta t$	M: é a maturidade (h-°C) T: é a temperatura média durante o intervalo de tempo Δt (°C); T₀: é a temperatura de referência, Datum (°C); e Δt: é o intervalo de tempo (h).	

Apesar da equação proposta por Saul ser simples e possuir uma abordagem que trabalha mais a favor da segurança, Guo (2) propôs uma modificação na equação original de Saul com o intuito de melhorar a estimativa da resistência à compressão e dirimir possíveis limitações presentes na equação idealizada por Saul.

Guo	Onde:	(2)
$M = \sum_t (T + 10) \cdot (T + 20) \cdot \Delta t$	M: é a maturidade (h-°C) T: é a temperatura média durante o intervalo de tempo Δt (°C); e Δt: é o intervalo de tempo (h).	

Ainda na abordagem Fator Tempo Temperatura, recentemente foi elaborada a equação proposta por Soutsos e Kanavaris (2018) descrita como Função Modificada de Nurse-Saul onde foi proposta a inclusão de etapas de cálculo no método original com o intuito de determinar fatores de aceleração e de eficiência de temperatura para correção de limitações da equação original. Segundo os autores, esta abordagem apresenta maior precisão para estimativa de resistência à compressão tanto nas primeiras idades quanto nas idades a longo prazo.

Em direção a abordagem Idade Equivalente, quatro equações serão avaliadas a seguir. O conceito de idade equivalente foi introduzido por Rastrup (1954) com o intuito de explicar os efeitos da temperatura e do tempo no desenvolvimento da resistência do concreto. Ainda, tal conceito permitiu o desenvolvimento de outras funções baseadas na mesma abordagem que visa explicar tais efeitos. A seguir são apresentadas as respectivas equações e autores: Rastrup (3), Freiesleben Hansen e Pedersen (4), Weaver and Sadgrove (5) e Fib Model Code (6).

Rastrup **Onde:** (3)

$$t_e = \sum 2^{(T-T_r)/10} \cdot \Delta t$$

T: média da temperatura do concreto no intervalo de tempo Δt (K);
T_r: temperatura de referência (°C);
 Δt : é o intervalo de tempo (h).

Freiesleben Hansen e Pedersen **Onde:** (4)

$$t_e = \int_0^t e^{\left[\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right) \right]} dt$$

Ea: Energia aparente de ativação (J/mol);
R: constante universal do gás (J/K.mol);
T_a: média da temperatura do concreto no intervalo de tempo Δt (K);
T_s: temperatura de referência (K)

Weaver and Sadgrove **Onde:** (5)

$$t_e = \sum \left(\frac{T + 16}{T_r + 16} \right)^2 \cdot \Delta t$$

T: temperatura (°C) e;
T_r: temperatura de referência (°C);
 Δt : é o intervalo de tempo (h).

Fib Model Code **Onde:** (6)

$$t_e = \sum \left(\frac{T + 16}{T_r + 16} \right)^2 \cdot \Delta t$$

T: média da temperatura do concreto no intervalo de tempo Δt (K);
T_r: temperatura de referência (°C);
 Δt : é o intervalo de tempo (h).

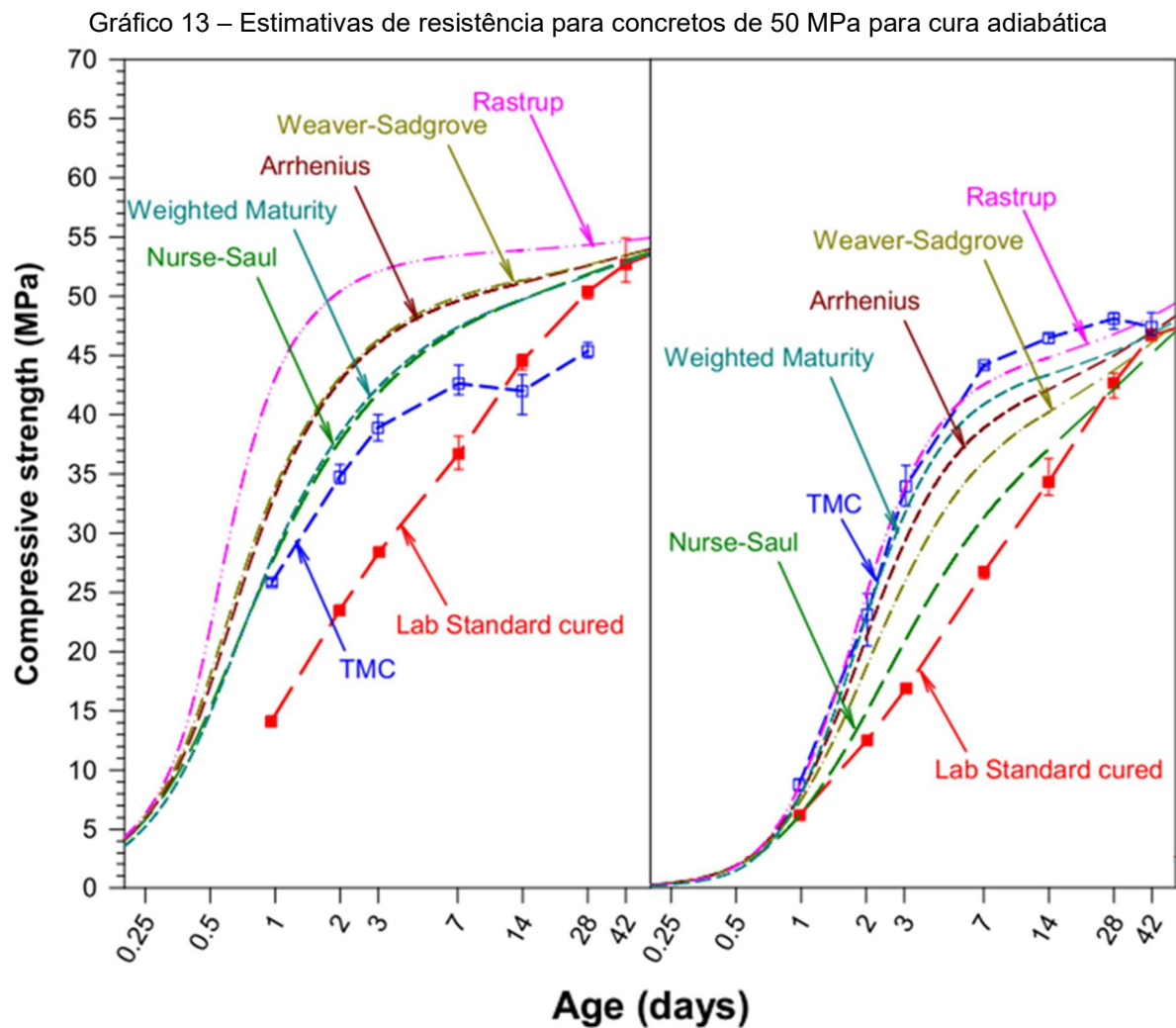
Por fim, a última abordagem tem origem Holandesa onde foi desenvolvida por De Vree e Tegelaar que foi baseada no estudo de Papadakis e Bresson foi intitulada como Maturidade Ponderada (7).

De Vree e Tegelaar **Onde:** (7)

$$Mw = \sum t \cdot T \cdot C^n$$

Mw: maturidade ponderada (°C.h ou °C.dia);
t: idade do concreto (horas ou dias);
T: média da temperatura do concreto no intervalo de tempo Δt (°C);
n: parâmetro dependente da temperatura
C: valor específico do cimento.

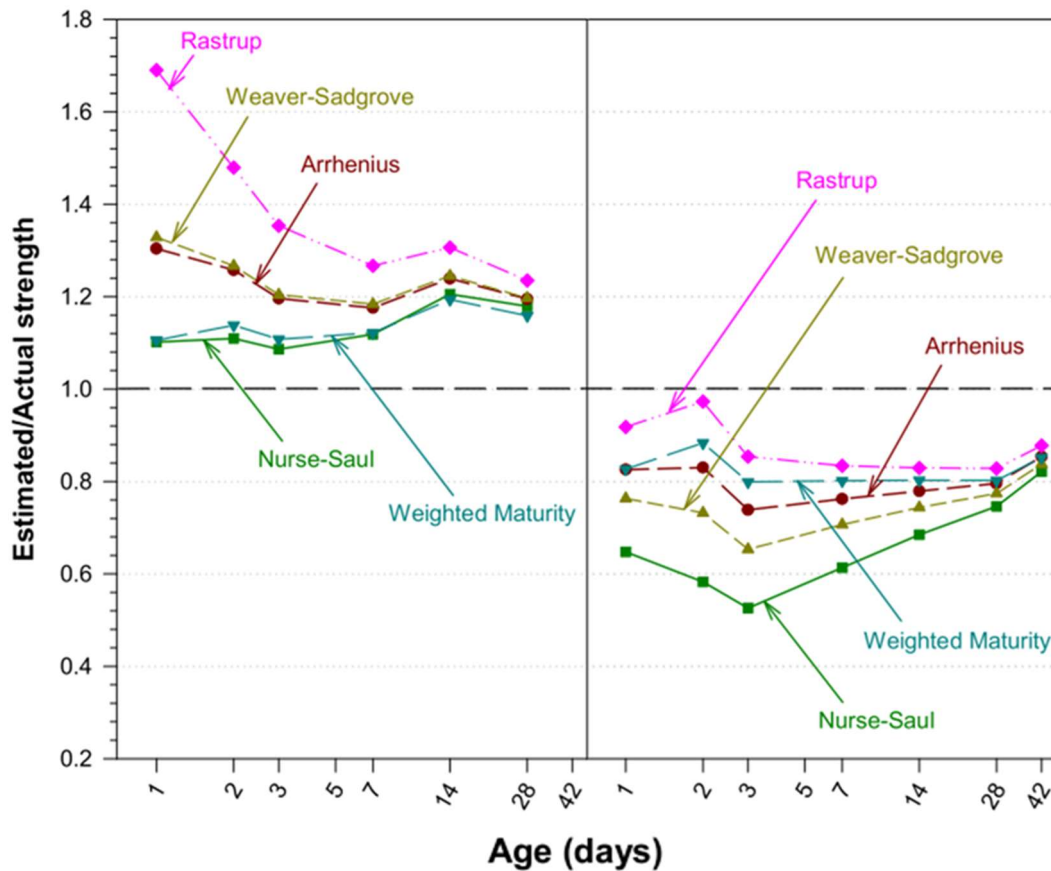
Soutsos, Kanavaris e Hatzitheodorou (2018) realizaram uma análise crítica das estimativas de resistência à compressão das funções de maturidade supramencionadas. O Gráfico 13 apresenta as estimativas de resistência à compressão das equações para dois traços de concreto avaliados na condição de cura adiabática. Devido as diferentes abordagens matemáticas das equações é possível identificar variações na resistência à compressão estimada, principalmente entre o primeiro e sétimo dia. Para maiores idades é possível identificar uma convergência da resistência à compressão estimada para todas as funções utilizadas. A abordagem conhecida como Função Modificada de Nurse-Saul não foi avaliada neste estudo.



FONTE: Adaptado de Soutsos, Kanavaris e Hatzitheodorou (2018)

No Gráfico 14 são apresentadas as relações de resistência à compressão estimada/real para os dois traços avaliados. Para este gráfico se a relação for superior a 1, há uma superestimativa da resistência à compressão e se a relação for inferior a 1, há uma subestimação da resistência à compressão. Sendo assim, quanto mais próxima a relação for de 1, maior será a acurácia da relação. No quesito de segurança no momento da estimativa de resistência à compressão e fornecimento de tomada de decisão por parte dos *stakeholders*, o método Nurse-Saul se apresenta como o mais conservador dos métodos avaliados. Entretanto, para o traço em que foi utilizado escória de alto forno, o método Nurse-Saul apresentou subestimação da resistência à compressão. Neste âmbito, surgem oportunidades de pesquisas futuras para combinação de métodos não destrutivos para estimativa da resistência à compressão.

Gráfico 14 – Relação entre as resistências estimadas e reais para cura adiabática



a) Cimento Portland

b) Escória de alto forno

FONTE: Adaptado de Soutsos, Kanavaris e Hatzitheodorou (2018)

Conforme observado, devido a influências externas que podem prejudicar a estimativa de resistência à compressão do concreto, há um grande esforço em determinar parâmetros que promovam uma maior acurácia da estimativa (SOUTSOS et al., 2016; SOUTSOS; KANAVARIS, 2018; UTEPOV et al., 2019). Dentre algumas destas influências, destaca-se o clima predominante do Brasil e a alta taxa de incidência solar, podendo promover um aumento significativo na temperatura do concreto e por consequência alterando o índice da maturidade para o instante t, uma vez que a temperatura do concreto é igual a temperatura proveniente da reação de hidratação do cimento e a temperatura proveniente da incidência solar. Neste âmbito, equações que visam dirimir estas influências apresentam grande potencial de aplicação em ambientes que possuem a temperatura ambiente elevada.

Quanto à normatização do ensaio para a medição da maturidade do concreto e respectiva estimativa da resistência à compressão, atualmente o Brasil não possui uma norma técnica específica para o método. Entretanto, recentemente foi publicada

a atualização da norma NBR 16055: Parede de Concreto Moldada no Local para a Construção de Edificações – Requisitos e Procedimento (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022) que na seção 19.9.3 possibilita o uso do método da maturidade para controle de aceitação do concreto no estado endurecido e da desforma, em conformidade com a ASTM C1074. A Tabela 6 apresenta algumas normas vigentes das quais podem ser elencadas: Chile, Colômbia, Guatemala, México, Holanda, Peru e Estados Unidos.

Tabela 6 – Normas para execução do método da maturidade

País	Norma	Descrição
Chile	NCh3565	Hormigón - Estimación de la resistencia mecánica - Método de la madurez
Colômbia	NTC3756	Procedimiento para Estimar La Resistencia Del Concreto Por El Metodo de La Madurez
Estados Unidos da América	AASHTO T 325	Standard Method of Test for Estimating the Strength of Concrete in Transportation Construction by Maturity Tests
Estados Unidos da América	ASTM C1074	Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method
Guatemala	NTG41042	Práctica para la estimación de la resistencia del concreto por el método de la madurez.
Holanda	NEN 5970	Determination of Strength of Fresh Concrete with the Method of Weighted Maturity
México	NMX-C-219-ONNCCE-2005	Industria de la Construcción - Concreto - Resistencia a la Compresión a Edades Tempranas y Predicción de la Misma a Edades Posteriores - Método de Prueba
Peru	NTP339.217	Concreto. Método de ensayo normalizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez

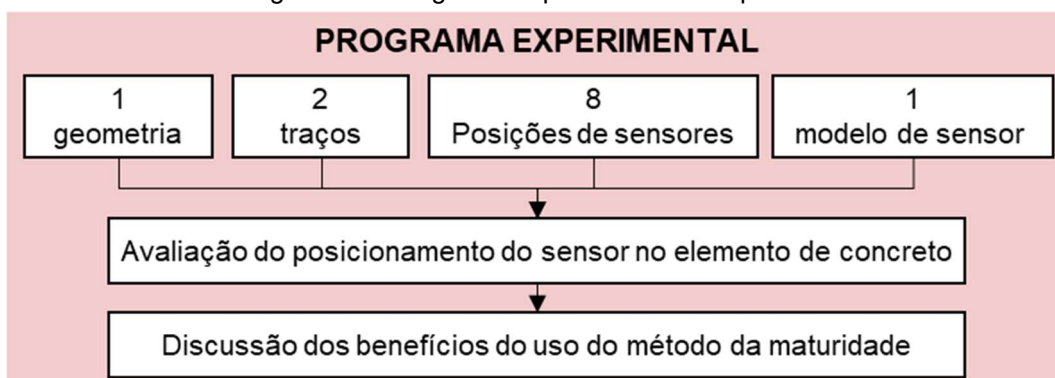
FONTE: O Autor

Além das normas técnicas vigentes, foram publicados manuais e recomendações técnicas quanto a execução do método da maturidade, podendo ser elencado o *American Concrete Institute (ACI)* e o *Department of Transportation (DOT)* que aceitam o método da maturidade como teste apto para estimativa de resistência à compressão e principalmente para liberação de tráfego e cura do concreto. Entretanto atualmente não são estabelecidos os requisitos de desempenho dos dispositivos utilizados para a medição do histórico de temperatura e estimativa de resistência através do método da maturidade. Neste âmbito, existe uma ampla variedade sensores disponíveis no mercado (Apêndice B).

3.1 Programa Experimental

O programa experimental é realizado em etapa única (Figura 13).

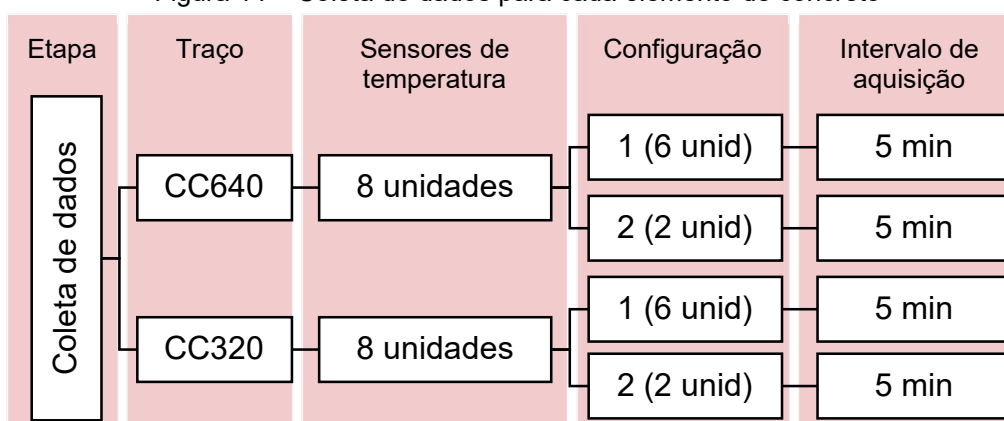
Figura 13 – Programa experimental do capítulo 3



FONTE: O Autor

A avaliação do posicionamento do sensor de temperatura no elemento de concreto é realizada a partir da utilização de 8 sensores distribuídos em posições pré-definidas no elemento. Para o presente programa experimental foram utilizados dois traços de concreto (CC640 e CC320). O intervalo de aquisição de dados dos sensores foi a cada 5 minutos por 84 dias, totalizando 24.192 medições. A avaliação foi realizada em dois traços de concreto, sendo assim, foram realizadas ao todo 48.384 medições. A Figura 14 ilustra a configuração de sensores utilizados e a frequência de aquisição de dados.

Figura 14 – Coleta de dados para cada elemento de concreto



FONTE: O Autor

Em seguida é feito o tratamento e análise dos dados coletados no programa experimental. Sendo assim, são discutidos os benefícios do uso do método da maturidade em relação aos resultados de resistência à compressão obtidos através

da ruptura dos corpos de prova. A discussão dos benefícios focará principalmente na otimização de cronograma devido ao monitoramento contínuo do elemento de concreto.

As leituras de temperatura foram realizadas por um microcontrolador embarcado com sensor temperatura. A seleção e avaliação da confiabilidade na aquisição de dados de temperatura foi realizada e discutida no Apêndice A.

3.1.1 Materiais

A Tabela 7 apresenta as especificações do microcontrolador utilizado para o monitoramento em tempo real da temperatura. Os dispositivos IoT foram protegidos por meio de caixas plásticas e encapsulados com resina epoxídica própria para circuitos eletrônicos com o objetivo de serem aplicados em ambientes com necessidade de resistência à impactos, submersão em água e poeira. Todos os hardwares contaram com porta e cabos USB compatíveis para transmissão de dados e de energia, assim a alimentação dos microcontroladores é feita via fonte de energia portátil.

Tabela 7 – Resumo das especificações do microcontrolador

Itens	Unidades	Especificações
Dimensões do módulo	mm	34 x 26 x 7
Modos de operação	-	STA/AP/STA+AP
Wi-Fi	-	IEEE 802.11 b/g/n
Tensão de operação	V	2,58 ~ 3,60
Portas GPIO	Unidades	11
Corrente de consumo	mA	68
Taxa de transferência	bps	110-460800
Antena	-	Antena Externa (Molex 1558-1610MHZ GNSS Flex Antenna)
Conector micro-usb	-	Sim
Fonte de energia	-	Portátil

FONTE: O Autor

A Tabela 8 apresenta as especificações do sensor de temperatura utilizado.

Tabela 8 – Resumo das especificações do sensor de temperatura

Itens	Unidades	Especificações
Tipo	-	Sensor digital
Tensão de operação	V	3,0 até 5,5
Faixa de leitura	°C	-55 até 125
Acurácia entre -10°C e +85°C	°C	±0,5
Resolução programável	Bits	9 até 12
Resolução	°C	0,5 até 0,0625

FONTE: Dallas (2022)

Foram utilizados dois traços de concreto para análise do presente estudo (CC640 e CC320). Sua formulação foi contemplada de forma a se obter um traço com maior consumo de cimento e por consequência maior liberação de calor (CC640) e um traço com menor consumo de cimento e por consequência menor liberação de calor (CC320). Os consumos unitários de materiais dos dois traços de concreto avaliados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Traços de concreto

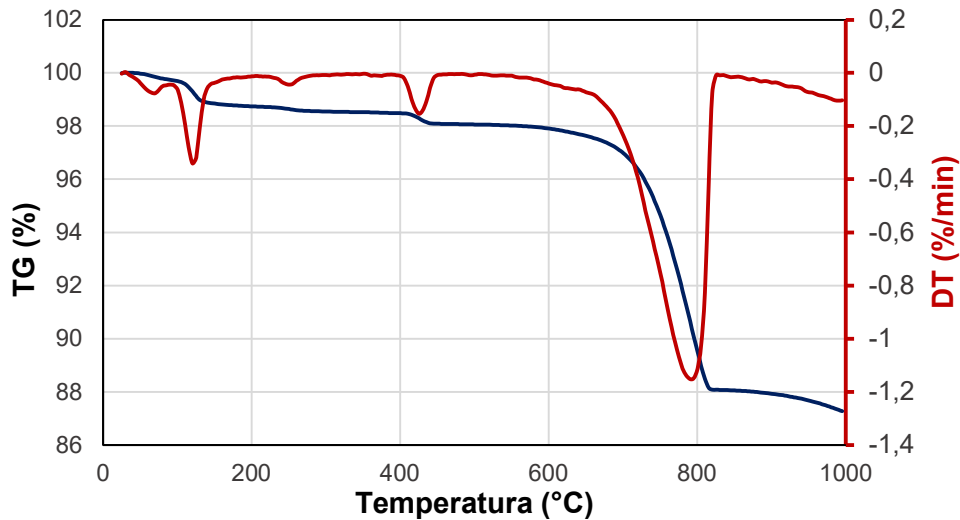
Material	CC640	CC320
Cimento Portland (kg/m ³)	649,75	320,67
Areia (kg/m ³)	649,75	737,54
Brita (kg/m ³)	649,75	962,01
Água (kg/m ³)	297,58	256,92
Relação água/cimento (a/c)	0,458	0,801
Slump (mm)	145	110
fck (MPa)	40,5	19,0

FONTE: O Autor

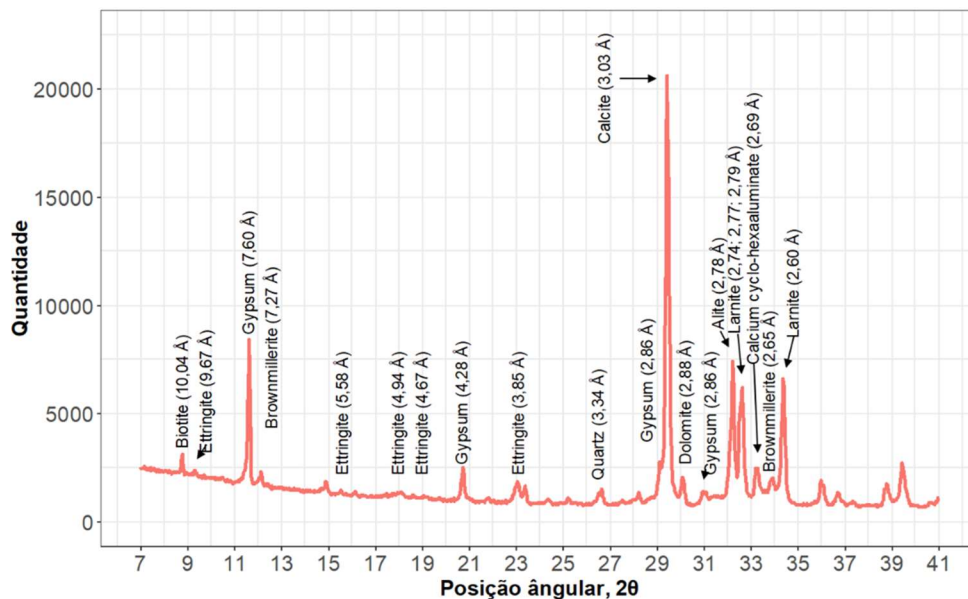
Para a formulação dos dois traços de concreto avaliado no presente capítulo foram utilizados o Cimento Portland CII-F-32 em conformidade com os requisitos da NBR 7215, a areia média lavada como agregado miúdo, a brita 1 como agregado graúdo e água. Para os traços avaliados não foi utilizado nenhum tipo de aditivo ou adição.

No Gráfico 15 são apresentados os resultados da caracterização do CPII-F-32 a partir de TG (Termogravimetria), DT (Termogravimetria derivada) e DRX (Difração de Raio-X).

Gráfico 15 – (a) análise térmica TG e DTG; e (b) difratograma de raios-x do CPII-F-32



(a)

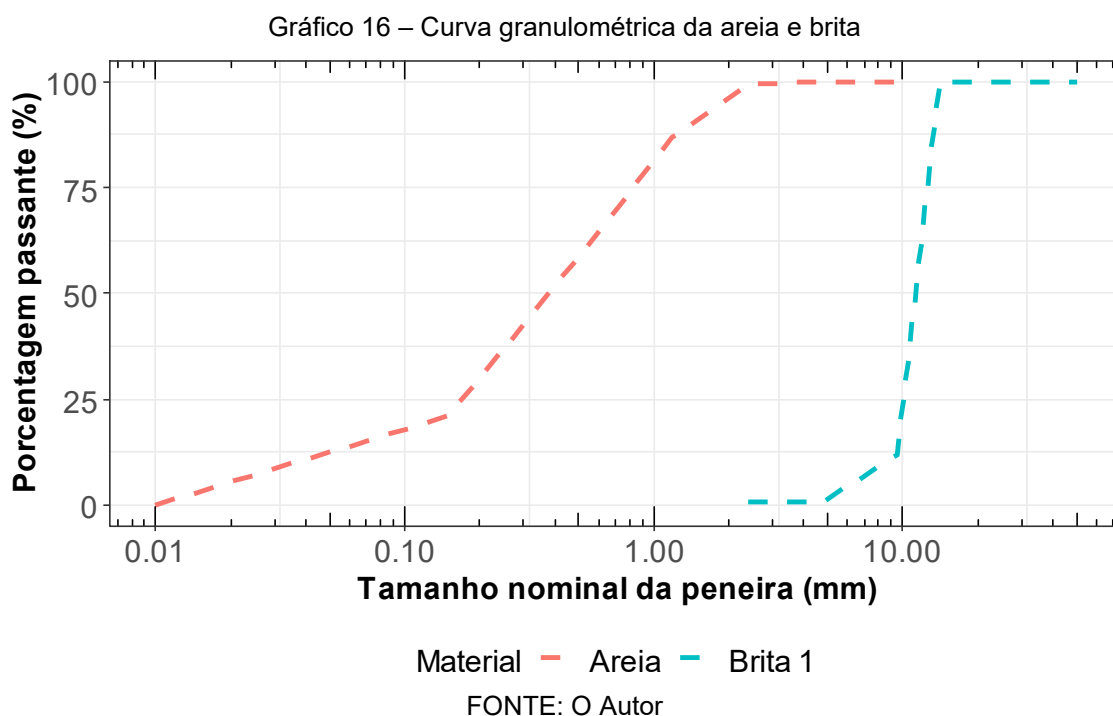


(b)

FONTE: O Autor

Como agregado miúdo foi utilizada areia média lavada de rio com massa específica igual a 2,64 g/cm³, diâmetro máximo característico de 2,36 mm e módulo de finura 2,86. Como agregado graúdo foi utilizado brita 1 com massa específica na condição saturada superfície seca igual a 2,61 g/cm³, massa específica aparente igual a 2,65 g/cm³, diâmetro máximo característico de 9,52 mm e módulo de finura 5,86. As

curvas de classificação granulométrica dos agregados miúdo e graúdo são apresentadas no Gráfico 16



Com relação a geometria dos elementos de concreto moldados e monitorados via dispositivo IoT, foi selecionada a geometria de um prisma de concreto com dimensões iguais à (700x700x300) mm em forma de madeira em compensado naval (Figura 15).

Figura 15 – Forma de madeira utilizada para cada traço de concreto (700 x 700 x 300 mm)



FONTE: O Autor

3.1.2 Métodos

Para determinação do índice maturidade, foi utilizado o método da maturidade conhecido como Nurse-Saul, fator tempo temperatura (FTT), sendo este o primeiro e o mais utilizado método para determinação do índice da maturidade (CURRA et al., 2021; MILLER; HO; TALEBIAN, 2022; SERAFINI et al., 2020; SOUTSOS; KANAVARIS; HATZITHEODOROU, 2018; SOUTSOS; KANAVARIS; ELSAGEER, 2021). Foram seguidas todas as recomendações da norma internacional ASTM C 1074 (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2019) para calibração e validação da maturidade do concreto (relação entre o índice maturidade com a resistência à compressão) para os dois traços avaliados. A Tabela 10 apresenta as equações de maturidade x resistência à compressão obtidas na calibração bem como seu respectivo R² ajustado. O detalhamento do procedimento de calibração do método da maturidade para os traços de concreto é apresentado no Apêndice C.

Tabela 10 – Equações Maturidade X Resistência à Compressão e R² ajustado

Traço	Equação	R ² ajustado
CC640	$f(M) = -34,84705 + 7,610732 \cdot \ln(M)$	0,9646
CC320	$f(M) = -11,56427 + 3,30781 \cdot \ln(M)$	0,9700

FONTE: O Autor

Para avaliação da posição dos sensores de temperatura no elemento de concreto, dois elementos de concreto nas dimensões de (700x700x300) mm foram moldados e monitorados continuamente por 84 dias com dois setups de dispositivo IoT (um dispositivo com o *setup* 1 e dois dispositivos com o *setup* 2). O primeiro setup possui um microcontrolador com seis sensores de temperatura e o segundo um microcontrolador com apenas um sensor de temperatura e uma antena adesiva (Figura 16). O setup 2 foi idealizado de forma a complementar o capítulo 2 do presente trabalho, uma vez que o dispositivo foi preparado para ser inserido dentro do concreto a uma espessura da superfície de 8,75 cm e transferir os dados de temperatura via Wi-Fi para o servidor em nuvem. No total cada elemento de concreto foi monitorado por 8 sensores de temperatura (6 sensores do *setup* 1 e 2 sensores do *setup* 2).

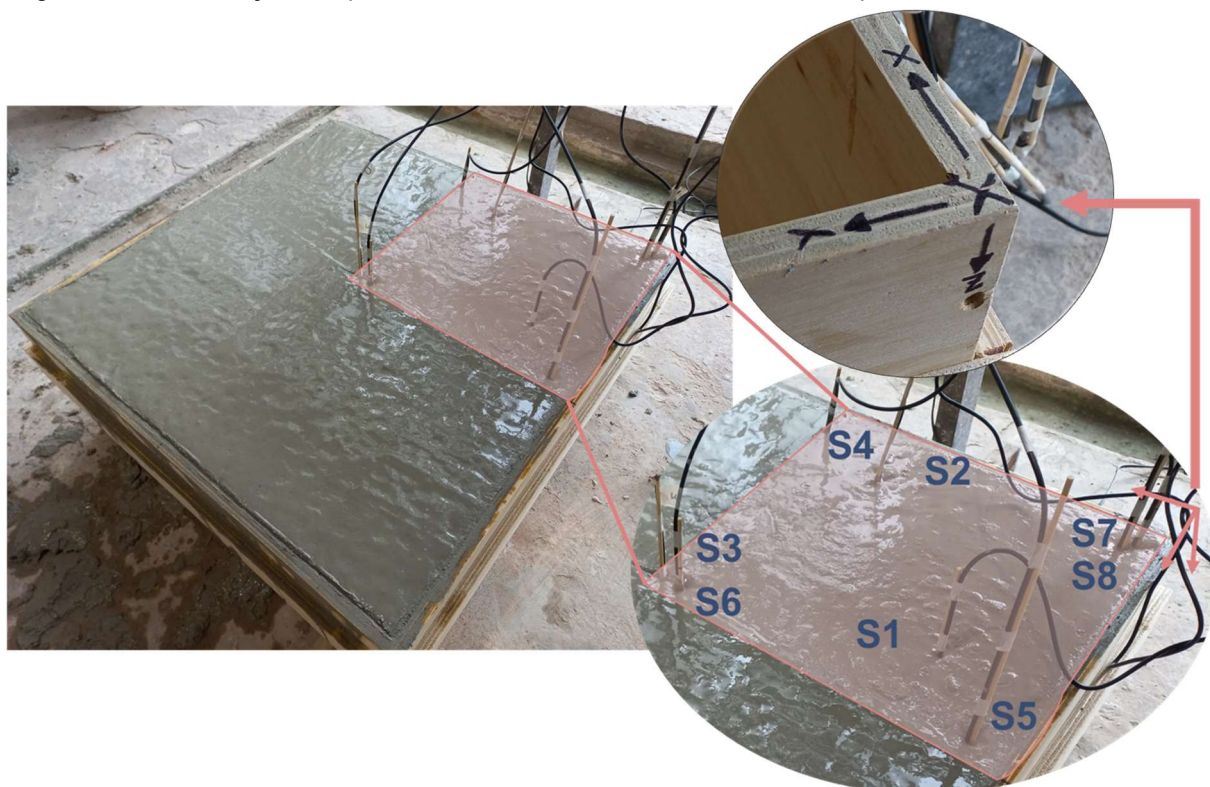
Figura 16 – (a) setup do dispositivo 1 e (b) setup do dispositivo 2

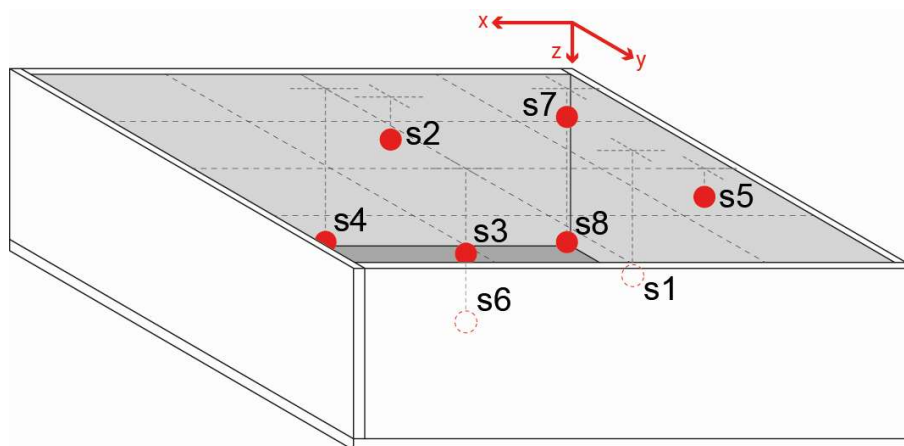


FONTE: O Autor

A Figura 17 ilustra o posicionamento dos 8 sensores de temperatura no elemento no concreto (uma unidade com seis sensores do *setup* 1 e duas unidades com um sensor cada do *setup* 2). Os sensores foram posicionados em apenas $\frac{1}{4}$ do elemento de concreto. Os outros $\frac{3}{4}$ não foram monitorados, entretanto devido a simetria do elemento, pode-se dizer que os dados obtidos para um quadrante do elemento podem ser replicados para os demais quadrantes. A Tabela 11 apresenta o posicionamento exato dos sensores de temperatura.

Figura 17 – Delimitação do quadrante delimitado ao sensoriamento e o posicionamento dos sensores





FONTE: O Autor

Tabela 11 – Posicionamento dos sensores em relação ao eixo de referência

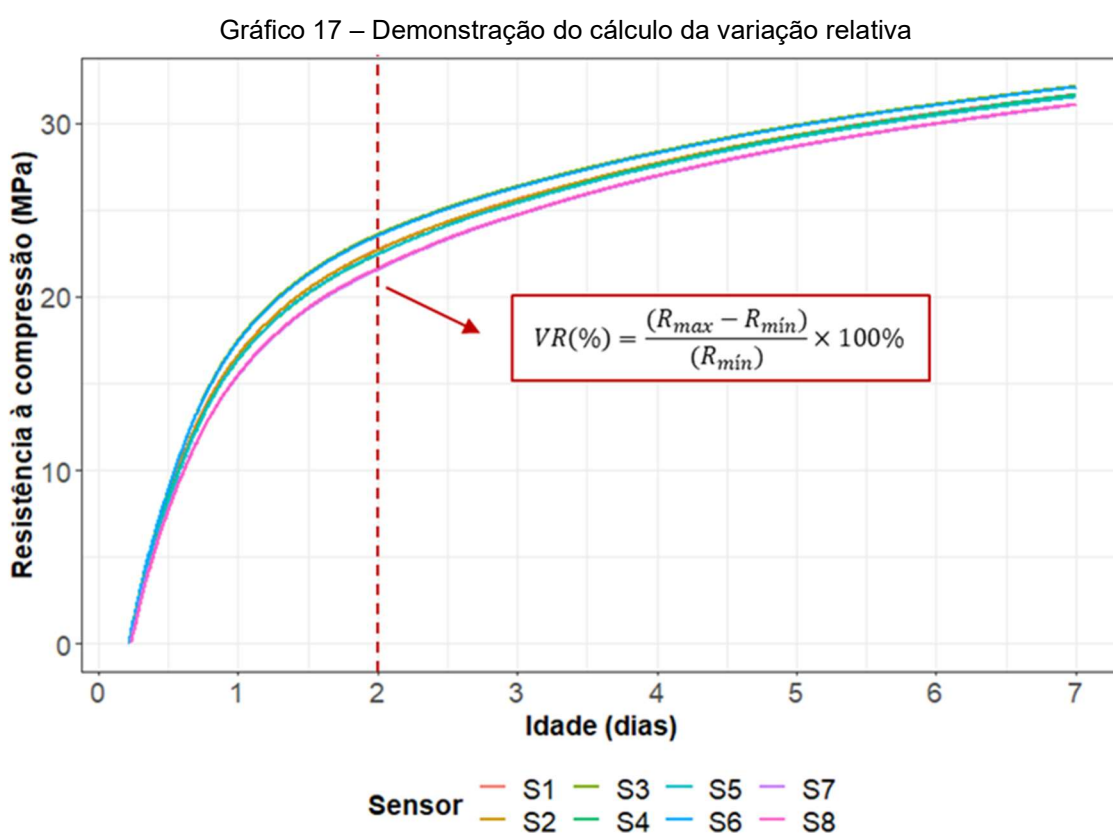
Sensor	Setup	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
S1	2	8,75	26,25	22,50
S2	2	26,25	8,75	7,50
S3	1	35,00	35,00	15,00
S4	1	35,00	5,00	27,00
S5	1	5,00	35,00	5,00
S6	1	35,00	35,00	27,00
S7	1	5,00	5,00	27,00
S8	1	5,00	5,00	5,00

FONTE: O Autor

O presente programa experimental visa compreender se a posição do sensor no elemento de concreto influencia significativamente a resistência à compressão estimada pelo método da maturidade. Posto isto, é proposto um posicionamento fixo de sensores em pontos estratégicos do elemento de concreto para avaliar a possibilidade da utilização de posicionamento aleatório dos sensores. Sendo assim, os 8 sensores de temperatura utilizados foram posicionados de forma a coletar valores de temperatura que representem o perfil de hidratação do elemento de concreto, incluindo sensores no centro e nas extremidades do elemento.

A metodologia utilizada para análise dos resultados inicia-se pela apresentação do histórico de temperatura dos 8 sensores para cada traço de concreto (CC640 e CC320). Após o monitoramento contínuo da temperatura pelos 84 dias e determinadas as 8 curvas de resistência à compressão estimada a partir das funções maturidades obtidas é realizado o cálculo das variações relativas de resistência à compressão estimada para as idades de 1, 3, 7, 14, 28, 56 e 84 dias. O Gráfico 17

apresenta o método utilizado para o cálculo da variação relativa onde para a idade de interesse foram utilizados o maior e o menor valor de resistência à compressão estimada. As análises das variações relativas encontradas para as idades supramencionadas são percorridas a partir de representações gráficas (linhas) e de tabelas. Na identificação de que os valores de variação relativa (%) são baixos, é proposto o agrupamento de todos os resultados de resistência estimada e a elaboração de uma curva de resistência estimada média que represente a evolução de resistência do elemento de concreto como um todo.

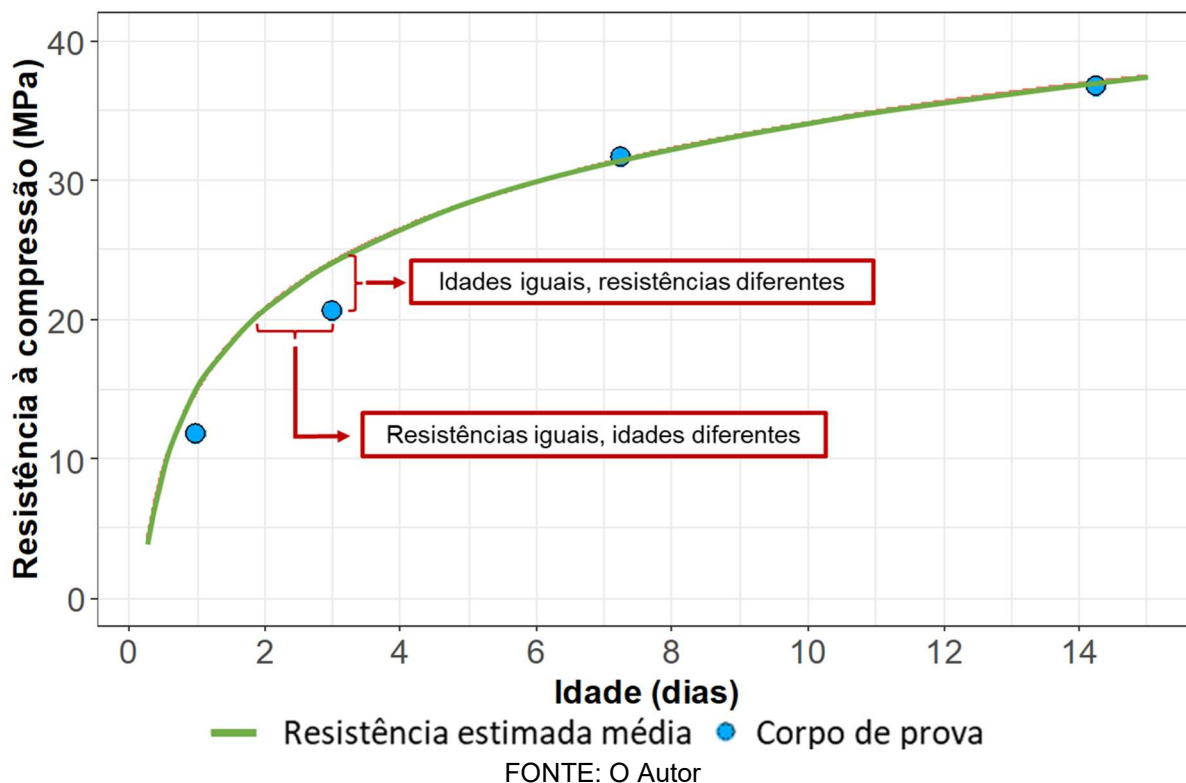


FONTE: Autor

Em seguida a partir das curvas de resistência estimada média obtidas para os traços CC640 e CC320 e dos resultados de resistência à compressão obtidos com base na ruptura de corpos de prova conforme a NBR 12655 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) são avaliadas as variações de idade para uma mesma resistência e as variações de resistência para uma mesma idade (Gráfico 18). As análises são realizadas a partir de representações gráficas de dispersão e tabelas, com o intuito de discutir otimizações de cronograma e tomadas

de decisão, principalmente para os primeiros dias de hidratação do concreto (idade \leq 15 dias).

Gráfico 18 – Variações de idade e resistência à compressão entre o corpo de prova e a resistência estimada média através do método da maturidade



3.2 Apresentação e Análise de Resultados

Os Gráficos 19 e 20 apresentam o histórico de temperatura dos 3 primeiros dias do total de 84 dias de monitoramento a partir dos dispositivos IoT instalados nos dois elementos de concreto (traço CC640 e traço CC320). Os gráficos apresentam a variação de temperatura nas primeiras idades em que o maior valor de temperatura do traço CC640 atinge 59°C e do traço CC320 atinge apenas 46°C. Após os três primeiros dias há uma variação cíclica da temperatura dos elementos de concreto devido a variação da temperatura ambiente. Em posse do histórico de temperatura é possível determinar o índice de maturidade para cada curva de temperatura e por consequência, as respectivas curvas de maturidade.

Gráfico 19 – Histórico de temperatura do elemento de concreto para os três primeiros dias (traço CC640)

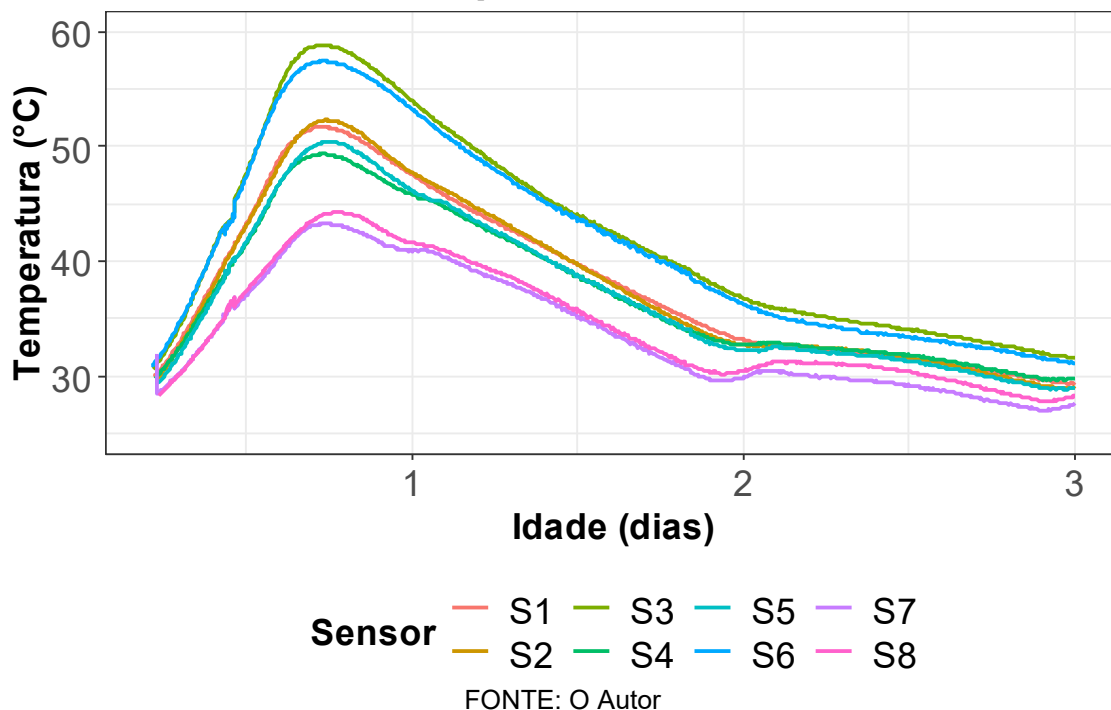
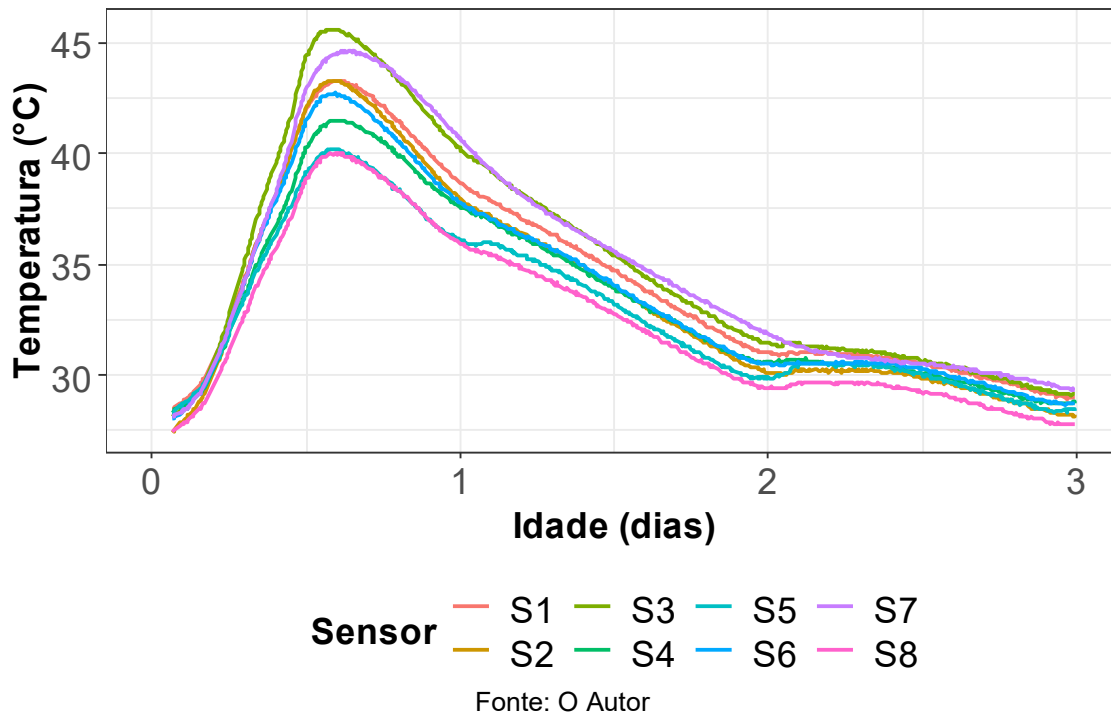


Gráfico 20 – Histórico de temperatura do elemento de concreto para os três primeiros dias (traço CC320)



Os Gráficos 21 e 22 apresentam as 8 curvas de resistência estimada a partir das funções maturidade obtidas na etapa de calibração (Tabela 10). Para avaliação do posicionamento dos dispositivos IoT de forma aleatória no elemento de avaliação, é avaliada a variação relativa máxima entre os valores de resistência à compressão

ao longo dos dias monitorados. Sendo assim, as Tabelas 12 e 13 apresentam os valores de variação relativa máxima para os traços CC640 e CC320 nas idades de 1, 3, 7, 14, 28, 56 e 84 dias.

Gráfico 21 – Resistência à compressão estimada para os 8 sensores (traço CC640)

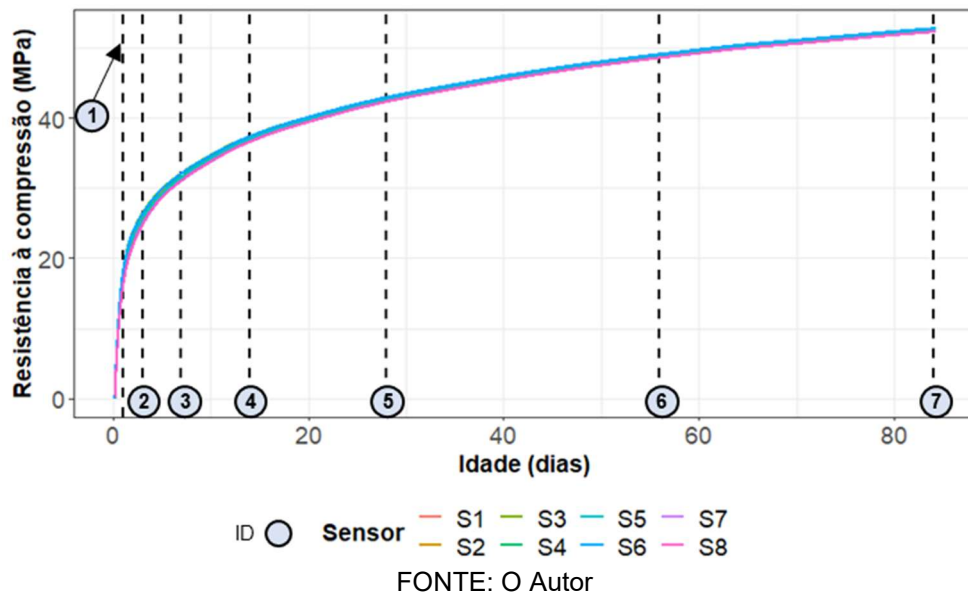
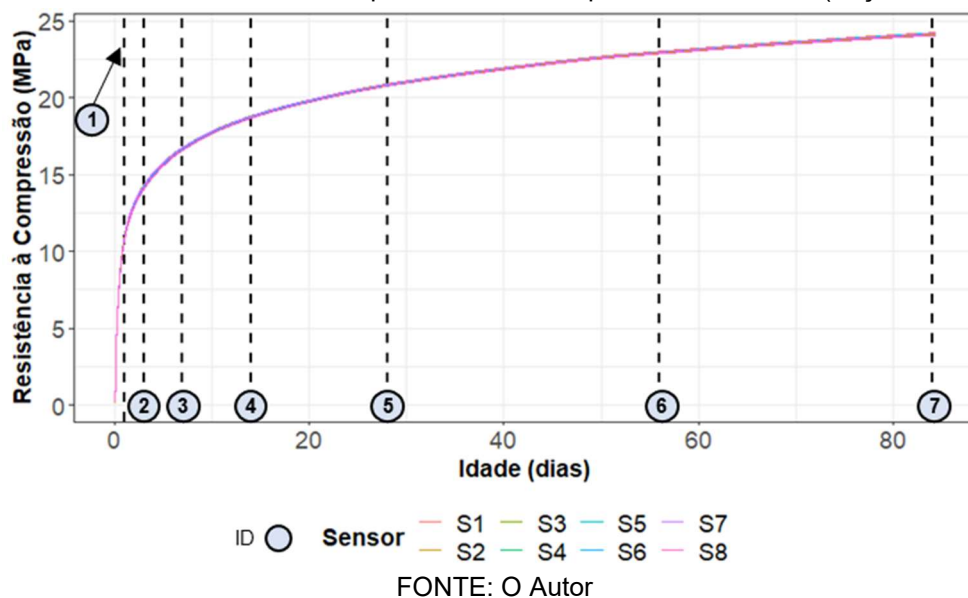


Gráfico 22 – Resistência à compressão estimada para os 8 sensores (traço CC320)



Para o traço CC640 por apresentar maior calor de hidratação e por consequência maior gradiente térmico, é possível verificar maiores valores de variação relativa, principalmente nas primeiras horas de hidratação (Tabela 12). Para a primeira idade de avaliação (1 dia) foi verificado 13% de variação relativa máxima sendo este um valor mais expressivo do que em relação as idades superiores, entretanto a variação dos valores de resistência máxima e mínima é de

aproximadamente 2 MPa, sendo este um valor baixo. Já para idades superiores a 3 dias já é possível identificar valores relativos inferiores a 7% até que a partir dos 28 dias, é possível identificar uma variação relativa inferior a 2%.

Para o traço CC320 por apresentar menor calor de hidratação e por consequência menor gradiente térmico, as variações relativas são inferiores a 4% desde o início do processo de ganho de resistência mecânica (Tabela 13). Desta forma não apresentando uma variação significativa no ganho de resistência ao longo do volume do elemento de concreto.

Tabela 12 – Valores de resistência relativa para o traço CC640

ID	Idade (dias)	Resist. máx. (MPa)	Resist. min. (MPa)	Varição Relativa (%)
1	1	17,54	15,50	13,14
2	3	26,37	24,69	6,80
3	7	32,12	31,04	3,47
4	14	37,35	36,56	2,15
5	28	42,93	42,30	1,50
6	56	49,09	48,56	1,09
7	84	52,77	52,27	0,95

FONTE: O Autor

Tabela 13 – Valores de resistência relativa para o traço CC320

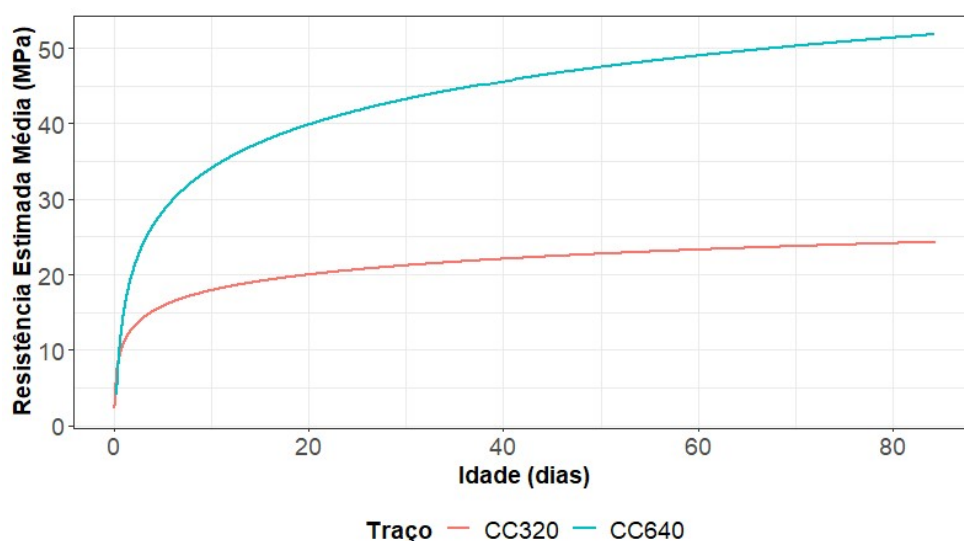
ID	Idade (dias)	Resist. máx. (MPa)	Resist. min. (MPa)	Varição Relativa (%)
1	1	11,06	10,74	3,04
2	3	14,33	14,07	1,86
3	7	16,79	16,60	1,14
4	14	18,82	18,67	0,82
5	28	20,91	20,76	0,70
6	56	23,03	22,87	0,72
7	84	24,24	24,06	0,77

FONTE: O Autor

Uma vez considerado que para o elemento de concreto avaliado o posicionamento dos sensores no interior do concreto não exerce influências significativas na estimativa de resistência à compressão ao longo da sua evolução de resistência foi determinada uma curva de resistência estimada média a partir dos 8 sensores posicionados dentro do elemento de concreto para os traços CC640 e CC320. Esta curva apresenta a evolução da curva de resistência estimada média do elemento de concreto ao longo dos 84 dias de avaliação conforme estabelecido na

metodologia. A utilização desta abordagem se torna mais representativa para o elemento uma vez que não apresenta os maiores valores de resistência devido ao sensor que mediu maiores valores de temperatura (S3) quanto não apresenta os menores valores de resistência devido ao sensor que mediu os menores valores de temperatura (S8). O Gráfico 23 apresenta as curvas de resistência à compressão estimada média dos dois traços avaliados (CC640 e CC320).

Gráfico 23 – Resistência à compressão média estimada dos traços CC640 e CC320



FONTE: O Autor

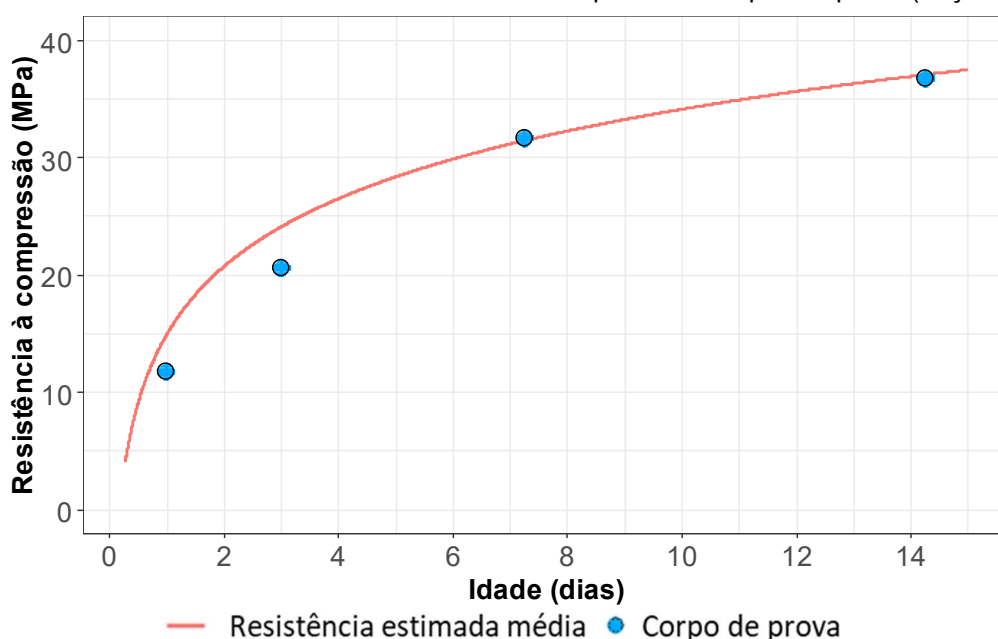
Atualmente é muito comum a prática de engenharia em realizar rupturas de corpos de prova com 3, 7 e 28 dias para tomadas de decisão como desforma, retirada de escoramento, protensão, aprovação do lote conforme NBR 12655 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) e entre outras formas de aplicação (CURRA et al., 2021; GIATEC SCIENTIFIC INC, 2022; RAO et al., 2022). Neste âmbito, os *stakeholders* possuem informações pontuais acerca da resistência à compressão do concreto, sendo necessário aguardar a próxima data de ruptura para obter uma nova informação. Ainda, a identificação do atendimento da resistência à compressão especificada em projeto fica restrita a ruptura dos corpos de prova com idade de 28 dias, não sendo possível ter claro o atendimento da resistência antes de sua ruptura. Com o uso de dispositivos IoT para monitoramento contínuo da evolução de resistência do concreto é possível fornecer aos *stakeholders* informações em tempo real para auxiliar as tomadas de decisão e ainda detectar eventuais inconveniências como o não atingimento da resistência à compressão desejada.

Os Gráficos 24 e 25 apresentam a curva de resistência à compressão estimada média do elemento e a resistência à compressão obtida com a ruptura dos corpos de prova com base na NBR 12655. Os gráficos apresentam a evolução de resistência dos 15 primeiros dias uma vez que são as idades de interesse dos *stakeholders* para tomada de decisão.

Para o traço CC640 (Gráfico 24) é possível identificar que com base na curva de evolução da resistência estimada média a resistência do elemento de concreto é potencialmente superior ao dos corpos de prova, principalmente nas idades de 1 e 3 dias. Para as idades de 7 e 14 dias a resistência à compressão estimada é aproximadamente a mesma que a resistência obtida através da ruptura do corpo de prova.

A Tabela 14 apresenta a variação de idade para uma mesma resistência (variação no eixo x entre a curva de resistência média estimada e o resultado proveniente da ruptura do corpo de prova). Para as idades de 1, 3 e 14 dias é possível identificar que a resistência estimada média atingiu a mesma resistência obtida através da ruptura do corpo de prova em menos tempo, para os seguintes casos, 7,4, 25,2 e 13,5 horas de antecipação em relação a idade do corpo de prova, respectivamente. Para a idade de 7 dias, a resistência média estimada atrasou em 3 horas em relação a mesma resistência obtida através da ruptura do corpo de prova.

Gráfico 24 – Curva de resistência estimada média x Rupturas de corpos de prova (traço CC640)



FONTE: O Autor

Tabela 14 – Variação de idades para uma mesma resistência à compressão (Traço CC640)

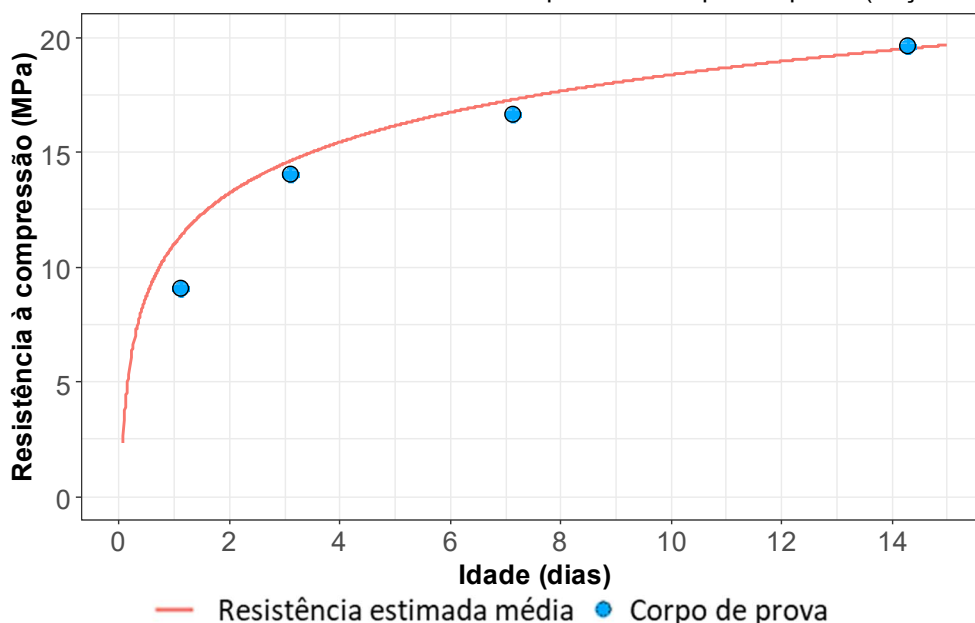
Resistência (MPa)	Idade Corpo de prova	Idade Resistência estimada média	Variação
11,8	23,7 horas	16,3 horas	-7,4 horas
20,5	3 dias	1 dia e 22,8 horas	-25,2 horas
31,6	7 dias e 6 horas	7 dias e 9 horas	+3 horas
36,7	14 dias e 6 horas	13 dias e 16,5 horas	-13,5 horas

FONTE: O Autor

Para o traço CC320 (Gráfico 25) é possível identificar que com base na curva de evolução da resistência estimada média a resistência do elemento de concreto também é potencialmente superior ao dos corpos de prova, principalmente nas idades de 1, 3 e 7 dias. Para a idade de 14 dias a resistência à compressão estimada é muito próxima da resistência obtida através da ruptura do corpo de prova.

A Tabela 15 apresenta a variação de idade para uma mesma resistência (variação no eixo x entre a curva de resistência média estimada e o resultado proveniente da ruptura do corpo de prova). Para as idades de 1, 3 e 7 dias é possível identificar que a resistência estimada média atingiu a mesma resistência obtida através da ruptura do corpo de prova em menos tempo, para os seguintes casos, 13,7, 14 e 33 horas de antecipação em relação a idade do corpo de prova, respectivamente. Para a idade de 14 dias, a resistência média estimada atrasou em 6 horas em relação a mesma resistência obtida através da ruptura do corpo de prova.

Gráfico 25 – Curva de resistência estimada média x Rupturas de corpos de prova (traço CC320)



FONTE: O Autor

Tabela 15 – Variação de idades para uma mesma resistência à compressão (Traço CC320)

Resistência (MPa)	Idade Corpo de prova	Idade Resistência estimada média	Variação
9	27 horas	13,2 horas	-13,7 horas
14	3 dias e 3 horas	2 dias e 13 horas	-14 horas
16,6	7 dias e 3 horas	5 dias e 18 horas	-33 horas
19,6	14 dias e 7 horas	14 dias e 13 horas	+6 horas

FONTE: O Autor

Os gráficos e tabelas supracitados comprovam e corroboram o que tem sido estudado acerca do uso do método da maturidade, principalmente quando utilizado concomitantemente com o uso de dispositivos IoT (GIATEC SCIENTIFIC INC, 2022; MILLER; HO; TALEBIAN, 2022; UTEPOV et al., 2019). Para o traço CC640 (Gráfico 24 e Tabela 14), com o uso do monitoramento contínuo das propriedades do concreto foi identificado que nos primeiros 7 dias resistências de potencial interesse para os *stakeholders* como por exemplo 20 MPa em aproximadamente 2 dias, 25 MPa em aproximadamente 3 dias e 30 MPa com 6 dias. Para o traço CC320 (Gráfico 25 e Tabela 15) por possuir um fck menor, pode ser que não existam datas de interesse em idades inferiores a 14 dias como para o caso do traço CC640, porém foram obtidos resultados até melhores de economia de tempo necessário para o elemento de concreto atingir a mesma resistência à compressão que foi observada através da ruptura dos corpos de prova.

Os benefícios quanto a informação da evolução de resistência do concreto em tempo real possibilita a otimização de diversas frentes de serviços em uma obra. Dentre as empresas internacionais que comercializam dispositivos IoT embarcados com o método da maturidade, destacam-se estudos de caso em seus sites em que foram reduzidos ciclos de protensão, redução em ciclos de desforma e ainda a adição e remoção de mantas térmicas com o intuito de controlar a temperatura do elemento de concreto. Dentre os exemplos, pode-se elencar: a redução de aproximadamente 16 semanas de ciclos de protensão em uma edificação de 42 andares, redução em mais de 3 dias por ciclos de desforma em edificação de 13 andares e ainda outros estudos de casos realizados pelas empresas abordadas no capítulo 1 (CONVERGE, 2021; GIATEC SCIENTIFIC INC, 2022; LUMI CON, 2022; MATURIX, 2022; SENSYTEC, 2022). Em posse dos resultados obtidos com os concretos avaliados no

presente estudo, comportamentos similares poderiam ser observados a partir das reduções de tempo apontadas nas Tabelas 14 e 15.

Vale ressaltar que as otimizações de tempo com ciclos de desforma promovem um melhor reaproveitamento das formas e do escoramento. Sendo assim, além da redução no cronograma, existe a redução de custo com a otimização de forma e escoramento necessário na obra. Outro benefício é que em posse da curva de evolução de resistência à compressão do elemento é possível rever o ritmo planejado da obra e assim determinar um novo ritmo uma vez que a obra apresentará as reduções de cronograma e custo apontadas.

Por fim, um último ponto a ser avaliado é possibilidade de identificação do não atingimento da resistência à compressão na data prevista. Apesar de ainda causar certa influência, no município de São Paulo não é comum a temperatura ambiente influenciar significativamente a evolução de resistência do concreto a ponto de tornar-se crítica uma operação de desforma ou execução de protensão. Entretanto, em municípios mais ao sul do país e em estações do ano como outono e inverno a temperatura ambiente pode prejudicar a evolução de resistência do concreto (CAI et al., 2022; JIANG et al., 2020). Para estes casos o uso de dispositivos IoT se tornam ainda mais necessários por permitir a identificação de um atraso no ganho de resistência em pequenas idades, sendo estas as idades em que por exemplo são realizadas as desformas dos elementos de concreto.

Neste âmbito o uso de dispositivos IoT embarcados com o método da maturidade podem não só trazer subsídios para tomada de decisão quanto a desforma, remoção de escoramento, execução de protensão, liberação de tráfego em pavimentos de concreto e entre outros fatores como também a identificação de problemas mais cedo. Dessa forma, em posse destas informações os *stakeholders* possuem subsídios para tomada de decisão fundamentada em dados coletados em tempo real e ainda antecipar operações que seriam realizadas somente diante da utilização de métodos destrutivos.

Vale ressaltar que apesar dos benefícios discutidos, alguns pesquisadores questionam as variações de tempo supracitadas. Estes acreditam que deve-se obter um método da maturidade mais preciso onde a resistência estimada seja a mais próxima possível da resistência obtida através da ruptura à compressão do corpo de

prova (SOUTSOS et al., 2016; SOUTSOS; KANAVARIS, 2018; UTEPOV et al., 2019). Entretanto, como a presente pesquisa não tem como objetivo avaliar o desempenho das funções maturidade disponíveis atualmente, foi utilizada a função maturidade mais conhecida, a função Nurse-Saul, fator tempo temperatura.

3.3 Conclusões Parciais

As principais conclusões do presente capítulo são:

- Para um elemento de concreto com dimensões similares ao utilizado no presente programa experimental, isto é, espessura igual ou inferior a 30 cm é possível criar uma curva de ganho de resistência estimada média.
- Validação do posicionamento aleatório dos sensores em um elemento de concreto com espessura igual ou inferior a 30 cm.
- O dispositivo IoT desenvolvido para o presente programa experimental foi capaz de adquirir os dados e transmitir em tempo real para nuvem.
- A utilização de dispositivos IoT embarcados com o método da maturidade podem reduzir cronograma, custo e ainda promover informação necessária aos *stakeholders* fundamentada em dados.
- Em complemento ao capítulo 2, os sensores totalmente inseridos no elemento de concreto foram capazes de coletar e transmitir os dados para nuvem mesmo a uma profundidade de 8,75 cm.

3.4 Referências Bibliográficas

ABI-NADER, GUY GEORGES. **Erection Stresses in Reinforced Concrete Tilt-Up Wall Panels**. 2009. PhD Tehsis - University of Florida, Florida, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16055: Parede de Concreto Moldada no Local para a Construção de Edificações - Requisitos e Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2022.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1074: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method maturity index and maturity method, p. 1–11, 2019. DOI: 10.1520/C1074-19.2. Disponível em: www.astm.org.

CAI, Yuanqi; ZHANG, Yue; LIU, Yang; LI, Jinguang. Predictive method for the macroscopic mechanical properties of concrete at ultra-low temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 357, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129276.

CARUFEL, Sarah De; FAHIM, Andrew; GHODS, Pouria; ALIZADEH, Aali. **Concrete Maturity From Theory to Application e-Book**. 1. ed. Ottawa: Giatec, 2018. Disponível em: www.giatec.ca.

CDOT - COLORADO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Standard specifications for Road and Bridge Construction**. 2011. Disponível em: <https://www.codot.gov/>. Acesso em: 5 jan. 2023.

COMMAND CENTER. **Command Center Home**. 2020. Disponível em: <https://www.commandcenterconcrete.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

CONVERGE. **Converge Home**. 2021. Disponível em: <https://www.converge.io/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

CURRA, Roberto Luiz; PACHECO, Fernanda; EHRENBRING, Hinoel Zamis; CHRIST, Roberto; PATZLAFF, Jeferson Ost; TREVISAN, Rafael; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. Application of the maturity method to reinforced concrete roof slabs. **Revista Materia**, v. 26, n. 4, 2021. DOI: 10.1590/S1517-707620210004.1318.

DALLAS. **Datasheet Sensor Ds18B20**. 2022.

DELATTE, J.; BOSELA, N. A. **Another Look at the Collapse of Skyline Plaza at Bailey's Crossroads, Virginia**. **J.Perform.Constr.Facil.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: https://engagedscholarship.csuohio.edu/encee_facpub.

DOKA GMBH. **Doka Home**. 2022. Disponível em: <https://www.doka.com/en/index>. Acesso em: 24 dez. 2022.

GALOBARDES, Isaac; CAVALARO, Sergio H.; GOODIER, Chris I.; AUSTIN, Simon; RUEDA, Ángel. Maturity method to predict the evolution of the properties of sprayed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 357–369, 2015.

ZAPPILE, J. C. M. - *Desenvolvimento de sensor baseado em IoT para monitoramento contínuo das propriedades do concreto moldado in loco*

DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.038. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.038>.

GIATEC. **Giatec Scientific Home**. 2022. Disponível em:
<https://www.giatecscientific.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

GIATEC SCIENTIFIC INC. **Case Studies**. 2022. Disponível em:
<https://www.giatecscientific.com/case-studies/>. Acesso em: 24 maio. 2022.

HILTI. **Hilti Home**. 2022. Disponível em: <https://www.hilti.com.br/>. Acesso em:
24 dez. 2022.

JIANG, Zhengwu; HE, Bei; ZHU, Xinping; REN, Qiang; ZHANG, Yi. **State-of-the-art review on properties evolution and deterioration mechanism of concrete at cryogenic temperature**. *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, , 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119456.

LEE, Songhee; NGUYEN, Ngocchien; LE, Thi Suong; LEE, Chadon. Optimization of Curing Regimes for Precast Prestressed Members with Early-Strength Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 10, n. 3, p. 257–269, 2016. DOI: 10.1007/s40069-016-0154-7.

LEW, H.; FATTEL, S.; SHAVER, J.; REINHOLD, T.; HUNT, B. Investigation of construction failure of reinforced concrete cooling tower at Willow island, West Virginia Final Report. **National Engineering Lab**, 1979.

LUMI CON. **LumiCon Home**. 2022. Disponível em: <https://lumicon.io/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

MATURIX. **Maturix Home**. 2022. Disponível em: <https://maturix.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

MILLER, Dane; HO, Nhat Minh; TALEBIAN, Nima. Monitoring of in-place strength in concrete structures using maturity method – An overview. *Structures*, v. 44, p. 1081–1104, 2022. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.08.077.

RANZ, J.; APARICIO, S.; FUENTE, J. V.; ANAYA, J. J.; HERNÁNDEZ, M. G. Monitoring of the curing process in precast concrete slabs: An experimental study. *Construction and Building Materials*, v. 122, p. 406–416, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.041.

RAO, Aravinda S.; RADANOVIC, Marko; LIU, Yuguang; HU, Songbo; FANG, Yihai; KHOSHELHAM, Kourosh; PALANISWAMI, Marimuthu; NGO, Tuan. Real-time monitoring of construction sites: Sensors, methods, and applications. **Automation in Construction**, v. 136, n. February, p. 104099, 2022. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104099. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104099>.

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

RUDELI, N.; SANTILLI, A.; ARRAMBIDE, F. Striking of vertical concrete elements: An analysis using the maturity method. **Engineering Structures**, v. 95, p. 40–48, 2015. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.021.

SAUL, A. G. A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. **Magazine of Concrete Research**, v. 2, p. 127–140, 1951.

SECANELLAS, S. A.; HERNÁNDEZ, M. G.; SEGURA, I.; MORATA, M.; ANAYA, J. J. A system designed to monitor in-situ the curing process of sprayed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 823–834, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.117.

SENSYTEC. **Sensy Tec Home**. 2022. Disponível em: <https://sensytec.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

SERAFINI, Ramoel; RAMBO, Dimas Alan Strauss; DE FIGUEIREDO, Antonio Domingues; CURTI, Rubens; SOMOGYI, Robert. Controle Contínuo Da Resistência De Estruturas De Concreto Pelo Método Da Maturidade. **CONCRETO & Construções**, v. XLVIII, n. 98, p. 85–90, 2020. DOI: 10.4322/1809-7197.2020.98.0009.

SOFI, M.; MENDIS, P. A.; BAWEJA, D. Estimating early-age in situ strength development of concrete slabs. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 659–666, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.019.

SOUTSOS, M.; KANAVARIS, F.; HATZITHEODOROU, A. Critical analysis of strength estimates from maturity functions. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, p. e00183, 2018. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00183. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00183>.

SOUTSOS, Marios; KANAVARIS, Fragkoulis. The modified nurse-saul (MNS) maturity function for improved strength estimates at elevated curing temperatures. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, p. e00206, 2018. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00206. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00206>.

SOUTSOS, Marios; KANAVARIS, Fragkoulis; ELSAGEER, Mohammed. Accuracy of maturity functions' strength estimates for fly ash concretes cured at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 121043, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121043. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121043>.

TEIXEIRA, S.; SANTILLI, A.; PUENTE, I. Demoulding vertical elements: Recommendations for apply maturity functions. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 392–401, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.006.

TXDOT - TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Standard specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets and Bridges**. 2004. Disponível em: <https://www.txdot.gov/>. Acesso em: 5 jan. 2023.

UTEPOV, Yelbek B.; ANISKIN, Aleksej; IBRASHOV, Azamat P.; TULEBEKOVA, Assel. Maturity sensors placement based on the temperature transitional boundaries. **Magazine of Civil Engineering**, v. 90, n. 6, p. 93–103, 2019. DOI: 10.18720/MCE.90.9.

WAKE. **Wake Home**. 2018. Disponível em: <https://www.wakeinc.com/>. Acesso em: 24 dez. 2022.

YIKICI, Tahsin Alper; CHEN, Hung Liang. Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 802–812, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.026.

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa buscou desenvolver um sensor baseado em tecnologia IoT capaz de monitorar as propriedades do concreto em tempo real. Entretanto, desafios se apresentavam sobre a capacidade de transmissão de dados do dispositivo IoT dentro do elemento de concreto, a confiabilidade dos dados coletados e possíveis distúrbios dos dados durante sua transmissão para servidor em nuvem, o posicionamento fixo ou aleatório dos sensores no elemento de concreto e sua representatividade, dentre diversas outras questões.

A metodologia utilizada na presente pesquisa se dividiu em duas macro etapas, sendo a primeira focada na comunicação sem fio e transmissão de dados em materiais de construção civil e a segunda focada no método da maturidade do concreto. Todos os ensaios foram desenvolvidos em ambiente de laboratório.

Na etapa de avaliação da **Comunicação sem fio e transmissão de dados em materiais de construção civil** os resultados encontrados demonstraram que o aumento da densidade em que o dispositivo está inserido influencia diretamente o RSSI entre os dispositivos transmissor e receptor. Para alguns casos esta redução se torna tão expressiva ao ponto de ser interrompida a conexão, isto é, impedindo a transmissão de dados. A antena externa a caixa encapsulada quando inserida dentro do concreto a uma profundidade de 8 cm, foi a única antena capaz de transmitir os dados a distâncias superiores a 22 m. Além disso, mesmo apresentando grandes variações no RSSI ao longo do programa experimental, foi constatado que uma vez realizada a conexão entre Tx e Rx, os dados são transmitidos sem qualquer tipo de ruído nos valores coletados. Desta forma, é possível transmitir os dados coletados pelo dispositivo IoT quando inserido dentro de um elemento de concreto.

Na etapa de coleta de dados de temperatura e utilização do **Método da maturidade do concreto** foi validada a possibilidade de posicionamento aleatório dos sensores em elementos com espessura de até 30 cm e foram apresentados os potenciais de otimização de cronograma a partir do uso do método da maturidade.

As variações relativas entre a resistência mínima estimada em relação a resistência máxima estimada para uma mesma idade ao longo dos dias de avaliação foram pequenas, permitindo a elaboração de uma curva de resistência estimada

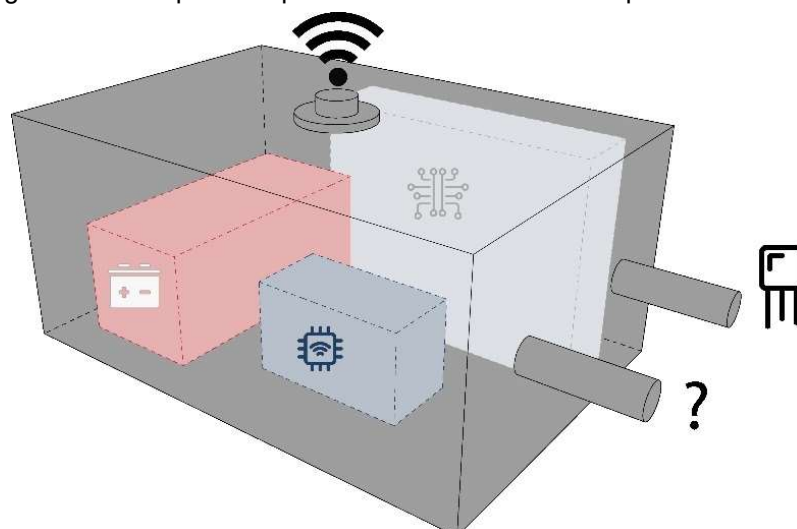
média para o elemento de concreto. Para aplicações de elementos que possuem espessura de até 30 cm esta aplicação apresenta grande potencial de aderência por não apresentar variações relativas significativas no perfil térmico do elemento. Sendo assim, as formas geométricas comumente usadas em lajes, vigas e pilares em obras de edificação apresentam grande potencial de aplicação do agrupamento dos dados devido sua baixa espessura.

Para ambos os traços estudados, o Método da Maturidade apresentou resultados de resistência à compressão maiores do que os resultados obtidos através do ensaio de resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades. Da mesma forma, foi possível identificar que o concreto atingiu a resistência desejada na maioria dos casos com mais de 12 horas de antecedência e em alguns casos com mais de 24 horas de antecedência. Esta redução do tempo para ganho de resistência possibilita uma oportunidade de otimização de cronograma devido à liberação de frentes de serviço, como por exemplo, antecipação na realização da desforma. Em suma, o monitoramento contínuo da evolução da resistência do concreto auxilia os *stakeholders* na tomada de decisão fundamentada em dados coletados em campo.

Apesar da presente pesquisa abordar os benefícios do uso do método maturidade para estimativa de resistência à compressão, a literatura aponta diversas limitações do método. Uma das limitações que pode ser destacada é que o aumento da temperatura do elemento de concreto devido a temperatura ambiente ou incidência solar pode prejudicar a estimativa de resistência à compressão e em casos mais extremos, pode invalidar a estimativa de resistência. Desta forma, a incorporação de um outro sensor para o dispositivo IoT desenvolvido e a combinação de suas medidas para estimativa de resistência, as limitações mencionadas podem ser dirimidas.

Por fim, compatibilizando as análises discutidas até o momento, a Figura 18 ilustra o conceito de um dispositivo IoT com grande potencial de monitorar as propriedades do concreto. Este dispositivo IoT fundamenta-se em 5 pilares: i. Microcontrolador com antena dedicada; ii. Método da Maturidade do concreto com o uso sensor digital de temperatura; iii. Outro sensor; iv. Material invólucro; e v. fonte de energia.

Figura 18 – Croqui do dispositivo IoT desenvolvido no presente trabalho



FONTE: O Autor

4.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros aconselha-se que sejam exploradas:

- Avaliação do RSSI e alcance de transmissão de sinal de dispositivos IoT inseridos em elementos de concreto em profundidades ≥ 8 cm;
- Análise crítica das estimativas de resistência à compressão das funções de maturidade no clima típico do Brasil, incluindo as funções recém formuladas que tem apresentado grande potencial de estimativas precisas mesmo em condições de temperatura ambiente elevadas e alta taxa de incidência solar;
- Avaliação do método da maturidade com diferentes tipos de cimento;
- Avaliação do posicionamento dos sensores em elementos que com espessura superior à 30 cm;
- Aplicações do método da maturidade em elementos de concreto de grandes dimensões (concreto massa) como por exemplos, blocos de fundação, vigas de transição, barragens, dentre outras formas de aplicação;
- Inclusão de um outro sensor para o dispositivo IoT desenvolvido com o intuito de promover uma estimativa de resistência com maior acurácia;
- Desenvolvimento de ferramenta web e *dashboards* para visualização dos dados como ferramenta de gestão de controle de resistência do concreto a partir do dispositivo IoT desenvolvido.

A – MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

A camada de coleta de dados em um SHM é a camada responsável por obter as informações do elemento de interesse e que será utilizada pelas camadas seguintes até a camada de análise de resultados pelo *stakeholder*. Neste âmbito, a confiabilidade dos dados coletados pelo dispositivo IoT se torna essencial para a tomada de decisão. Desta forma, a seguir é apresentado a seleção de sensores de temperatura e a avaliação da confiabilidade dos dados a serem coletados pelo dispositivo IoT.

Para seleção e avaliação dois sensores de temperatura foram selecionados, sendo um sensor analógico de temperatura (Sensor B com termopar tipo K instalado) e um sensor digital de temperatura (Sensor A). A Tabela A. 1 apresenta o resumo das especificações dos sensores avaliados e a Tabela A. 2 as características do termopar tipo K instalado no sensor B. Ambos os sensores foram conectados a um microcontrolador para avaliação em duas etapas, sendo a primeira a avaliação da leitura de valores de temperatura em um recipiente com água utilizando um termômetro químico de mercúrio como referencial e a segunda inserindo os sensores em um elemento de concreto por 7 dias tendo um aquisitor de dados como referencial.

Tabela A. 1 – Resumo das especificações do sensor A e sensor B

Itens	Unidades	Especificações	
		A	B
Sensor	-	A	B
Tipo	-	Sensor digital	Thermocouple to digital converter
Tensão de operação	V	3,0 até 5,5	3,0 até 5,5
Faixa de leitura	°C	-55 até 125	-200 até 700
Acurácia entre -10°C e +85°C	°C	±0,5	±2,0
Resolução programável	Bits	9 até 12	14
Resolução	°C	0,5 até 0,0625	0,25

FONTE: Dallas (2022) e Maxim Integrated (2016)

Tabela A. 2 – Características do termopar tipo K

Tipo	K
Cabo T-	Alumel
Cabo T+	Cromel
Faixa de leitura (°C)	-270 to +1372
Sensibilidade ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	41.276 (0°C até $+1000^\circ\text{C}$)
Sensibilidade à função fria ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) (0°C até $+70^\circ\text{C}$)	40,73

FONTE: Maxim Integrated, (2016)

Na primeira etapa foram selecionadas 17 temperaturas (5 a 85°C a cada 5°C) a serem lidas pelos sensores de temperatura imersos em um recipiente com água, onde foi comparada a temperatura indicada pelo termômetro químico de mercúrio (referência) com os dados coletados pelos sensores. A Figura A. 1 ilustra o processo de coleta de dados onde foram posicionados juntos os sensores de temperatura e termômetro de mercúrio.

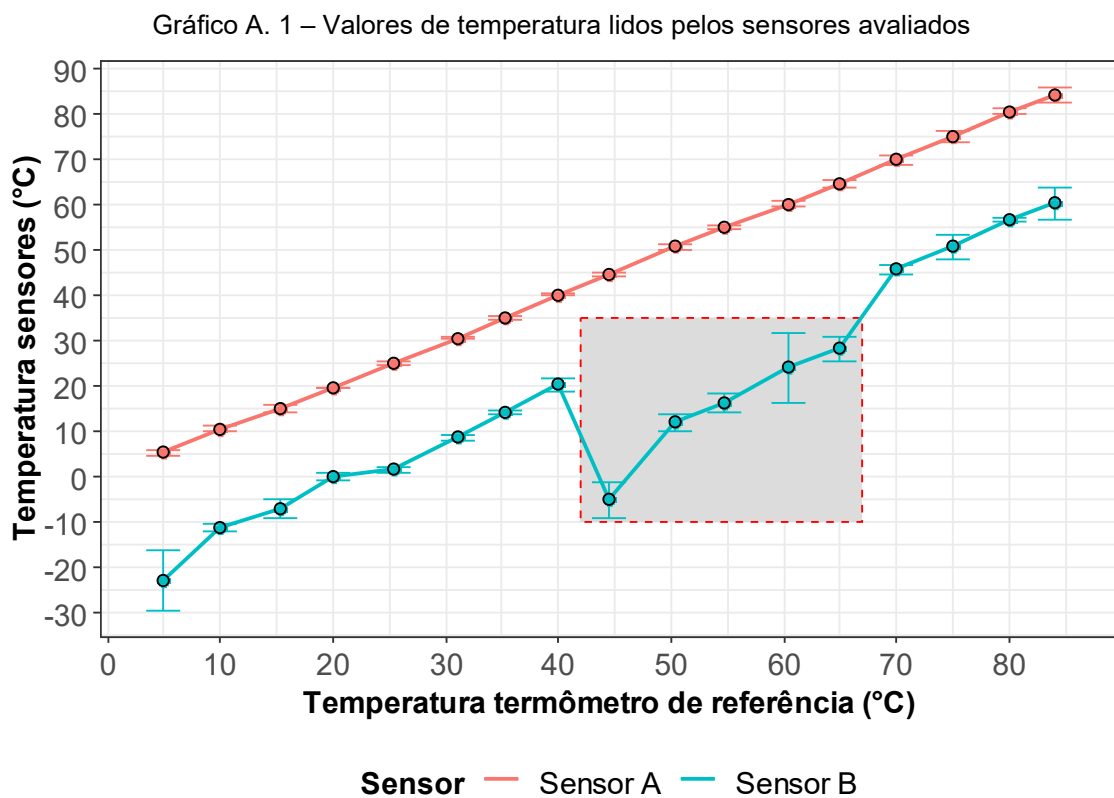
Os sensores de temperatura e microcontrolador foram confeccionados (hardware) e programados (firmware), com bibliotecas disponibilizadas pelos próprios fabricantes dos sensores, de forma a se obter os dados de temperatura no mesmo instante, desta forma minimizando erros de leitura devido a variações no tempo de coleta das informações. Ainda, foi determinado um período de 1 minuto com os sensores e termômetro imersos no líquido para estabilização da temperatura e realização da leitura. Foram realizadas 3 leituras para cada temperatura previamente selecionada.

Figura A. 1 – Posicionamento dos sensores de temperatura avaliados



FONTE: O Autor

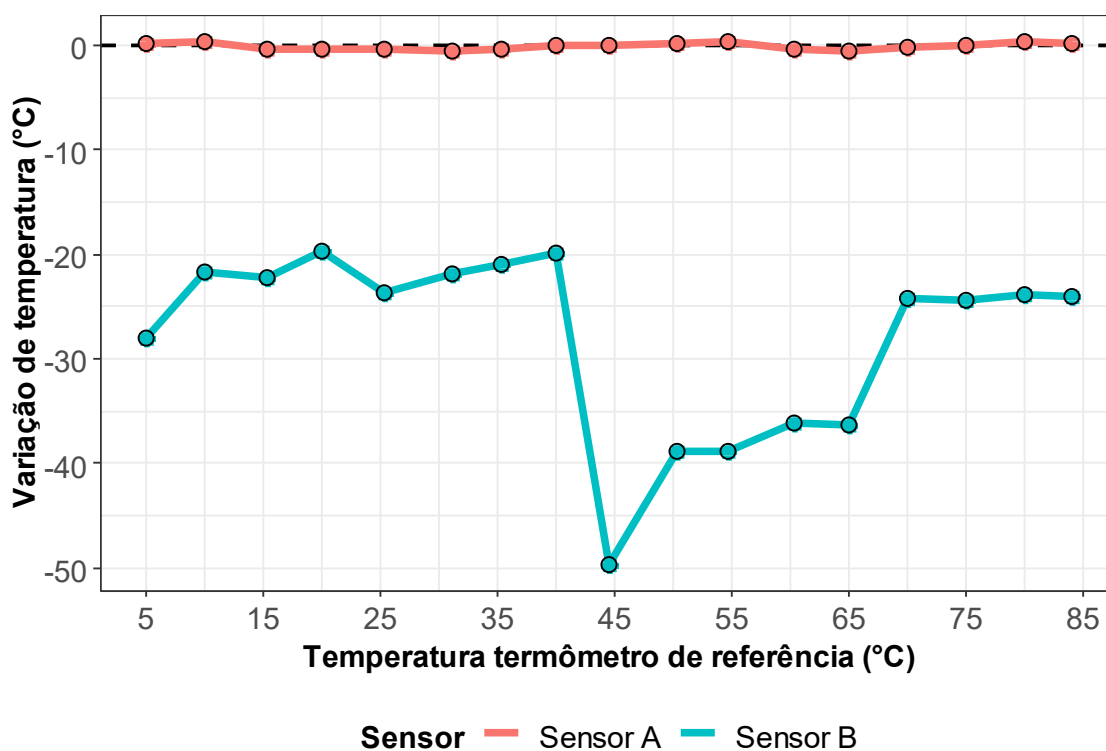
O Gráfico A. 1 apresenta a média dos valores de temperatura lidos pelos sensores avaliados (eixo y) e os valores de temperatura medido pelo termômetro de mercúrio (eixo x). Para o sensor digital A é possível verificar que os valores de temperatura obtidos possuem baixa dispersão e se aproximam muito dos valores lido pelo termômetro de referência. É possível verificar uma continuidade na leitura dos valores de temperatura para os 17 pontos de temperatura definidos. Já para o caso do sensor B, pode-se elencar 3 características com os dados de temperatura: i. os valores de temperatura lidos não estão próximos dos valores lidos pelo termômetro de referência, entretanto não sendo um limitador que impeça o seu uso devido a possibilidade de calibração do sensor, ii. É possível verificar uma dispersão nos valores de temperatura mais expressivos do que em relação ao sensor A e; iii. foi observado uma descontinuidade nos valores de temperatura (eixo x) de 45 a 65 °C que pode ocasionar uma maior dificuldade na calibração dos valores de temperatura lido pelo sensor. Se fosse identificado apenas um *offset* nos valores de temperatura, o processo de calibração seria menos custoso devido a facilidade de execução, porém devido a descontinuidade identificada, o processo se torna mais difícil e com maior possibilidade de imprecisão dos valores coletados.



FONTE: O Autor

O Gráfico A. 2 apresenta a variação dos valores de temperatura lidos pelos sensores em relação ao termômetro de referência (eixo y). Para ambos os sensores é possível identificar os mesmos apontamentos supracitados, porém com uma perspectiva diferente. Para este gráfico quanto mais os valores de variação estiverem próximos de 0, menor é a variação em relação ao termômetro de referência. Neste âmbito, é possível identificar que o sensor A possui pequenas variações, já o sensor B, além de possuir valores de variação em até 50°C, também apresenta a descontinuidade já abordada e que dificulta sua calibração.

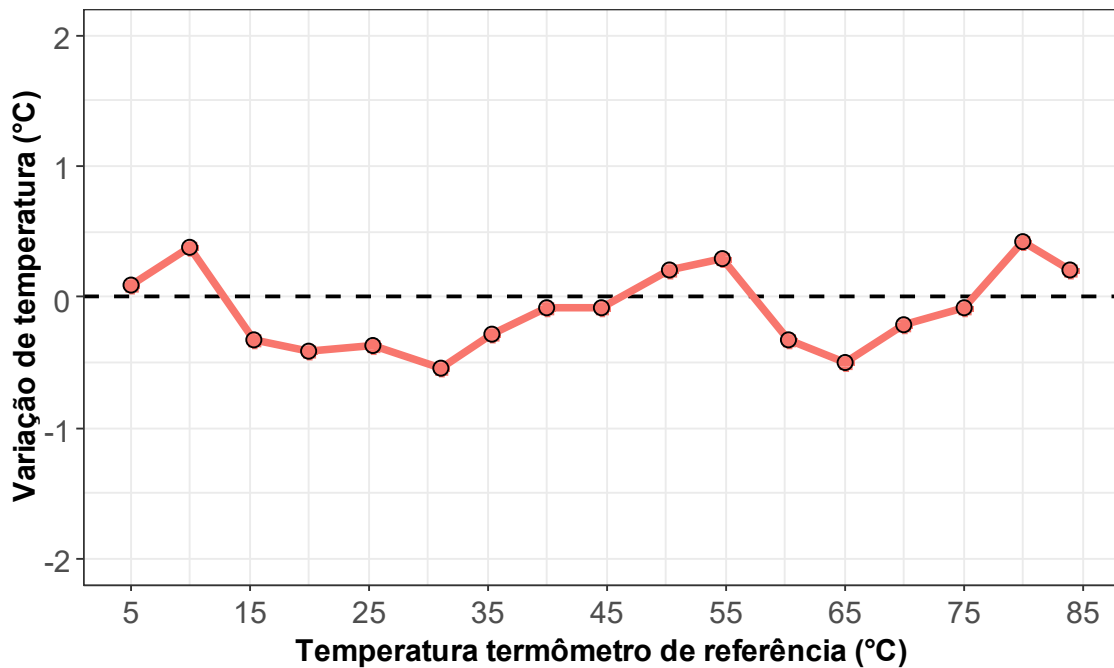
Gráfico A. 2 – Variação de temperatura dos sensores avaliados em relação ao termômetro referencial



FONTE: O Autor

Ampliando a escala do Gráfico A. 2 de forma a identificar os valores de variação de temperatura do sensor A, o Gráfico A. 3 ilustra os valores de variação de temperatura apenas para o sensor A. Neste caso é possível verificar que os valores de variação de temperatura em relação ao termômetro referencial estão próximos de $\pm 0,50$ °C, sendo uma variação muito baixa.

Gráfico A. 3 – Variação de temperatura do sensor A em relação ao termômetro referencial



Sensor — Sensor A

FONTE: O Autor

Apesar de não se objetivar reutilizar os sensores de temperatura após sua aplicação no concreto, destaca-se que ao término desta primeira etapa de avaliação, o sensor A não teve nenhuma variação em seu aspecto inicial, já no sensor B é possível observar indícios de oxidação em sua ponta (Figura A. 2).

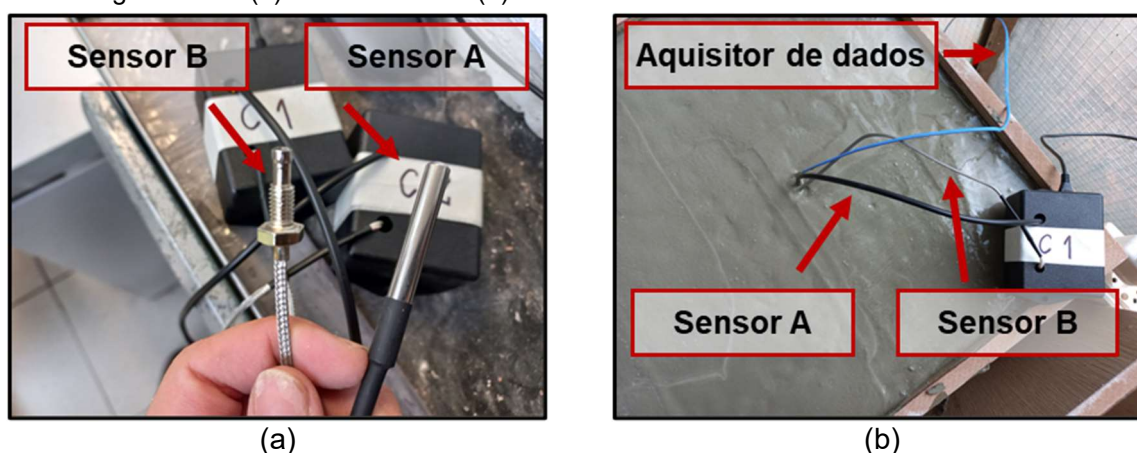
Figura A. 2 – Indícios de oxidação na ponta do sensor analógico de temperatura



FONTE: O Autor

Para a segunda etapa, dois cubos de concreto com aresta de 400 mm foram moldados e monitorados continuamente pelos sensores A, B e aquisitor ADS2000 com termopar tipo T (Figura A. 3). Os dois traços de concreto utilizados para esta etapa foram nomeados com base no seu consumo de cimento, sendo o primeiro como CC640 ($C_c = 640 \text{ kg/m}^3$) e o segundo como CC320 ($C_c = 320 \text{ kg/m}^3$). Sua formulação foi contemplada de forma a se obter um traço com maior consumo de cimento e por consequência maior liberação de calor (CC640) e um traço com menor consumo de cimento e por consequência menor liberação de calor (CC320). A Tabela A. 3 apresenta o consumo de materiais dos traços de concreto utilizados.

Figura A. 3 – (a) Sensor A e B e (b) cubos de concreto com os sensores instalados



FONTE: O Autor

Tabela A. 3 – Traços de concreto

Material	CC640	CC320
Cimento Portland (kg/m^3)	649,75	320,67
Areia (kg/m^3)	649,75	737,54
Brita (kg/m^3)	649,75	962,01
Água (kg/m^3)	297,58	256,92
Relação água/cimento (a/c)	0,458	0,801
Slump (mm)	145	110
fck (MPa)	40,5	19,0

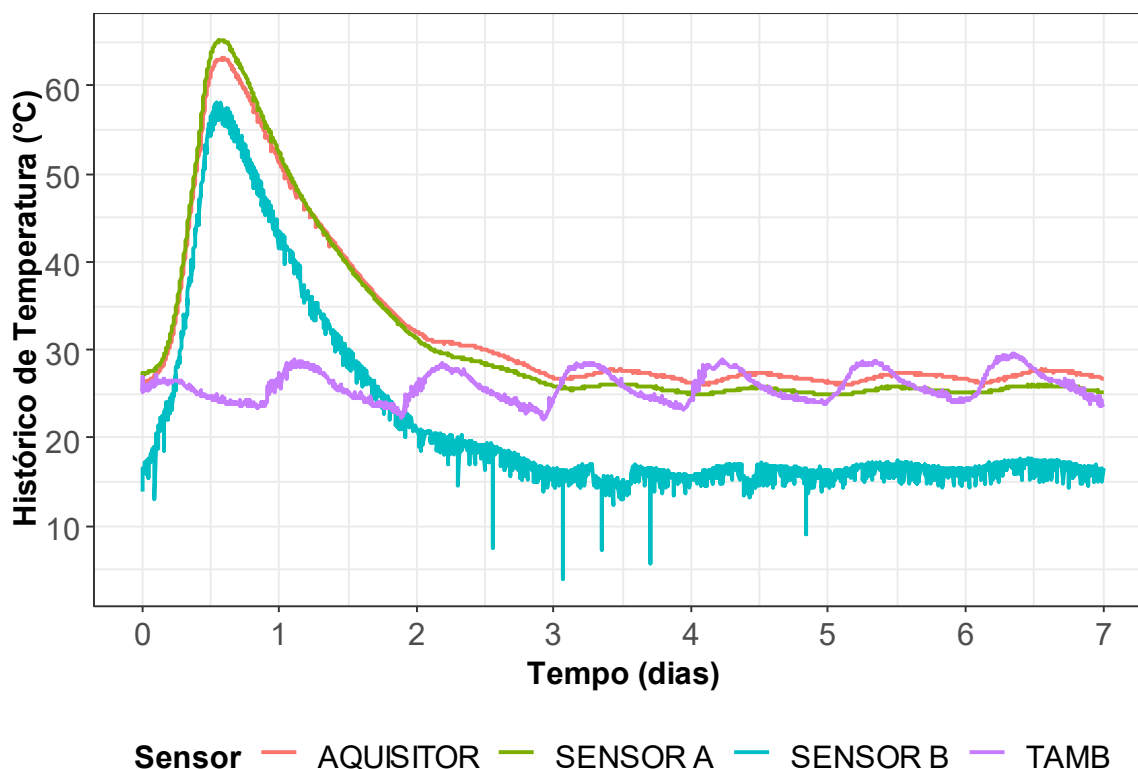
FONTE: O Autor

O monitoramento contínuo da temperatura dos elementos de concreto foi realizado por 7 dias com aquisição de dados a cada 5 minutos, totalizando um potencial de 2.016 leituras para cada elemento de concreto e para cada sensor (totalizando 6.048 leituras para cada traço de concreto).

Os Gráficos A.4 e A. 5 apresentam os resultados de temperatura coletados pelos sensores, aquisitor de dados e temperatura ambiente ao longo de 7 dias para os dois traços avaliados. Com base no histórico de temperatura dos gráficos apresentados, é possível verificar que a variação no traço expressou picos de temperatura diferentes nas primeiras idades e após o término do pico de hidratação, a temperatura dos cubos de concreto se tornou cíclica ao longo dos demais dias de avaliação.

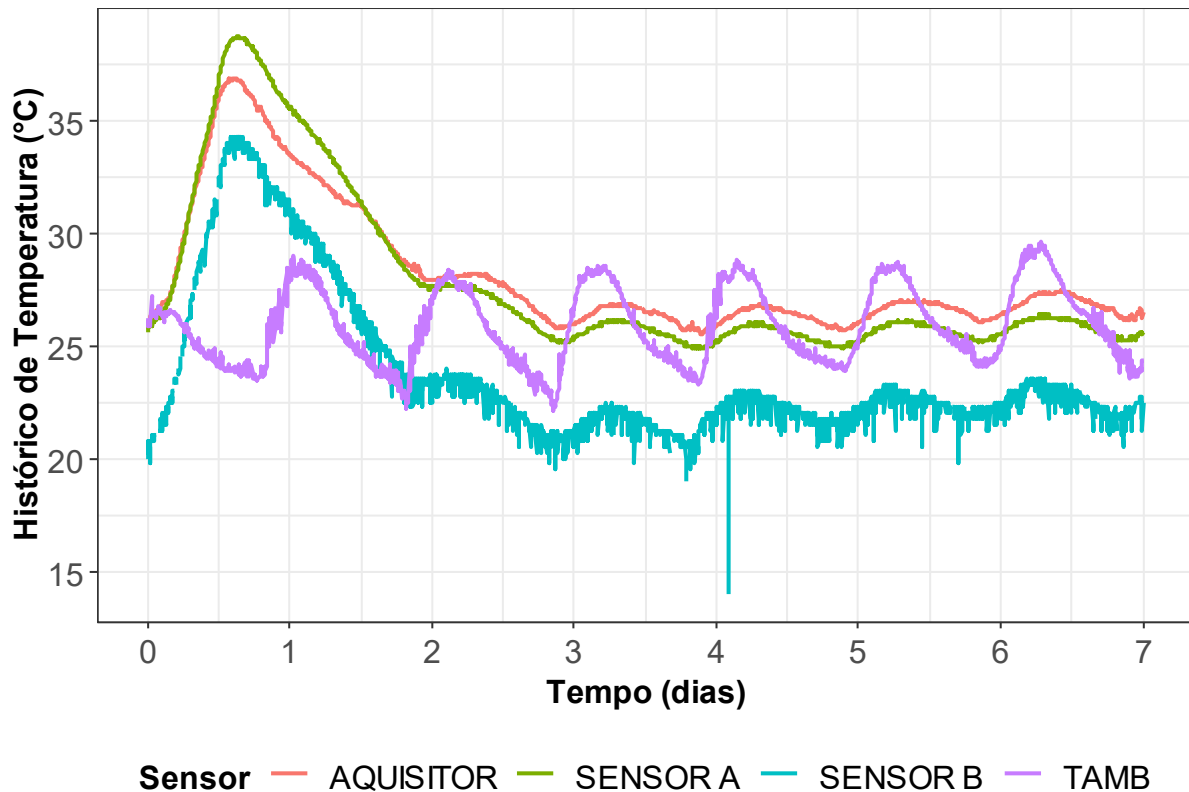
Assim como observado na primeira etapa do presente apêndice, o sensor A apresentou valores de temperatura muito próximos ao aquisitor de dados, apresentando pequenas variações em alguns pontos específicos como por exemplo no pico de hidratação (aproximadamente 0,7 dia no eixo x) e a partir de 2 dias para o Gráfico A. 4. Já o sensor B apresenta a envoltória de sua curva similar ao do sensor de temperatura A e ao aquisitor de dados, porém, com um *offset* de aproximadamente 15°C. Além disso apresentou muitos ruídos ao longo dos 7 dias de monitoramento. Estes comportamentos foram observados tanto para o Gráfico A. 4 (CC640) quanto para o Gráfico A. 5 (CC320).

Gráfico A. 4 – Histórico de temperatura do traço $C_c = 640 \text{ kg/m}^3$ para os sensores A, B, aquisitor de dados e temperatura ambiente



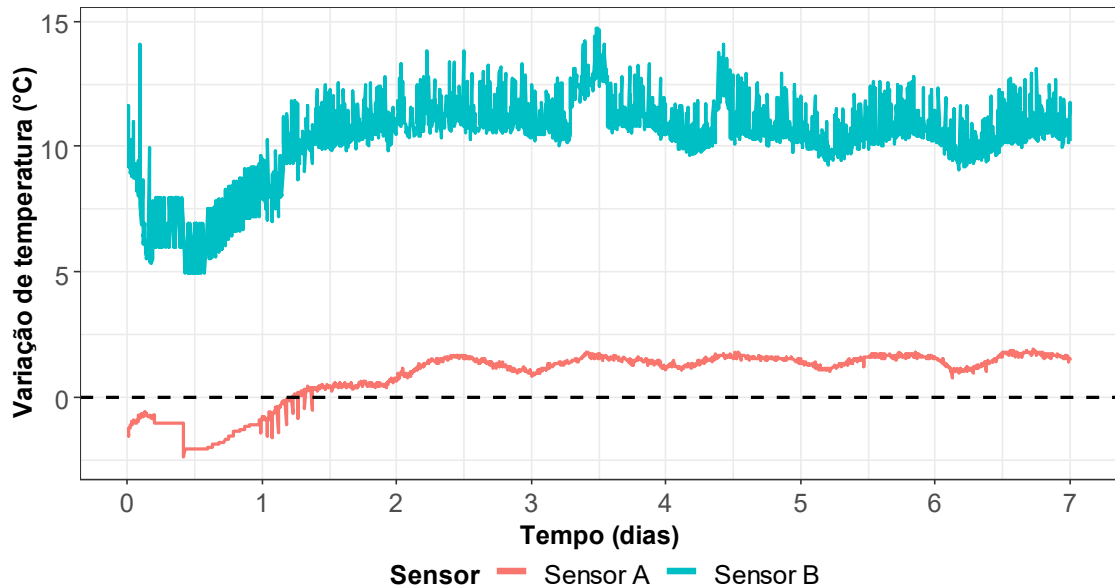
FONTE: O Autor

Gráfico A. 5 – Histórico de temperatura do traço Cc = 320 kg/m³ para os sensores A, B, aquisitor de dados e temperatura ambiente

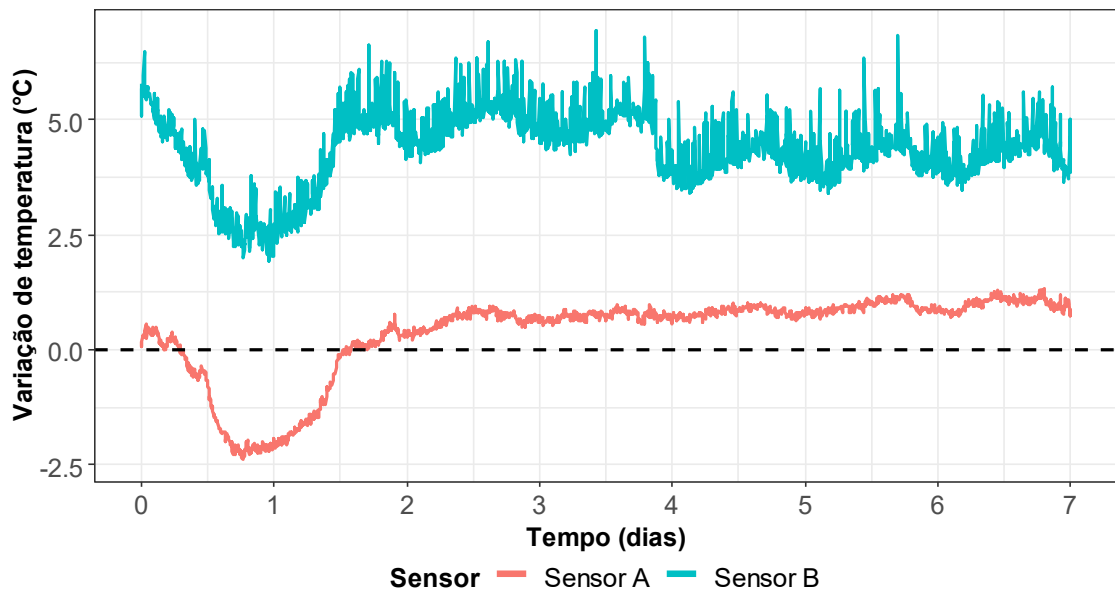


FONTE: O Autor

Os Gráficos A. 6 e A. 7 apresentam as variações de temperatura entre o aquisitor de dados (referência) e os sensores avaliados. Assim como observado na primeira etapa, o sensor de temperatura A apresentou menor variação em relação ao sensor B. Para o sensor A foram verificadas variações de temperatura inferiores a $\pm 2,50$ °C ao longo dos 7 dias de avaliação, já para o sensor B foram verificadas variações de aproximadamente 15 °C para o traço CC640 e 6 °C para o traço CC320, além dos ruídos supracitados.

Gráfico A. 6 – Variação de temperatura dos sensores avaliados em relação ao aquisitor de dados (Traço Cc = 640 kg/m³)

FONTE: O Autor

Gráfico A. 7 – Variação de temperatura dos sensores avaliados em relação ao aquisitor de dados (Traço Cc = 320 kg/m³)

FONTE: O Autor

Com base na coleta e análise de dados realizada, o sensor A foi selecionado para presente pesquisa devido sua baixa variação em relação aos instrumentos de referência utilizados (termômetro de referência de mercúrio e aquisitor de dados calibrado).

B – AVALIAÇÃO DOS REQUISITOS DOS SENSORES DISPONÍVEIS NO MERCADO

Tabela B. 1 – Características e propriedades de transmissão de dados dos sensores de maturidade comercializados

Fornecedor	Modelo	Tipo de sensor	Tipo de conexão	Alcance sem fio	Bateria	Dimensões (mm)	Peso (g)
Converge	Signal System	1 única peça	Bluetooth - v5.0	10m (dentro do concreto)	Lithium (2 anos)	L: 50 mm C: 40 mm A: 25 mm	35
	Mesh System	2 peças conectadas	Wireless 868,1- 868,5 MHz	-*	2xAA alcalinas (2 anos)	L: 93 mm C: 93 mm A: 62 mm	180
Giatec Scientific	Smartrock2	1 única peça	-*	8m (dentro do concreto)	4 meses	-*	-*
	Smartrock3	1 única peça	-*	12m (dentro do concreto)	4 meses	L: 80 mm C: 42 mm A: 26 mm	-*
	Bluerock 2	1 única peça	-*	8m (dentro do concreto)	2 anos	-*	-*
Maturix	Gaia 200	2 peças conectadas	Wireless - Sigfox (RC1, RC2)	3 km (fora do concreto)	Alcalina, lithium ou recarregável	L: 113 mm C: 148,3 mm A: 50,7 mm	560
	Gaia 220	2 peças conectadas	Wireless - Sigfox (RC1, RC2)	3 km (fora do concreto)	Alcalina, lithium ou recarregável	L: 113 mm C: 148,3 mm A: 50,7 mm	560
	Orbit k	2 peças conectadas	Wireless - Sigfox (RC1, RC2)	3 km (fora do concreto)	Li-SOCI2, 3.6 V 5.400 mAh (não-substituível)	L: 164 mm C: 114 mm	323

							A: 42 mm	
SensyTec	SensyRoc	2 peças conectadas	-*	15 m (dentro do concreto)	6 meses		L: 38mm C: 38mm A: 25mm	-*
LumiCon aoms	LumiNode	2 peças conectadas	-*	500 m (fora do concreto)	> 5 anos		-*	160
Hilti	HCS-TH1	2 peças conectadas	Bluetooth	30 m (dentro do concreto)	-*		-*	-*
	HCS-T2	2 peças conectadas	LoRa	300 m (dentro do concreto)	-*		-*	-*
German Instruments	VAKKA sensors	2 peças conectadas	-*	-*	> 4 meses		-*	-*
Command Center	AUTOCOLLECTOR Sensor	2 peças conectadas	Bluetooth	100 m	1 mês (pode trocar a bateria)		-*	-*
RPX Construction	Insite	2 peças conectadas	LoRa	-*	20 horas com uso contínuo		-*	-*
AKCP	Wireless Tunnel™ Temp/Hum	1 ou 2 peças conectadas	LoRa	-*	4 pilhas AA ou cabo micro USB		L: 75 mm C: 77 mm A: 120 mm	-*
DOKA	Concremote - Deckensensor	1 única peça	2G, 3G and 4G data transmission, Bluetooth BLE	-*	Lithium ion Recarregável		D: 120 mm H: 63 mm	1300
HUMBOLDT	H-2683	2 peças conectadas	-*	300 m	3 anos (recarregável)		-*	-*
Con-Cure	NEX® Monitoring System	2 peças conectadas	-*	-*	-*		-*	-*
Wake	-*	2 peças conectadas	-*	-*	-*		-*	-*
Exact	-*	2 peças conectadas	-*	-*	-*		-*	-*
ConXedge	-*	2 peças conectadas	-*	-*	-*		-*	-*
vOrb	-*	2 peças conectadas	-*	-*	-*		-*	-*

Tabela B. 2 – Características e propriedades de leitura de temperatura dos sensores de maturidade comercializados

Fornecedor	Modelo	Tipo de sensor	Comprimento do cabo	Faixa de leitura	Acurácia	Resolução	Intervalo de medição
Converge	Signal System	1 única peça	-*	-*	±1°C	-*	20 min
	Mesh System	2 peças conectadas	<3m	-*	-*	-*	20 min
Giatec Scientific	Smartrock 2	1 única peça	40 cm até 3m	-30 até 85°C	±1 °C	±0,1 °C	15 min
	Smartrock 3	1 única peça	30 cm até 15m	-30 até 85°C	±1 °C	±0,1 °C	15 min
	Bluerock 2	1 única peça	-*	-30 até 60°C 0 até 100% UR	±1 °C ±3% UR	-*	15 min
Maturix	Gaia 200	2 peças conectadas	-*	-200 até 1260 °C	±1,5 °C	±0,1 °C	C/ cabo 15 min S/ cabo 6 h
	Gaia 220	2 peças conectadas	-*	-40 até 70 °C 0 até 100% UR	±0,1 °C ±2% UR	±0,3 °C ±0,1% UR	C/ cabo 1h S/ cabo 6 h
	Orbit k	2 peças conectadas	-*	-200 até 1260 °C	±0,3 °C ±1,5% UR	±0,1 °C	C/ cabo 10min S/ cabo 6 h
SensyTec	SensyRoc	2 peças conectadas	-*	-30°C até 80°C	±1 °C	-*	Ajustável
LumiCon aoms	LumiNode	2 peças conectadas	-*	-*	-*	-*	-*
Hilti	HCS-TH1	2 peças conectadas	<4,5 m	-40 até 85°C	±3% UR ±0,4 °C	-*	Temp - 15 min UR - 6h
	HCS-T2	2 peças conectadas	<4,5 m	-40 até 85°C	±3% UR ±0,4 °C	-*	15 min
German Instruments	VAKKA sensors	2 peças conectadas	1 a 3 m	-*	±0,3 °C ±2,0 %	-*	30 min (fixo)
Command Center	AUTOCOLLECTOR Sensor	2 peças conectadas	>10m	-40 até 85 °C	±1 °C	±0,5 °C	Ajustável
RPX Construction	Insite	2 peças conectadas	-*	-10 até 110°C	±1 °C	±1 °C	-*

AKCP	Wireless Tunnel™ Temp/Hum	Customizável	1,5 m	-40°C até 75°C	±0,3 °C	±0,1 °C	-*
DOKA	Concremote - Deckensensor	1 peça	-*	-55°C até 125°C	±2,0%	-*	Medição - 10 min Transmissão - 60 min
HUMBOLDT	H-2683	2 peças conectadas	6 m	-*	-*	±0,1 °C	5 min
Con-Cure	NEX® Monitoring System	2 peças conectadas	-*	-*	-*	-*	-*
Wake	-*	2 peças conectadas	-*	-*	-*	-*	Ajustável
Exact	-*	2 peças conectadas	-*	-*	-*	-*	-*
ConXedge	-*	2 peças conectadas	Customizável	-35 até 100°C	±0,5 °C	-*	15 min até 4 meses
vOrb	-*	2 peças conectadas	-*	-*	-*	-*	-*

* Informação não disponibilizada pelo fabricante.

Tabela B. 3 – Características e propriedades dos equipamentos de leitura de resistividade elétrica

Fornecedor	Modelo	Tipo	Nº de canais	Faixa de leitura	Frequência de medição	Precisão	Tempo de medição	Bateria	Dimensões (mm)
Giatic Scientific	SmartBox™ - Wireless Concrete Resistivity	Bancada	2	1 – 3000 Ω	10 kHz	± 2%	<1 segundo	-*	-*
Giatic Scientific	Surf™ - Surface Electrical Resistivity Testing	Bancada	4	0.1 – 100 KΩ.cm	13 – 100 Hz	± (0.1+1%)	1,5 segundos	110 ~220 V	200 m x 160 mm x 70 mm
				100 – 1000 KΩ.cm	13 – 100 Hz	± (1+1%)	1,5 segundos		
Giatic Scientific	RCON™ - Bulk Electrical Resistivity Testing	Bancada	2	1 ~ 100 Ω	1Hz ~ 30KHz	± 2% ± 2 dígitos	2 segundos	110 ~220 V	200 mm x 230 mm x 70 mm
				100 Ω ~ 1000 Ω	1Hz ~ 30KHz	± 2% ± 2 dígitos	2 segundos		
				1 ~ 10 KΩ	1Hz ~ 30KHz	± 2% ± 2 dígitos	2 segundos		
				10 ~ 100 KΩ	1Hz ~ 30KHz	± 2% ± 2 dígitos	2 segundos		
				100 KΩ ~ 1 MΩ	1Hz ~ 10KHz	± 2% ± 2 dígitos	2 segundos		
Giatic Scientific	Perma™ - Rapid Chloride Permeability Testing	Bancada	4	0 ~ 500 mA 0 ~ 100°C	-	± 0,1 mA ± 1 °C	-*	-*	280 mm x 240 mm x 104 mm
Giatic Scientific	XCell™ - NDT Device for Half-Cell Corrosion Mapping	In loco	-	-750 ~ +250 mV 0 ~ 50°C	-	0,1 mV 0,5 °C	1 segundo	-*	32mm x 260 mm (D x L)
Giatic Scientific	iCOR® - Wireless NDT Corrosion Detection	In loco	1	-800 ~ + 200 mV 0 ~10 kΩ.m	-*	-*	3 ~ 30 segundos	-*	184 mm x 166,5 mm (D x H)
Sensytec	RE-SENSYROC™	IoT in loco	1	-*	Ajustável	-*	-*	± 6 meses	38 mm x 38 mm x 25 mm
Germann Instruments	PROOVE´it	Bancada	8	-*	-*	± 0,5 % até 500 mA		110 ~220 V	400 mm x

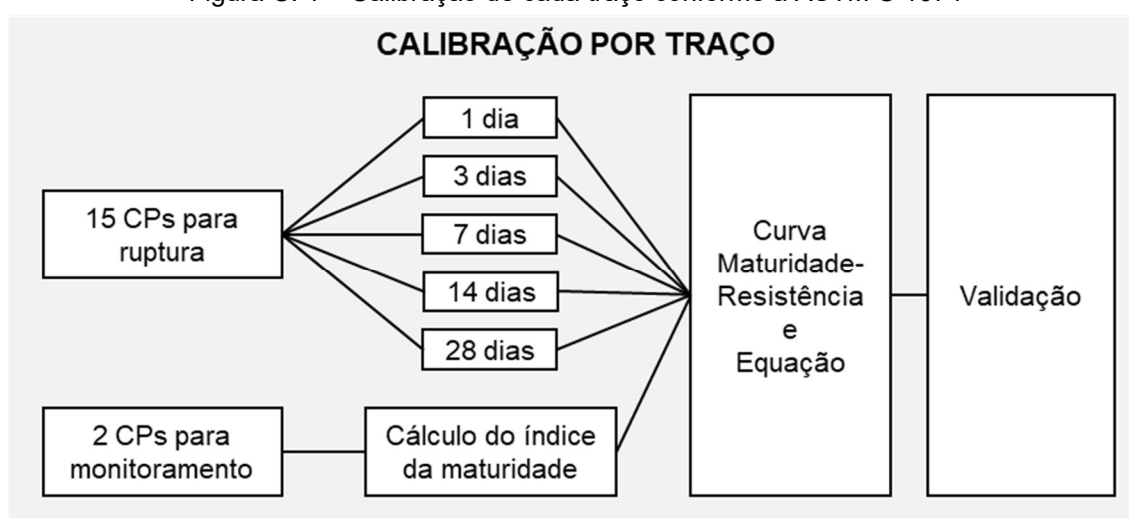
$\pm 0,1$ V até 60 V									
300 mm x 150 mm									
Ger mann Instruments	RCT and RCTW	In loco	-*	-*	-*	-*	-*	~ 150 horas	-*
Ger mann Instruments	Merlin	Bancada	-*	-*	325 Hz	$\pm 0,1$ %	2 segundos	110 ~220 V	-*
Ger mann Instruments	GalvaPulse	In loco	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*

* Informação não disponibilizada pelo fabricante.

C – CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE

A Figura C. 1 ilustra o processo de calibração do método da maturidade com o uso da equação Nurse-Saul em atendimento a ASTM C 1074 (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2019). A calibração do método da maturidade é exclusiva para cada traço de concreto, desta forma, foram realizadas duas calibrações do método da maturidade para o presente trabalho.

Figura C. 1 – Calibração de cada traço conforme a ASTM C 1074



FONTE: O Autor

Para calibração de cada traço de concreto foram moldados 15 corpos de prova cilíndricos nas dimensões 10x20 cm (diâmetro x altura) para ruptura nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias. Para o monitoramento do histórico de temperatura foram moldados dois corpos de prova nas dimensões 10x20 cm (diâmetro x altura) com o sensor de temperatura no centroide de cada amostra e com aquisição de dados de temperatura a cada 5 minutos. Todos os corpos de prova foram acomodados em condições de temperatura laboratoriais até o momento das rupturas nas datas estabelecidas bem como o registro da data e horário de ruptura de cada corpo de prova.

Nas Tabelas C.1 e C. 2 são apresentadas as idades de ruptura e resistência à compressão dos corpos de prova. Em paralelo, a partir do histórico de temperatura dos corpos de provas para monitoramento, são apresentados os índices maturidade referente a cada idade de ruptura. Por fim, são apresentadas as funções maturidade obtidas a partir da relação entre o índice maturidade (eixo X) com a resistência à compressão (eixo Y) para cada traço.

Tabela C. 1 – Relação Índice Maturidade X Resistência à compressão (traço CC640)

Idade (dias)	Resistência a compressão (MPa)	Índice Maturidade (h°C)	Equação
0,984	11,8	571,2447	$f(M) = -34,84705 + 7,610732 \cdot \ln(M)$
3,000	20,6	1.767,8825	
7,259	31,6	4.296,3795	
14,261	36,7	8.534,4925	
28,251	40,5	16.832,0121	

FONTE: O Autor

Tabela C. 2 – Relação Índice Maturidade X Resistência à compressão (traço CC320)

Idade (dias)	Resistência a compressão (MPa)	Índice Maturidade (h°C)	Equação
1,125	9,1	688,5802	$f(M) = -11,56427 + 3,30781 \cdot \ln(M)$
3,125	14,0	1.903,2028	
7,149	16,6	4.325,3134	
14,295	19,6	8.422,1807	
28,121	19,7	15.921,6644	

FONTE: O Autor

A Tabela C. 3 sumariza as funções maturidade obtidas durante a etapa de calibração e apresenta concomitantemente seu respectivo R^2 ajustado. É possível verificar que foram obtidos ótimos valores de R^2 ajustado para ambos os traços avaliados, acima de 0,96.

Tabela C. 3 – Equações Maturidade X Resistência à Compressão e R^2 ajustado

Traço	Equação	R^2 ajustado
CC640	$f(M) = -34,84705 + 7,610732 \cdot \ln(M)$	0,9646
CC320	$f(M) = -11,56427 + 3,30781 \cdot \ln(M)$	0,9700

FONTE: O Autor

Após a obtenção da equação da curva Maturidade x Resistência à compressão, foi realizada a validação das equações. Sendo assim, foram moldados novamente 15 corpos de prova para ruptura e 2 corpos de prova para monitoramento contínuo para avaliação da resistência estimada pelo método da maturidade em relação a resistência à compressão real dos corpos de prova. Segundo a ASTM C 1074 (ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2019) o valor de resistência à compressão proveniente da ruptura do corpo de prova deve ser igual à $\pm 10\%$ da resistência estimada pelo método da maturidade.

As Tabelas C. 4 e C. 5 apresentam os novos resultados de resistência à compressão de cada traço de concreto com sua respectiva resistência à compressão estimada a partir do método da maturidade. A variação relativa apresentada entre as resistências obtidas são inferiores a $\pm 10\%$. Desta forma, a calibração realizada para os traços CC640 e CC320 foi validada e utilizada para o programa experimental do capítulo 3 do presente trabalho.

Tabela C. 4 – Validação da calibração da função maturidade (traço CC640)

Idade (dias)	Resistência à compressão corpo de prova (MPa)	Resistência à compressão Função Maturidade (MPa)	Varição Relativa (%)
1,003	11,53	11,85	2,775%
3,153	21,31	21,87	2,628%
7,197	31,68	29,74	-6,124%
14,684	37,23	35,83	-3,760%
28,324	40,68	41,85	2,876%

FONTE: O Autor

Tabela C. 5 – Validação da calibração da função maturidade (traço CC320)

Idade (dias)	Resistência à compressão corpo de prova (MPa)	Resistência à compressão Função Maturidade (MPa)	Varição Relativa (%)
1,327	9,75	10,05	3,08%
3,098	14,23	13,41	-5,76%
7,073	16,5	16,12	-2,30%
14,174	19,27	18,33	-4,88%
28,096	19,94	20,44	2,51%

FONTE: O Autor