



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAROLINE SILVA ARAÚJO

**SISTEMA PARA RASTREAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS
FÍSICOS INTEGRANDO IOT E BIM: APLICAÇÃO NO SISTEMA DE
PAREDE DE CONCRETO MOLDADO IN LOCO**

Salvador
2021

CAROLINE SILVA ARAÚJO

**SISTEMA PARA RASTREAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS
FÍSICOS INTEGRANDO IOT E BIM: APLICAÇÃO NO SISTEMA DE
PAREDE DE CONCRETO MOLDADO IN LOCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Dayana Bastos Costa

Coorientador: Prof. Dr. Emerson de Andrade Marques
Ferreira

Agência Financiadora: FEP-Gráfico

Salvador

2021

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Araújo, Caroline Silva

SISTEMA PARA RASTREAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS
FÍSICOS INTEGRANDO IOT E BIM: APLICAÇÃO NO SISTEMA DE
PAREDE DE CONCRETO MOLDADO IN LOCO / Caroline Silva
Araújo. -- Salvador, 2021.

224 f. : il

Orientadora: Dayana Bastos Costa.

Coorientador: Emerson de Andrade Marques
Ferreira.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil) -- Universidade Federal da Bahia,
Escola Politécnica, 2021.

1. Rastreamento de Recursos Físicos da Construção.
2. Internet das Coisas. 3. Modelagem da Informação da
Construção. 4. Gêmeos Digitais. 5. Canteiro de Obras.
I. Costa, Dayana Bastos. II. Ferreira, Emerson de
Andrade Marques . III. Título.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

CAROLINE SILVA ARAÚJO

APRESENTADA AO MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DA BAHIA, EM 09 DE MARÇO DE 2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof.(a) Dr.(a) **Dayana Bastos Costa**

Orientadora

PPEC-UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Emerson de Andrade Marques Ferreira**

Coorientador

PPEC-UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Alírio Santos de Sá**

PPGM-UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Regina Coeli Ruschel**

PPGATC- UNICAMP

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por ter me permitido dar cada passo até aqui e por sempre estar presente na minha vida.

Aos meus pais, Antônio Carlos e Nad Neuza e, e às minhas avós, Anunciada e Áurea, pelo amor incondicional e pelo apoio infinito em todos os momentos em que precisei. Obrigada por todo o carinho e cuidado, vocês são a minha base e a minha referência. À minha irmã, Carla Araújo, pelo amor, pela parceria e por sua enorme importância na minha vida.

À minha orientadora, Profa. Dayana Bastos Costa, que é uma referência diária de dedicação e competência. Agradeço muito pela confiança ao aceitar me orientar, pelo constante incentivo ao meu crescimento e por todo o esforço feito para nortear e viabilizar o desenvolvimento deste trabalho da melhor maneira possível.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Emerson de Andrade Marques Ferreira, pela grande oportunidade de evolução que me foi dada desde o meu ingresso como bolsista na Iniciação Científica, por sempre acreditar na minha capacidade de crescer e por todo o esforço dedicado à orientação deste trabalho desde o início.

À empresa participante desse projeto, por financiar a bolsa de estudos que permitiu o desenvolvimento da pesquisa, por disponibilizar os canteiros de obras e por oferecer o suporte técnico necessário nas etapas de campo. Agradeço também aos profissionais que participaram de alguma forma do estudo e que gentilmente compartilharam seu tempo e experiência.

Aos bolsistas Beatriz Souza, Julio Santos, Yago Martins e Sara Santana pelo grande esforço e dedicação ao projeto, por todo o suporte dado ao longo do desenvolvimento do sistema, tornando possível a sua conclusão, e pela troca de conhecimentos que me proporcionaram ao longo da jornada. Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e ao Programa Institucional de Bolsas de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI).

Aos demais membros da minha família, por acreditarem em mim e por torcerem com a alegria pelas minhas conquistas.

Aos meus queridos amigos de sempre e aos colegas da UFBA, por tornaram o caminho mais leve e feliz. Em especial, agradeço a todos os membros do GETEC pelo apoio e carinho, agradeço ao meu grupo do IFBA, Juliana, Jade, Paulinha e Rafael, pelo amor de sempre e agradeço aos companheiros desde a graduação, André, Lara, Brenda, Acacia, Paula e Lauro.

Agradeço também à Leandro Cândido, Ana Clara Batista e Bruno Lima, por terem participado e dado contribuições no início dos estudos que originaram este trabalho.

Agradeço a todos os professores que passaram pelo meu caminho contribuindo para a minha formação como profissional e como ser humano.

RESUMO

No canteiro de obras, diferentes recursos físicos (pessoal, equipamentos e materiais) interagem entre si durante a produção. Nos processos tradicionais de rastreamento destes recursos, muitas vezes as informações são coletadas em campo através de métodos manuais baseados em papel ou com baixo nível de integração com os sistemas de gestão e controle das obras. Tais métodos apresentam baixa confiabilidade e consomem tempo e esforço humano. Tecnologias associadas à Indústria 4.0 e Construção 4.0 podem trazer melhorias nesse sentido. O objetivo principal desse estudo é propor um sistema para rastrear recursos físicos no canteiro de obras meio da integração da Internet das Coisas (IoT) com a Modelagem da Informação da Construção (BIM), visando facilitar o gerenciamento das formas metálicas do sistema construtivo de paredes de concreto moldadas in loco. Os objetivos específicos do estudo são: (a) identificar in loco as características físicas, funcionais e de movimentação das formas; (b) identificar requisitos para o desenvolvimento de um sistema com IoT e RFID associados ao BIM para rastrear recursos físicos na obra; (c) desenvolver um protótipo de sistema para facilitar o processo de coleta, armazenamento e gerenciamento dos dados necessários para rastrear as formas, visando melhorias na qualidade das paredes geradas; (d) avaliar o sistema, considerando o seu desempenho e os requisitos dos cliente, a partir de implementação piloto na obra. A estratégia escolhida para conduzir a pesquisa é a Design Science Research (DSR), incluindo as seguintes etapas: (a) Conscientização - revisão da literatura e entendimento do problema teórico e do problema prático; (b) Sugestão - mapeamento e diagnóstico para rastreamento das formas, estudo dos requisitos do sistema, especificações das ferramentas e equipamentos e construção de protótipos; (c) Desenvolvimento - criação de um Gêmeo Digital, criação de um aplicativo, estudo de campo com testes e implementação piloto do sistema no canteiro de obras; (d) Avaliação - medição do desempenho do sistema e análise de requisitos do cliente, considerando a implementação piloto; (e) Conclusão - considerações finais sobre o estudo e a comunicação dos resultados. Como principal resultado, o sistema foi desenvolvido e avaliado com sucesso, em nível de protótipo funcional, sendo capaz de envolver o processo de coleta, armazenamento, gerenciamento e visualização de dados, integrando o Gêmeo Digital ao Aplicativo. As principais contribuições práticas envolvem a preservação da integridade e vida útil das formas, apoio à sequência de montagem, identificação de desvios e melhorias na qualidade das paredes. Concluiu-se que o sistema tem potencial para auxiliar em tomadas de decisão e apoiar a gestão e controle de recursos físicos, representando uma solução relevante para o setor da construção.

Palavras-chave: Recursos Físicos. Rastreamento. IoT. BIM. Gêmeos Digitais.

ABSTRACT

At the construction site, different physical resources (personnel, equipment, and materials) interact with each other during production. In traditional tracking of these resources, information is usually collected on-site through paper-based manual methods or with a low integration level with the production management and control systems. Such methods present low reliability and consume human time and effort. Technologies associated with Industry 4.0 and Construction 4.0 can bring improvements in this regard. The main goal of this study is to propose a system to track physical resources on-site through the integration of the Internet of Things (IoT) with Building Information Modeling (BIM), aiming to facilitate the management of the metallic formworks in the cast-in-place concrete wall constructive system. The specific goals are: (a) identify in loco the physical, functional, and movement characteristics of the formworks; (b) identify requirements for the development of a system with IoT and BIM, to track physical resources on construction site; (c) develop a system prototype to facilitate the process of collecting, storing, and managing the necessary data to track the formworks, aiming to improve the quality of the generated walls; (d) to evaluate the system considering its performance and the client's requirements, from the pilot implementation on site. The strategy to conduct the research is Design Science Research (DSR), including the following steps: (a) Awareness - literature review and understanding of the theoretical problem and the practical problem; (b) Suggestion - mapping and diagnosis for tracking the formworks, the study of system requirements, tools and equipment specifications and construction of prototypes; (c) Development - the creation of a Digital Twin, the creation of a mobile app, on-site study with tests and pilot implementation of the system at the construction site; (d) Evaluation - measurement of system performance and analysis of customer requirements, considering the pilot implementation; (e) Conclusion - final considerations about the study and the communication of results. As a main result, the system was successfully developed and evaluated, at the functional prototype level, involving the data collection, storage, management, and visualization process, integrating the Digital Twin into the mobile app. The main contributions were related to preserving the integrity and useful life of the formworks, supporting the assembly sequence, identifying deviations, and promoting improvements in the quality of the walls. The system showed the potential to support decision-making and promote improvements concerning physical resources management and control, representing a relevant solution for the construction sector.

Keywords: Physical Resources. Tracking. IoT. BIM. Digital Twins.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Caracterização de uma forma metálica de alumínio.	22
Figura 2 - Evolução tecnológica da Indústria 3.0 para a Indústria 4.0.	28
Figura 3 - Papel dos Ecossistemas Digitais na Construção 4.0.	31
Figura 4 - A evolução no número de dissertações e teses sobre IoT publicadas por ano no Brasil.	33
Figura 5 - Evolução em fases para a Internet do Futuro de Coisas e Pessoas.	34
Figura 6 - Arquitetura IoT.	36
Figura 7 - Elementos principais necessários para construção da IoT.	37
Figura 8 - Leitor e <i>tag</i> , os principais componentes de sistemas RFID.	43
Figura 9 - <i>Layout</i> básico das <i>tags</i> , dispositivo de transporte de dados RFID.	44
Figura 10 - Características de frequência para sistemas RFID.	46
Figura 11 - Fase do ciclo de vida e dimensão de aplicação do presente estudo.	58
Figura 12 - Relação entre conceitos do Capítulo 2.	58
Figura 13 - Ciclo do controle de desempenho na produção.	60
Figura 14 - Principais componentes de um Gêmeo Digital.	63
Figura 15 - Classificação conceitual do BIM com relação aos Gêmeos Digitais.	65
Figura 16 - APIs de ferramentas BIM em conjunto com banco de dados relacional.	68
Figura 17 - Sistema proposto de rastreamento centralizado em Computação em Nuvem. ...	76
Figura 18 - Sistema proposto de localização interna.	78
Figura 19 - Estrutura Conceitual.	82
Figura 20 - Principais conceitos da Design Science.	84
Figura 21 - Fluxo de conhecimento, fases do processo e resultados previstos na DSR.	85
Figura 22 - Delineamento da Pesquisa.	87
Figura 23 - Ilustração do empreendimento da Obra A.	88
Figura 24 - Ilustração do empreendimento da Obra B.	89
Figura 25 - Ilustração do empreendimento da Obra C.	89
Figura 26 - Delineamento da RSL.	94
Figura 27 - Estrutura conceitual preliminar do sistema integrado.	98
Figura 28 - Sistema RFID (esquerda) e sistema completo com gateway desenvolvido (direita).	99
Figura 29 - Leitor RFID modelo I300 UHF e indicadores do painel para interação com usuário.	102
Figura 30 - Informações para utilização do leitor RFID modelo I300 UHF.	103
Figura 31 - <i>Tags</i> RFID modelo UHF Ironside Slim.	105
Figura 32 - Estrutura geral do sistema.	109

Figura 33 - Módulos principais do aplicativo.	110
Figura 34 - Representação do Gêmeo Físico e do Gêmeo Digital.	112
Figura 35 - Leitura das <i>tags</i> em campo.	113
Figura 36 - Sequência de leitura definida no apartamento estudado.	113
Figura 37 - Treinamento dos dois prováveis operadores do sistema.	115
Figura 38 - Apresentação do sistema para equipe da obra.	115
Figura 39 - Etapas mapeadas do processo construtivo de paredes de concreto.	122
Figura 40 - Sequência de movimentação de cada jogo de formas na obra.	124
Figura 41 - Problema da exposição às intempéries.	126
Figura 42 - Problemas de desgaste devido ao uso.	126
Figura 43 - Problemas com a montagem das formas em sequência incorreta.	126
Figura 44 - Problemas em componentes das placas e ilustração da retirada das placas das lajes.	127
Figura 45 - Problemas com desvios de formas.	127
Figura 46 - Possíveis consequências dos problemas identificados.	129
Figura 47 - Estrutura geral para criação do Gêmeo Digital.	130
Figura 48 - Modelo BIM no Revit com as formas.	131
Figura 49 – Estrutura Lógica adotada no estudo.	132
Figura 50 - Parâmetros de Agrupamento e Numeração Sequencial da Forma no Revit. ...	133
Figura 51 - Representação 2D e 3D no Visualizador do Forge.	134
Figura 52 - Extensão para acompanhamento do progresso da obra.	135
Figura 53 - Simulação da evolução da obra conforme a movimentação das formas.	136
Figura 54 - Simulação da evolução da obra com mudança de cor.	136
Figura 55 - Extensão que apresenta a <i>Dashboard</i> com informações das formas.	137
Figura 56 - Extensão que exibe o estado de manutenção das formas.	138
Figura 57 - Modelo derivado hospedado na Web através do Heroku.	139
Figura 58 - Etapas gerais para desenvolvimento do aplicativo.	140
Figura 59 - Visão geral do funcionamento do aplicativo.	141
Figura 60 - Visão geral do banco de dados no Firebase.	143
Figura 61 - Visão geral das ramificações do banco de dados.	143
Figura 62 - Banco de dados local do dispositivo móvel.	144
Figura 63 - Fixação mecânica das <i>tags</i> nas formas metálicas.	145
Figura 64 - <i>Tags</i> fixadas (esquerda) e captura de dado com leitor (direita).	145
Figura 65 - Cadastro manual das formas (esquerda) e documento preenchido (direita). ...	146
Figura 66 - Plano de leitura para captura das sequências no Obra C.	147
Figura 67 - Lista de formas, consultada a partir da função Alterar Cadastro, e exemplo de alteração.	149
Figura 68 - Inspeção e registro de defeitos.	150

Figura 69 - Exemplo de interferências na coleta de dados.....	151
Figura 70 - Procedimento de captura de sequências reais de montagem das formas em campo.....	152
Figura 71 - Gêmeo Digital na etapa de testes.....	154
Figura 72 - Exemplo de forma cadastrada no Firebase.....	155
Figura 73 - Serviço de tratamento interno, com fechamento das aberturas deixadas pelas faquetas e lixamento.....	157
Figura 74 - Serviço de tratamento interno, retrabalho para regularização.....	158
Figura 75 - <i>Tag</i> perdida.....	159
Figura 76 - <i>Tags</i> comprometidas.....	159
Figura 77 - <i>Tag</i> parcialmente coberta de concreto.....	160
Figura 78 - Desgaste externo (esquerda) e desgaste interno (direita).....	161
Figura 79 - Sequência de montagem incorreta vista no aplicativo (esquerda) e no campo (direita).....	163
Figura 80 - Gêmeo Digital (esquerda) e gêmeo físico (direita).....	163
Figura 81 - <i>Dashboard</i> para forma no aplicativo.....	164
Figura 82 - Visualização da extensão do estado de manutenção das formas no aplicativo.....	165
Figura 83 - Módulo de Qualidade.....	166
Figura 84 - Avaliação da adequação da infraestrutura física.....	167
Figura 85 - Avaliação de interferências e riscos.....	168
Figura 86 - Avaliação da generalização.....	170
Figura 87 - Avaliação da qualidade no fornecimento de informações.....	171
Figura 88 - Avaliação da simplicidade e rapidez no entendimento das informações.....	172
Figura 89 - Avaliação de benefícios.....	173
Figura 90 - Avaliação de adequação às necessidades da empresa.....	175
Figura 91 - Avaliação de acessibilidade.....	176
Figura 92 - Desenho e parametrização das formas no Revit.....	206
Figura 93 - Padronização seguida na criação de parâmetros.....	207
Figura 94 - Cotas criadas nas formas com deslocamentos travados.....	208
Figura 95 - Atribuição de parâmetros de identidade no Revit.....	208
Figura 96 - Criação de novo bucket no Forge.....	209
Figura 97 - Variável “persistent” inserida para permitir visualização contínua do modelo...	210
Figura 98 - Alteração de parâmetro de tamanho limite para <i>upload</i> de arquivo.....	210
Figura 99 - Identificação de URN do modelo.....	211
Figura 100 - Configurações feitas para habilitar o uso do leitor no sistema.....	215

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição dos principais elementos necessários para a construção da IoT.....	38
Quadro 2 - Redes de Internet para conectividade da IoT.....	39
Quadro 3 - Características técnicas de redes de Internet para conectividade da IoT.....	39
Quadro 4 - Descrição das principais das APIs do Autodesk Forge.	56
Quadro 5 - Lista dos 16 trabalhos na amostra final.....	73
Quadro 6 - Grupos definidos e termos de pesquisa definidos em língua inglesa.	92
Quadro 7 - Resumo de visitas técnicas realizadas na fase de Conscientização na Obra A.	94
Quadro 8 - Resumo de visitas técnicas realizadas na fase de Sugestão na Obra B.	96
Quadro 9 - Principais características técnicas do leitor RFID selecionado.....	103
Quadro 10 - Principais características técnicas da <i>tag</i> de RFID selecionada.....	104
Quadro 11 - Características principais do Firebase.	105
Quadro 12 - Resumo das ferramentas selecionadas.	108
Quadro 13 - Resumo de visitas técnicas realizadas na fase de Desenvolvimento na Obra C.	116
Quadro 14 - Constructos, variáveis e fontes de evidência para avaliação do artefato.	118
Quadro 15 - Roteiro de entrevistas.	119
Quadro 16 - Problemas encontrados nas etapas do mapeamento do processo.	128
Quadro 17 - Tempo médio de leitura na etapa de testes.	153
Quadro 18 - Resumo com pontos positivos e oportunidades de melhoria.	155
Quadro 19 - Duração de atividades do serviço de tratamento interno.....	157
Quadro 20 - Quantidade de <i>tags</i> danificadas por cômodo.	159
Quadro 21 - Defeitos registrados.....	160
Quadro 22 - Tempo médio de leitura na etapa de implementação.....	162
Quadro 23 - Potencial de tomada de decisão por módulo do sistema.	166
Quadro 24 - Avaliação do nível de precisão das leituras, de latência e de confiabilidade dos dados.....	169
Quadro 25 - Dificuldades Identificadas pelos entrevistados para implementação do sistema na empresa.....	174
Quadro 26 - Comentários finais dos entrevistados.	176
Quadro 27 - Documento de referência com cadastro manual das formas.	212
Quadro 28 - Descrição da interface do aplicativo.	216

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AECO	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações
API	Interfaces de Programação de Aplicações
BIM	Modelagem da Informação da Construção
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CAD	Projeto Auxiliado por Computador
CDE	Ambiente de Dados Comum
DSR	<i>Design Science Research</i>
EPC	Código Eletrônico de Produto
FM	Gerenciamento de Facilities
FVS	Ficha de Verificação de Serviço
GETEC	Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das Construções
GPS	Sistema de Posicionamento Global
GUID	Identificador Exclusivo Global
UUID	Identificador Exclusivo Global
HCI	Interação Humano-Computador
HF	<i>High Frequency</i>
IaaS	Infraestrutura como Serviço
ID	Identificação/Identidade
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
INS	Navegação Inercial
IoE	Internet de Energia
IoM	Internet de Mídia
IoP	Internet de Pessoas
IoS	Internet de Serviços
IoT	Internet das Coisas
ISO	<i>International Standards Organization</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LF	<i>Low Frequency</i>

M2M	Interação Máquina-Máquina
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
NIBS	<i>National Institute of Building Sciences</i>
ODBC	<i>Open Database Connectivity</i>
PaaS	Plataforma como Serviço
PDA	Assistente Digital Pessoal
PIBIC	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica
PIBITI	Programa Institucional de Bolsas de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação
RA	Realidade Aumentada
RDF	<i>Resource Description Format</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SaaS	Software como Serviço
SBE	<i>Smart Built Environment</i>
SFTP	<i>Secure File Transfer Protocol</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TI	Tecnologia da Informação
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
URN	<i>Uniform Resource Name</i>
UWB	Banda Ultra-larga
WebGL	<i>Web Graphics Library</i>
WLAN	Rede Local sem Fio
WSN	Rede de Sensores Sem Fio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	16
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	18
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	19
1.4	QUESTÕES DE PESQUISA	24
1.4.1	Questão Principal	24
1.4.2	Questões Secundárias	24
1.5	OBJETIVOS DA PESQUISA	24
1.5.1	Objetivo Principal	24
1.5.2	Objetivos Secundários	24
1.6	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	25
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2	A CONSTRUÇÃO CIVIL NA INDÚSTRIA 4.0	27
2.1	INDÚSTRIA 4.0	27
2.2	CONSTRUÇÃO 4.0	29
2.3	INTERNET DAS COISAS (IoT)	32
2.3.1	Conceitos e Definições da IoT	34
2.3.2	Arquitetura	36
2.3.3	Elementos para Construção da Funcionalidade	37
2.3.4	Conectividade	38
2.3.5	Dispositivos Inteligentes	40
2.3.6	Monitoramento e Controle de Espaços Físicos com Dispositivos Inteligentes	41
2.3.7	Desafios para Utilização da IoT	48
2.3.8	Computação em Nuvem e Big Data	49
2.4	MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO (BIM)	50
2.4.1	Conceitos e Definições do BIM	51
2.4.2	Modelagens Paramétricas	52
2.4.3	Escalabilidade	53
2.4.4	Interoperabilidade	53
2.4.5	Extensibilidade	54
2.4.6	Plataforma para Ecossistemas Digitais baseadas em BIM	55
2.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO 2	57
3	INTEGRAÇÃO DE IOT E BIM	59
3.1	GERENCIAMENTO E CONTROLE DE OBRAS	59
3.2	GÊMEOS DIGITAIS	62

3.2.1	Gêmeos Digitais na Construção 4.0	63
3.2.2	Métodos para Integração de IoT e BIM	67
3.2.3	Classes de Problemas e Séries de Usos dos Modelos da Integração IoT e BIM	71
3.3	RASTREAMENTO DE RECURSOS FÍSICOS EM CANTEIROS DE OBRA	72
3.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO 3 E ESTRUTURA CONCEITUAL	81
4	MÉTODO DE PESQUISA	83
4.1	ESTRATÉGIA DE PESQUISA	83
4.2	DELINEAMENTO DA PESQUISA	87
4.2.1	Caracterização da Empresa e das Obras	88
4.3	FASE DE CONSCIENTIZAÇÃO	90
4.3.1	Revisão Exploratória da Literatura	91
4.3.2	Revisão Sistemática da Literatura (RSL)	91
4.3.3	Visitas Iniciais em Campo	94
4.4	FASE DE SUGESTÃO	95
4.4.1	Mapeamento e Diagnóstico para Rastreamento das Formas	95
4.4.2	Estudo dos Requisitos do Sistema Integrado	97
4.4.3	Especificações das Ferramentas	101
4.5	FASE DE DESENVOLVIMENTO	108
4.5.1	Desenvolvimento do Sistema Integrado	109
4.5.2	Testes e Implementação do Sistema Integrado em Campo	112
4.6	FASE DE AVALIAÇÃO	117
4.7	FASE DE CONCLUSÃO	120
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	121
5.1	RESULTADOS DAS FASES DE CONSCIENTIZAÇÃO E SUGESTÃO	121
5.1.1	Mapeamento de Processo do Sistema Construtivo de Paredes de Concreto	121
5.1.2	Diagnóstico para as Formas Metálicas	125
5.2	RESULTADOS DA FASE DE DESENVOLVIMENTO	130
5.2.1	Estrutura do Gêmeo Digital	130
5.2.2	Modelo BIM	131
5.2.3	Modelo Derivado	133
5.2.4	Hospedagem	139
5.2.5	Estrutura do Aplicativo	140
5.2.6	Banco de Dados	142
5.2.7	Estudo de Campo Piloto	145
5.3	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO SISTEMA	167
5.3.1	Constructo Funcionalidade	167

5.3.2	Constructo Transparência.....	170
5.4	AVALIAÇÃO DE REQUISITOS DO CLIENTE	172
5.4.1	Constructo Utilidade.....	172
5.4.2	Constructo Usabilidade.....	175
5.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	177
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	182
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	185
	REFERÊNCIAS	187
	APÊNDICE 1 – ROTEIRO PARA VISITA AO CANTEIRO DE OBRAS.....	199
	APÊNDICE 2 – ROTEIRO PARA VISITA AO GALPÃO	202
	APÊNDICE 3 – PERGUNTAS DO QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO.....	203
	APÊNDICE 4 – CRIAÇÃO DAS FORMAS METÁLICAS VIRTUAIS E DE PARÂMETROS de identidade.....	206
	APÊNDICE 5 – PROCEDIMENTOS NO FORGE E NA PROGRAMAÇÃO PARA CRIAR GÊMEO DIGITAL	209
	APÊNDICE 6 – FORMAS CADASTRADAS NA OBRA C.....	212
	APÊNDICE 7 – MANUAL DO USUÁRIO DO APLICATIVO.....	215
	ANEXO A - DIRETRIZES ADOTADAS NA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SOBRE IOT NO BRASIL	224

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O canteiro de obras é um ambiente dinâmico e complexo que envolve uma grande quantidade e diversidade de recursos físicos (pessoal, equipamentos e materiais) em seus processos produtivos, o que implica na necessidade de procedimentos de gestão cada vez mais eficientes e transparentes (PARK; KIM; CHO, 2016; PARK; SHO; AHN, 2016; OLIVEIRA; SERRA, 2017). O uso de métodos de rastreamento e gerenciamento de recursos físicos no canteiro tem como objetivo gerar informações, aumentar o controle sobre os processos construtivos e, conseqüentemente, trazer melhorias em termos de produtividade e segurança (PARK; SHO; AHN, 2016).

No entanto, na abordagem de rastreamento usualmente adotada pelas empresas, os dados são coletados a partir de métodos manuais, baseados em papel ou com baixo nível de integração. Esses métodos costumam apresentar baixa confiabilidade e consumir tempo e esforço humano, resultando em problemas como atrasos, componentes ausentes, instalações incorretas, manutenções inadequadas, custos adicionais e perda de produtividade (AKANMU; ANUNMA; MESSNER, 2012; DEMIRALP; GUVEN; ERGEN, 2012; OLIVEIRA; SERRA, 2017). Esse contexto justifica a necessidade de substituir ou aperfeiçoar os métodos convencionais para que seja possível fornecer aos gestores informações mais rápidas, oportunas e precisas (DEMIRALP; GUVEN; ERGEN, 2012).

Tecnologias desenvolvidas nos últimos anos apoiam a substituição dos métodos convencionais quando adicionadas ao modelo de gestão das obras (OLIVEIRA; SERRA, 2017). As Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) interdisciplinares têm sido cada vez mais usadas no atual cenário da Indústria 4.0 para permitir a digitalização, automação e integração ao longo de toda a cadeia de valor da construção (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016). O termo Construção 4.0 também tem ganhado força nesse contexto da construção. Oesterreich e Teuteberg (2016) identificaram na literatura que a Internet das Coisas (IoT), a Modelagem da Informação da Construção (BIM) e a Computação em Nuvem são temas tecnológicos centrais na Indústria 4.0 do ponto de vista da construção civil.

A IoT pode ser definida como uma rede mundial de objetos interconectados e exclusivamente endereçáveis com base em protocolos padronizados de comunicação (INFSO D.4 NETWORKED ENTERPRISE & RFID INFSO G.2 MICRO & NANOSYSTEMS, 2008), ou seja, todos os objetos interconectados devem possuir identificação, localização e funcionalidades únicas (GUBBI *et al.*, 2013). Essa rede mundial surgiu para permitir que todos os dispositivos

reais ou virtuais existentes no cotidiano humano se comuniquem através da Internet em tempo real (tempo hábil do ponto de vista computacional) (ISIKDAG, 2015).

O alcance da IoT aumentou nos últimos anos devido à oferta de dispositivos de baixo custo no mercado e devido à própria evolução da Internet (THAMES; SCHAEFER, 2016). A Identificação por Rádio Frequência (RFID) é uma das principais tecnologias ativadoras da IoT (GUBBI *et al.*, 2013) e o seu desenvolvimento serviu como base para constituir a IoT da forma como é conhecida hoje (SUNDMAEKER *et al.*, 2010).

RFID é uma tecnologia de identificação cujos sistemas de leitura são capazes de discernir diferentes *tags* alocadas em elementos que estejam situados em uma mesma área sem necessariamente ter assistência humana (WANT, 2006). É possível aplicar RFID para diversos fins, como controle de itens de almoxarifado, localização de materiais e pessoas, controle de produtos, veículos e pessoas, identificação de ferramentas e identificação de animais (OLIVEIRA; SERRA, 2017). Comparada às outras tecnologias de localização interna, a RFID chama a atenção de pesquisadores e profissionais da construção devido ao seu nível de maturidade tecnológica, infraestrutura relativamente econômica (FANG *et al.*, 2016) e funcionalidade eficaz também em ambientes externos (AKANMU; ANUNMA; MESSNER, 2012).

Segundo Oliveira e Serra (2017), a indústria da construção civil tem mostrado interesse em utilizar RFID em processos da sua cadeia produtiva, indicando que existe uma demanda de mercado. Porém, o desconhecimento a respeito do potencial de uso desta tecnologia é um fator que ainda limita a sua implantação em grande escala (OLIVEIRA; SERRA, 2017). A tecnologia RFID tem sido utilizada, por exemplo, no rastreamento e gerenciamento de componentes nas cadeias de suprimentos da construção (DEMIRALP; GUVEN; ERGEN, 2012). O uso de ferramentas adequadas para visualização e contextualização dos dados coletados no processo de rastreamento pode gerar impactos significativos na conclusão bem-sucedida das obras (CHENG; TEIZER, 2010). Nesse sentido, os componentes físicos da construção identificados com *tags* RFID podem ser vinculados ao BIM (TANG *et al.*, 2019).

O BIM tem beneficiado a construção civil devido a sua capacidade de produzir modelos virtuais multidimensionais cada vez mais precisos para representar a realidade, os quais facilitam a comunicação e a colaboração entre proprietários, arquitetos, consultores, contratados, fabricantes e operadores, promovendo o desenvolvimento de projetos mais integrados e eficientes (EASTMAN *et al.*, 2011). Os sistemas BIM integrados ao RFID permitem visibilidade e rastreabilidade de objetos físicos gerando informações que podem ser atualizadas e vinculadas automaticamente ao modelo virtual “conforme construído” (XUE *et al.*, 2018). Estes sistemas melhoram significativamente a eficiência na comunicação e coordenação entre os gestores e as equipes de campo na fase de construção (FANG *et al.*, 2016).

Embora o BIM seja capaz de fornecer informações valiosas para melhorar a precisão do rastreamento e para auxiliar na interpretação dos resultados, estas soluções não têm sido suficientemente exploradas e a maioria das abordagens existentes utiliza BIM na fase de construção apenas para fins de visualização do canteiro de obras (PARK; KIM; CHO, 2016). Segundo Gao *et al.* (2018), os modelos BIM têm potencial para serem utilizados de maneira mais ampla, como Gêmeos Digitais do ambiente construído, fornecendo um contexto espacial adequado para os dados provenientes da IoT.

Há ainda uma tendência recente de usar o BIM na Nuvem para receber o volume de dados coletados pela infraestrutura do RFID com mais eficiência (XUE *et al.*, 2018). A Computação em Nuvem se refere ao conjunto que contempla aplicações disponibilizadas como serviços através da Internet, bem como os *hardwares* e *softwares* mantidos por *datacenters* para fornecer esses serviços, de modo que os usuários finais possam armazenar, acessar e compartilhar dados de forma fácil, segura e remota (ARMBRUST *et al.*, 2009).

O uso de métodos de rastreamento baseados em TIC: (a) permite a disponibilização mais eficientes e transparentes de informações para o planejamento de processos construtivos, (b) colabora para que a tomada de decisões e o controle da produção sejam embasados em dados de acompanhamento que efetivamente correspondem à realidade, e (c) auxilia no acompanhamento de manutenções e vida útil dos elementos rastreados (OLIVEIRA; SERRA, 2017). Desta forma, o presente estudo se baseia no uso da IoT, operacionalizada pela tecnologia RFID, para identificar, rastrear e localizar recursos físicos no canteiro de obras de forma digital, automática e integrada ao BIM, que atua como interface de visualização e contexto espacial.

A relevância do tema proposto se deve principalmente ao caráter inovador relacionado ao **uso integrado das tecnologias** envolvidas, assim como a **integração e interpretação de dados de monitoramento de processos**. Além disto, do ponto de vista prático, existe a importante necessidade de serem desenvolvidos mais estudos relacionados à aplicação destas tecnologias para beneficiar a construção civil, especialmente no contexto brasileiro, visando superar o relativo atraso tecnológico do setor quando comparado a outros setores industriais.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse estudo faz parte do projeto “**BIM 4D/5D: Uso do BIM para integração da orçamentação, planejamento e controle da produção**”, financiado por uma empresa privada parceira do Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das Construções (GE-TEC) do Departamento de Construção e Estruturas e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA), do qual a

presente pesquisadora é integrante. O objetivo geral do projeto é promover o uso do BIM 4D/5D por meio da implementação e avaliação do modelo BIM integrado que abrange os processos de Modelagem BIM, Orçamentação, Planejamento e Acompanhamento da Produção na construção. O projeto é coordenado pela Prof. Dra. Dayana Bastos Costa.

O tema da presente pesquisa foi escolhido para dar continuidade ao Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do curso em Engenharia Civil na UFBA, apresentado no segundo semestre de 2018 pela presente pesquisadora e intitulado “Integração entre modelos físicos e modelos BIM utilizando IoT para aplicação na construção civil”, sob orientação do Prof. Dr. Emerson de Andrade Marques Ferreira. No referido TCC não foi possível desenvolver aplicações da integração de BIM e IoT em estudos de campo. Esta lacuna foi explorada no presente estudo, visando contribuir para a adoção prática dessas tecnologias na construção civil.

A presente pesquisa conta com o apoio de quatro alunos de Iniciação Científica: Beatriz de Jesus (Engenharia Civil), Julio Santos (Engenharia Elétrica), Yago Martins (Engenharia da Computação) e Sara Santana (Engenharia Elétrica), bolsistas do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e do Programa Institucional de Bolsas de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI). Os planos de trabalho dos referidos alunos contemplam o estudo das tecnologias BIM e IoT e todos estão sob a orientação do Prof. Dr. Emerson de Andrade Marques Ferreira.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Apesar das dificuldades para superar o conservadorismo, a indústria da construção civil tem passado por uma transformação digital contínua (TANG *et al.*, 2019). Diversas tarefas relacionadas ao projeto, planejamento, execução, controle da qualidade e gerenciamento agora exigem uma ampla variedade de dados de identificação e localização para garantir o fluxo adequado de informações (FANG *et al.*, 2016). As atividades de engenharia e gerenciamento de construção dependem cada vez mais da visibilidade, rastreabilidade e coordenação contínua de diferentes elementos em um contexto espacial e temporal, dentro e fora do canteiro de obras (XUE *et al.*, 2018).

O rastreamento no canteiro se propõe a permitir a determinação do estado atual de um elemento de interesse a qualquer momento (ZHONG *et al.* 2017). Segundo Park, Sho e Ahn (2016), para apresentar viabilidade de aplicação, um sistema de rastreamento para ambientes internos deve fornecer uma boa capacidade de rastreamento em tempo hábil, infraestrutura mínima, precisão aceitável e uma solução econômica. Segundo Fang *et al.* (2016), também é importante avaliar critérios como facilidade de uso, latência, visualização de dados e compartilhamento remoto das informações. No entanto, as discussões na literatura sobre os sistemas de rastreamento ainda concentram **poucos esforços para estabelecer critérios práticos e**

técnicos visando à implementação. Muitos sistemas de rastreamento também enfrentam o desafio relacionado à ausência de estratégias eficazes para visualizar as informações de um modo que apoie efetivamente a tomada de decisões (FANG et al., 2016).

Segundo Fang *et al.* (2016), embora existam tecnologias amplamente adotadas para rastreamento externo de elementos na obra, a exemplo do Sistema de Posicionamento Global (GPS), a implementação de sistemas robustos de localização interna de recursos da construção continua sendo um grande desafio. Uma das principais vantagens do RFID é que ele funciona bem em ambientes internos e externos (AKANMU *et al.* 2016). Entretanto, apesar das suas vantagens, ainda exista uma **lacuna sobre como rastrear progressivamente o status de espaços e de recursos do canteiro de forma associada ao progresso da construção**, de modo que as informações sejam atribuídas “conforme construído” e não apenas “conforme planejado” (AKANMU *et al.* 2016).

Os estudos sobre a conexão de RFID e BIM para rastreamento ganharam impulso nos últimos anos, como tem sido evidenciado pelo crescente número de publicações (XUE *et al.*, 2018). Xue *et al.* (2018) desenvolveram diretrizes para que profissionais selecionem os sistemas BIM integrados ao RFID visando à aplicação em atividades de engenharia e gerenciamento. De modo geral, as diretrizes compreendem cinco etapas principais: (1) selecionar o sistema RFID, o padrão de visualização do BIM (2D, 3D, na Nuvem, etc.) e o plano de armazenamento dos dados; (2) definir o esquema de codificação de dados no RFID e compatibilizar com esquema de dados do BIM; (3) instalar o sistema RFID em campo; (4) desenvolver um *gateway* para comunicação entre RFID e BIM; e (5) processar e armazenar as informações (XUE *et al.*, 2018). Embora tenham apresentado um estudo de caso na indústria de pré-moldados, os referidos autores destacaram que **mais estudos devem ser realizados para verificar e validar a aplicação das diretrizes em diferentes cenários de construção.**

Com relação à integração de IoT e BIM, Tang *et al.* (2019) destaca que uma conexão de fontes de dados baseadas nessa integração pode oferecer recursos complementares aos projetos de construção que suprem limitações individuais do uso isolado de cada uma dessas tecnologias. Desta forma, segundo Tang *et al.* (2019), o BIM disponibiliza geometria, localização espacial, conjuntos de dados e metadados de alta fidelidade e identificação única de cada componente da construção contido no modelo virtual. Por outro lado, a IoT fornece *status* vindos diretamente da construção ou operação que podem enriquecer as informações já incorporadas no BIM, incluindo dados de posicionamento, medições físicas de elementos e condições climáticas (TANG *et al.*, 2019).

Apesar do potencial, a integração de IoT com BIM é um campo relativamente novo e, por isso, as pesquisas ainda se encontram em estágios iniciais de desenvolvimento (TANG *et*

al., 2019). Segundo Dave *et al.* (2018), **a maioria das soluções propostas sobre o tema possui caráter conceitual** e não foram testadas em projetos reais. Segundo Tang *et al.* (2019), a integração de dispositivos IoT e BIM ainda é incipiente e **a maioria dos estudos apresenta soluções dispersas onde não existe uma estrutura unificada** para integrar os dispositivos e ao mesmo tempo compartilhar as informações pela Internet.

Uma tendência importante identificada por Xue *et al.* (2018) é o crescente uso do BIM na Nuvem como plataforma para receber informações coletadas, por exemplo, por sistemas RFID, o que facilita o desenvolvimento do BIM “conforme construído” e aprimora a visibilidade e rastreabilidade das informações. Uma razão para justificar a baixa adoção atual do BIM na Nuvem (BIM 360, Autodesk Forge, etc.) pode ser a indisponibilidade de acesso à Internet que ocorre em muitas das atividades de engenharia e gerenciamento de construção (XUE *et al.*, 2018). Além disso, as tecnologias de Computação em Nuvem só começaram a ser otimizadas para se adaptar ao BIM muito recentemente, o que prejudicou sua utilização mais ampla (XUE *et al.*, 2018). De acordo com Tang *et al.* (2019), **é essencial desenvolver novos estudos para promover uma exploração adicional da Computação em Nuvem para a integração de IoT e BIM.**

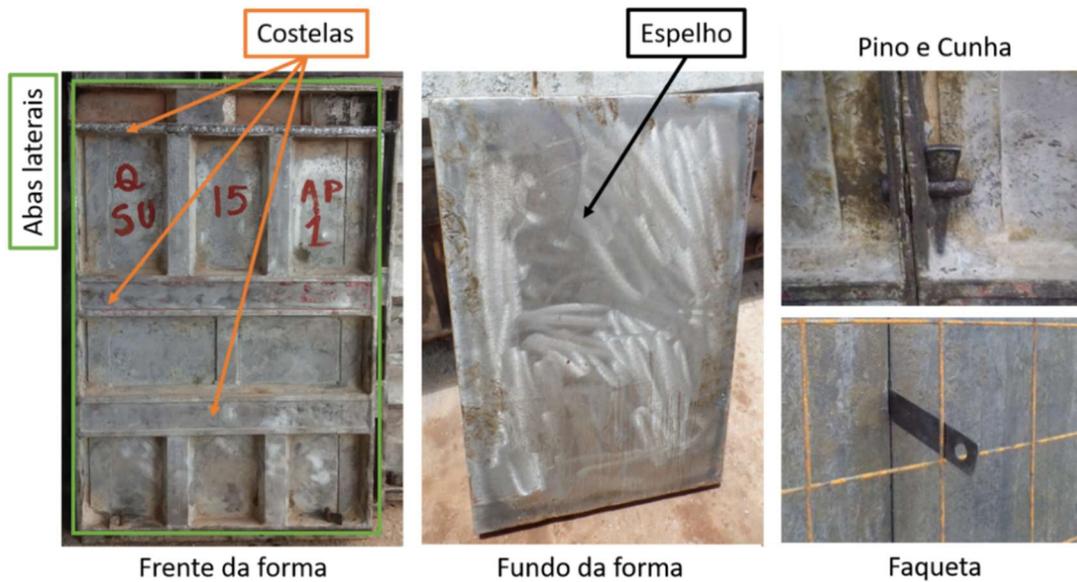
Segundo Tang *et al.* (2019), uma das áreas de aplicação da integração de BIM e IoT é o controle da qualidade. A qualidade é um dos aspectos mais relevantes de um projeto de construção e a inspeção, por sua vez, é a tarefa mais importante realizada no gerenciamento da qualidade, mas existem problemas importantes nesse processo que precisam ser solucionados (MA *et al.* 2018). Como a inspeção geralmente envolve muitos itens de verificação e muitos objetos de destino, alguns deles podem ser acidentalmente ignorados pelos inspetores em campo (MA *et al.* 2018). Além disso, muitas vezes o registro de dados da inspeção é feito manualmente em papel e só depois o resultado é transferido para algum *software* específico, tornando o **processo ineficiente e suscetível a falhas que podem comprometer todo o gerenciamento da qualidade**, principalmente quando também existem ineficiências no processo de comunicação desses resultados entre participantes do projeto (MA *et al.* 2018).

Para reduzir a carga de trabalho dos inspetores e o risco de falhas, muitos pesquisadores se esforçaram para desenvolver abordagens para o gerenciamento da qualidade da construção baseadas em tecnologias de ponta como o BIM (MA *et al.* 2018). Porém, segundo Ma *et al.* (2018), embora as abordagens e técnicas apresentadas pela literatura ofereçam suporte ao gerenciamento da qualidade da construção, permitindo a automação da inspeção ou fornecendo melhorias pontuais na entrada de dados e no fluxo de trabalho, elas não resolvem completamente os problemas mencionados acima.

Ma *et al.* (2018) destacam a **dificuldade de identificar a correspondência entre os elementos no modelo tridimensional do BIM e os objetos no local**, que só pode ser resolvida com o uso integrado de diferentes tecnologias. Nesse sentido, os referidos autores sugeriram integrar o BIM a uma tecnologia de posicionamento interno e desenvolveram um protótipo de sistema baseado em BIM e WLAN/WI-FI, embora o RFID tenha sido considerado uma alternativa que possui desempenho confiável.

Com relação aos recursos físicos, as formas metálicas são objeto de interesse de diversas empresas que lidam com o sistema construtivo de paredes de concreto armado, principalmente no contexto brasileiro de construção de moradias. Este é um sistema monolítico, no qual a estrutura e as vedações são compostas por elementos autoportantes de concreto armado moldado no local (ABNT NBR 16055, 2012). As instalações elétricas e hidráulicas das paredes e lajes, quando embutidas, são fixadas antes da concretagem, além de reforços e detalhes da fachada (ABNT NBR 16055, 2012). As formas metálicas, que são removíveis e moduladas, também são montadas antes da concretagem, de acordo com o projeto arquitetônico e respeitando as aberturas necessárias, como janelas e portas (ABNT NBR 16055, 2012). Os componentes físicos das formas estão indicados na Figura 1.

Figura 1 - Caracterização de uma forma metálica de alumínio.



Fonte: Autora (2021).

As formas possuem dimensões que variam conforme o projeto, cada placa é composta por peças denominadas costelas, abas laterais e espelhos, que podem ser individualmente trocadas ou ajustadas conforme necessidade (por exemplo, após sofrerem danos ou desgaste). A fixação de duas placas que estejam montadas lado a lado é realizada através de duas peças denominadas pino e cunha. A fixação entre uma placa interna e outra externa (com o fundo da primeira forma paralelo ao fundo da segunda, sendo o concreto lançado no

meio) é realizada por meio de peças denominadas faquetas. As formas são recursos físicos que se movimentam pelo canteiro em conformidade com o progresso da obra, sendo deslocadas de pavimento em pavimento seguindo o fluxo do processo de concretagem das paredes de concreto.

Na última década, o uso do sistema construtivo de paredes de concreto armado ganhou força na indústria da construção no Brasil devido ao uso em larga escala do programa social e habitacional “Minha Casa Minha Vida”, criada pelo governo brasileiro para reduzir o déficit habitacional. Algumas das principais vantagens desse sistema construtivo são a redução das etapas da construção, a melhoria da limpeza do canteiro de obras, a redução de resíduos, a produtividade e o aumento da velocidade de execução (NUNES, 2011).

Segundo Fernandes (2020), as obras de parede de concreto apresentam um melhor desempenho ambiental quando comparadas às obras de alvenaria estrutural ou concreto armado moldado *in loco*, incluindo um menor consumo de água e de energia ao final da obra. Com relação a geração de resíduos, as obras de paredes de concreto também alcançaram um valor menor quando comparado à alvenaria estrutural. O bom desempenho provavelmente ocorre porque as obras de parede de concreto são mais industrializadas, apresentam uma maior repetição e pouca variabilidade entre unidades habitacionais, que geralmente são de interesse social (FERNANDES, 2020).

Após a remoção das formas metálicas das paredes de concreto em campo, há um estágio persistente de correção de defeitos em função de problemas de qualidade das paredes e variabilidade da execução de processos. Baseado no estudo de Silveira (2018), os principais problemas práticos no sistema construtivo de paredes de concreto estão relacionados à:

- dificuldade de controlar a qualidade do processo construtivo;
- ocorrência de não conformidade nas paredes visíveis após desforma, como a formação de bicheiras (falhas que consistem em vazios na superfície);
- dificuldade de controlar integridade, vida útil, fixação e sequência de montagem das formas metálicas;
- retrabalho e atraso em função de problemas relacionados a variabilidade e problemas de qualidade da parede.

Existe na literatura uma ausência de estudos sobre o rastreamento de formas metálicas durante a fase de execução das paredes de concreto armado, ou mesmo sobre outros recursos semelhantes (provisórios e móveis). O presente estudo pressupõe que as tecnologias IoT, RFID e BIM, integradas em um sistema e com apoio da Computação em Nuvem, têm o potencial para fazer um rastreamento eficiente e dar suporte aos problemas práticos mencionados. As possíveis melhorias são em termos de qualidade das paredes, integridade e vida útil

das formas metálicas e produtividade em todo o processo. Para validar o caráter prático do trabalho serão realizados estudos em obra visando à implementação do sistema integrado em canteiros da construção civil.

1.4 QUESTÕES DE PESQUISA

1.4.1 Questão Principal

Como rastrear recursos físicos no canteiro de obras através da integração da IoT com o BIM, visando facilitar o gerenciamento das formas metálicas do sistema construtivo de paredes de concreto moldadas *in loco*?

1.4.2 Questões Secundárias

- Quais são as características físicas, funcionais e de movimentação de recursos físicos no canteiro de obras observadas *in loco*, tendo como foco as formas metálicas?
- Quais são os requisitos para desenvolver um sistema unificado capaz de facilitar o processo de coleta, armazenamento e gerenciamento dos dados necessários para rastrear formas metálicas visando melhorias na qualidade das paredes de concreto?
- Como avaliar o protótipo de sistema desenvolvido sob o ponto de vista de desempenho e requisitos do cliente a partir de implementação piloto em obra?

1.5 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.5.1 Objetivo Principal

Este trabalho tem como principal objetivo **propor um sistema para rastrear recursos físicos no canteiro de obras por meio da integração da IoT com o BIM, visando facilitar o gerenciamento** das formas metálicas do sistema construtivo de paredes de concreto moldadas *in loco*.

1.5.2 Objetivos Secundários

- Identificar *in loco* as características físicas, funcionais e de movimentação de recursos físicos no canteiro de obras, tendo como foco as formas metálicas;
- Identificar requisitos para o desenvolvimento de um sistema com IoT e RFID associados ao BIM para rastrear recursos físicos ao longo da obra;
- Desenvolver um protótipo de sistema para facilitar o processo de coleta, armazenamento e gerenciamento dos dados necessários para rastrear formas metálicas visando melhorias na qualidade das paredes de concreto moldadas *in loco*;
- Avaliar o desempenho e atendimento aos requisitos dos clientes do protótipo do sistema proposto a partir de implementação piloto na obra.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Os seguintes fatores delimitam o escopo da pesquisa:

- serão monitoradas apenas as atividades relacionadas às formas metálicas para paredes de concreto moldadas *in loco*;
- no contexto dos diferentes dispositivos para IoT existentes no mercado, a pesquisa limita-se à utilização daqueles que atuam com RFID. A escolha dos dispositivos foi baseada em critérios como a facilidade de uso, o preço e o atendimento aos requisitos técnicos mínimos identificados ao longo da pesquisa;
- não serão avaliadas em todas as etapas as diferentes possibilidades de ferramentas computacionais existentes no mercado. As escolhas das ferramentas foram baseadas em requisitos técnicos mínimos, na facilidade de aquisição e de uso em relação a outras opções disponíveis ou no conhecimento prévio da pesquisadora;
- não serão abordadas questões específicas envolvendo os diferentes protocolos de comunicação para IoT e estruturas de dados e nem caracterizadas todas as diferentes linguagens de programação a serem utilizados ao longo da pesquisa, tendo em vista que o foco é a aplicação.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa está atualmente organizada em cinco capítulos. No **Capítulo 1** o trabalho foi justificado e contextualizado, além de serem apresentados o problema de pesquisa, o problema prático, as questões, os objetivos, as delimitações e a estrutura da pesquisa.

No **Capítulo 2** apresenta-se uma base conceitual considerada necessária para compreensão das tecnologias digitais IoT e BIM, que foram contextualizadas na Indústria 4.0 e na Construção 4.0.

No **Capítulo 3** apresentam-se aspectos da integração de BIM e IoT, onde o Gerenciamento e Controle de Obras é identificado como área geral de aplicação da pesquisa. Após isso, apresenta-se o conceito de Gêmeo Digital e sua aplicação na construção civil. Em seguida, apresenta-se os procedimentos e requisitos relacionados à integração de BIM, IoT e RFID, conforme a literatura.

No **Capítulo 4** indica-se o método de pesquisa, contemplando a estratégia de pesquisa adotada e o delineamento da pesquisa, com a descrição das fases e etapas que foram adotadas.

No **Capítulo 5** os resultados alcançados no presente estudo são apresentados e discutidos, contemplando o mapeamento de processo do sistema construtivo de paredes de concreto, o diagnóstico para as formas metálicas, o sistema integrado (aplicativo) desenvolvido, o estudo de campo piloto e a avaliação dos resultados.

No **Capítulo 6** apresentam-se as principais conclusões do trabalho com base nos resultados alcançados e as recomendações para trabalhos futuros.

2 A CONSTRUÇÃO CIVIL NA INDÚSTRIA 4.0

Neste capítulo são discutidos conceitos e definições necessários para uma compreensão adequada dos temas envolvidos no estudo. Inicialmente, aspectos referentes à Indústria 4.0 e a Construção 4.0 são destacados. Em seguida, uma revisão sobre a IoT é apresentada, incluindo tópicos como arquitetura, elementos necessários para funcionalidade, dispositivos inteligentes e tecnologias habilitadoras como RFID e Computação em Nuvem. Por fim, é apresentada uma revisão sobre o BIM, incluindo aspectos da funcionalidade, interfaces com outras tecnologias e utilização como plataforma para Ecossistemas Digitais.

2.1 INDÚSTRIA 4.0

As revoluções industriais provocaram grandes mudanças e avanços na sociedade. A primeira revolução aconteceu no século XVIII e foi pautada na utilização do vapor como fonte de energia; a segunda aconteceu na virada do século XX e introduziu energia elétrica e linhas de montagem para produção em massa; a terceira trouxe a tecnologia da informação e os computadores para o ambiente de manufatura (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011; MUHURI; SHUKLA; ABRAHAM, 2019). A quarta revolução industrial tem redefinido a maneira como as máquinas se comunicam entre si, desempenham funções individuais e interagem com os seres humanos (BRETTEL *et al.*, 2014; MUHURI; SHUKLA; ABRAHAM, 2019).

Indústria 4.0 é um termo que foi alcunhado em 2011, na Alemanha, para descrever o surgimento de um novo paradigma econômico e industrial, no qual a integração de tecnologias avançadas conectaria o mundo virtual e o mundo real (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011; MUHURI; SHUKLA; ABRAHAM, 2019). O termo costuma ser utilizado hoje em dia para denominar a quarta revolução industrial (MUHURI; SHUKLA; ABRAHAM, 2019). Além disso, este termo também se refere à uma evolução tecnológica dos sistemas embarcados para os Sistemas Cibernético-físicos (CPS), em um processo que contou com o apoio considerável da IoT (MACDOUGALL, 2014; SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020).

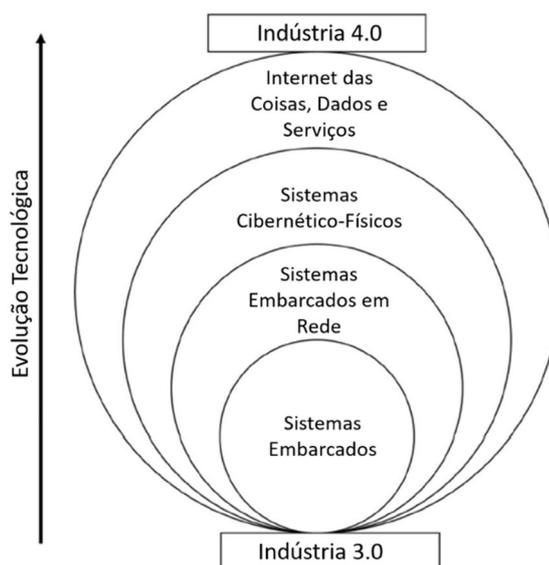
Os sistemas embarcados são projetados para executar funções específicas dedicadas e têm restrições à computação em tempo real (MONOSTORI *et al.*, 2016). Eles têm apoiado o desenvolvimento de soluções inteligentes de automação e são caracterizados pela capacidade de integrar e coordenar computação e processos físicos (MONOSTORI *et al.*, 2016). Partindo dessa concepção individual e hermética (VASEY; MENGES, 2020), a infraestrutura do CPS conta com diversos dispositivos embarcados que são conectados em rede, de modo a permitir a detecção, monitoramento, acionamento e controle de elementos físicos que estejam no mundo real, conforme o grau de maturidade desse CPS (MONOSTORI *et al.*, 2016).

Em geral, os CPS consistem em entidades físicas (dispositivos, máquinas ou prédios, por exemplo) e entidades digitais ou cibernéticas (dados, sistema de *software* e rede de comunicação) interagindo em uma mesma infraestrutura (PISHDAD-BOZORGI; GAO; SHELDEN, 2020). De acordo com Griffor *et al.* (2017), os sistemas inteligentes, interconectados e integrados do CPS geram impactos que são percebidos no surgimento de veículos autônomos, edifícios inteligentes, sistemas de energia inteligentes, robôs e dispositivos médicos inteligentes, entre outros exemplos.

No contexto do CPS, os recursos da IoT possibilitam a criação de uma cópia virtual de um determinado sistema de produção, como um canteiro de obras (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020). Esta cópia pode ser chamada de Gêmeo Digital e deve ser capaz de fornecer ferramentas importantes para diversas finalidades, mas, principalmente, para tomadas de decisão (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020). O conceito de Gêmeo Digital surgiu no início do século 21, mas só agora está alcançando um maior valor no espaço industrial (MATEEV, 2020). Este tema será abordado com mais detalhes no Capítulo 3.

Segundo Griffor *et al.* (2017), existe uma sobreposição conceitual significativa entre CPS e IoT, o que faz com que esses termos sejam muitas vezes utilizados de maneira equivalente. Apesar das semelhanças, Vasey e Menges (2020) indicam que os CPS utilizam a IoT e os sistemas embarcados em seus processos computacionais e físicos, porém, representam uma nova geração de sistemas que se diferenciam por serem mais complexos e estocásticos (VASEY; MENGES, 2020). A Figura 2 indica a jornada da evolução tecnológica em direção à Indústria 4.0, partindo dos sistemas embarcado e alcançando os recursos da IoT e da Internet dos Dados e Serviços (IoS).

Figura 2 - Evolução tecnológica da Indústria 3.0 para a Indústria 4.0.



Fonte: Traduzido de Sawhney, Riley e Irizarry (2020).

O cenário geral estabelecido pela Indústria 4.0 é pautado na tendência de automação, digitalização e uso de TIC no ambiente de produção industrial para estabelecer processos e produtos inteligentes (MACDOUGALL, 2014; BRETTEL *et al.*, 2014; ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016 e OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016). Entre as tecnologias e conceitos relacionados à esse cenário, as principais são: IoT, CPS, Sistemas Embarcados, RFID, Computação em Nuvem, Computação Móvel, Big Data, Fábrica Inteligente, Impressão 3D, Simulação e Modelagem, Modularização, Inteligência Artificial, Realidade Virtual, Realidade Aumentada, Robótica, Impressão 3D, Manufatura Aditiva, Interação Humano-Computador (HCI) e Interação Máquina-Máquina (M2M) (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; ROBLEK; MESKO; KRAPEZ, 2016 e MUHURI, SHUKLA e ABRAHAM, 2019).

Nesse contexto, destaca-se que os avanços técnicos emergentes são utilizados tanto para melhorar continuamente a indústria quanto para lidar com desafios globais (WANG *et al.* 2016). As potenciais melhorias envolvem mudar o padrão e estilo de vida dos seres humanos, fornecer produtos personalizados e de alta qualidade aos consumidores e estabelecer um melhor ambiente de trabalho para os funcionários das indústrias (WANG *et al.* 2016). A Indústria 4.0 pretende gerar processos profundamente integrados de negócios e de engenharia, que tornem a produção mais flexível, eficiente, sustentável, econômica e com alta qualidade (WANG *et al.* 2016).

Os princípios da Indústria 4.0 podem transformar as cadeias de valor da produção e os modelos de negócios (MACDOUGALL, 2014). Esta ideia visionária também tem sido nomeada com alguns sinônimos, como Fabricação Inteligente, Produção Inteligente ou Internet Industrial (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016). Atualmente, a Indústria 4.0 é vista como uma oportunidade de avanço também para a construção civil, criando as bases para um futuro de construções mais industrializadas e automatizadas (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020).

2.2 CONSTRUÇÃO 4.0

Nos últimos anos, têm crescido as expectativas da indústria da construção civil de incorporar inovações tecnológicas para solucionar problemas existentes. Porém, existem alguns desafios específicos a serem considerados, por exemplo, a maneira como as relações entre clientes, subcontratados e outras partes interessadas impactam na sua cadeia de valor (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016). Projetos desenvolvidos na construção exigem um alto nível de conhecimento especializado, pois os empreendimentos são complexos, individuais e baseados no local da obra (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016). A fragmentação no ensino, pesquisa e prática profissional e o conservadorismo no âmbito do ambiente construído também representam desafios críticos (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020).

O termo Construção 4.0 representa uma tentativa de adaptar a Indústria 4.0 para a construção civil (MATEEV, 2020) e uma oportunidade de superar os desafios mencionados e as perdas e ineficiências em termos de processos, fluxos de informações e trabalho colaborativo (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020).

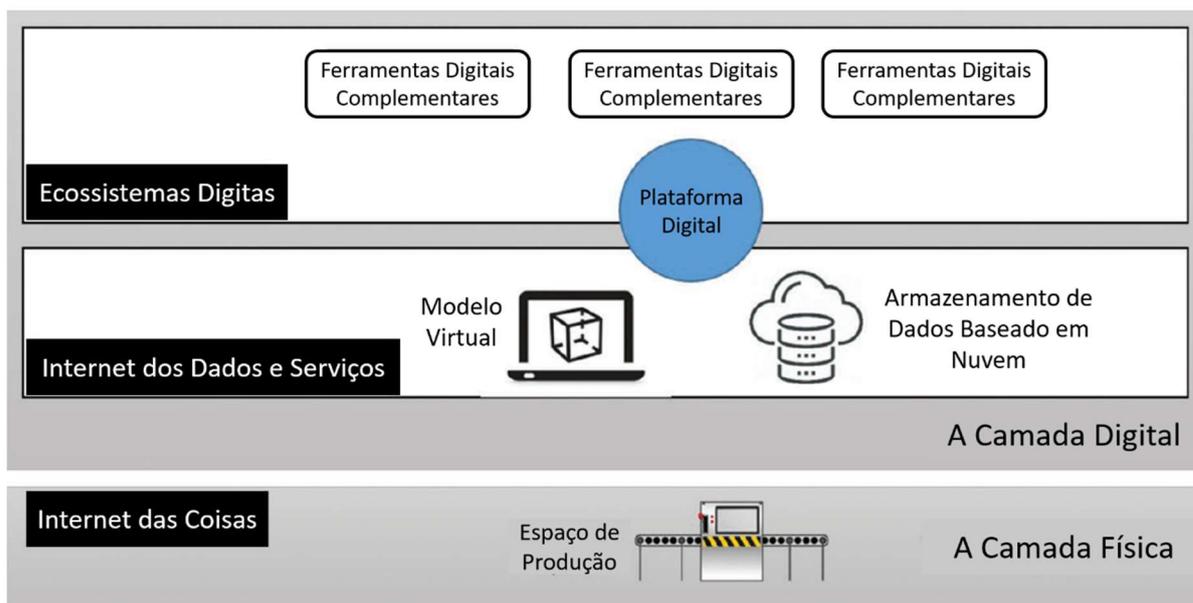
Os princípios da Indústria 4.0 podem ajudar as empresas de construção a reduzir a complexidade e a incerteza, aprimorar a troca de informações e a comunicação entre as partes interessadas no projeto e, desta forma, aumentar a produtividade e a qualidade (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016). A sua adoção pode ainda trazer consideráveis benefícios nas áreas de segurança e sustentabilidade, além de melhorar a longo prazo a imagem da indústria da construção (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016).

Desde que haja os devidos esforços científicos e práticos, a estrutura da Construção 4.0 tem potencial estratégico, tático e operacional para impulsionar a desejada transformação digital da indústria da construção civil (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020), que atualmente se encontra significativamente atrasada com relação a outras indústrias em termos de produção automatizada e nível de digitalização (MATEEV, 2020). Nessa estrutura, CPS e Ecossistemas Digitais são combinados para reformular a maneira como os ativos do ambiente construído são planejados, projetados, construídos e entregues (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020). De acordo com Sawhney, Riley e Irizarry (2020), a convergência de três temas gerais, com suas respectivas tendências transformacionais, formam a base da Construção 4.0. São eles:

- (a) **produção industrial**, incluindo pré-fabricação, impressão e montagem 3D e fabricação externa. A tendência é que os processos industrializados permitam vincular digitalmente a produção ao BIM e a um Ambiente de Dados Comum (CDE), baseado em Computação em Nuvem, de modo a relacionar camadas físicas com camadas digitais;
- (b) **CPS**, incluindo o uso de robôs, cobots e drones, IoT sensores, atuadores. Estes geram transformações à medida que atuam na produção, transporte e montagem, na detecção de informações relevantes sobre objetos físicos ou na conversão de sinais digitais em ações físicas;
- (c) **tecnologias digitais**, incluindo BIM, digitalização de vídeo e laser, IoT, sensores, Inteligência Artificial e Computação em Nuvem, Big Data e análise de dados, captura de realidade, Blockchain, simulação, Realidade Aumentada e etc. Estas tecnologias são suportadas pelos Ecossistemas Digitais, pelos padrões de dados e pela interoperabilidade. Elas auxiliam no processo de entrega e de negócios. BIM e CDE fornecem base necessária para a construção de ferramentas digitais integradas.

Os referidos Ecossistemas Digitais podem ser entendidos como grupos interdependentes formados por empresas, pessoas ou coisas (produtos) que compartilham plataformas digitais padronizadas para se beneficiar mutuamente, criar valor e impulsionar a inovação (GARTNER, 2017, SAWHNEY; ODEH, 2020). Esses ecossistemas já se destacam em diversos setores econômicos, como em sistemas de compartilhamento de carona, aplicativos para celular e redes sociais (SAWHNEY; ODEH, 2020). A Figura 3 ilustra o papel dos Ecossistemas Digitais na Construção 4.0.

Figura 3 - Papel dos Ecossistemas Digitais na Construção 4.0.



Fonte: Traduzido de Sawhney e Odeh (2020).

Conforme a Figura 3, a camada superior desta representação é o Ecossistema Digital, que neste caso consiste em uma plataforma digital principal (plataforma BIM, por exemplo) e ferramentas digitais complementares (SAWHNEY; ODEH, 2020). As diferentes organizações nesse ecossistema trabalham juntas para produzir soluções inovadoras no projeto, construção e entrega (SAWHNEY; ODEH, 2020). Um exemplo desta lógica seria uma empresa de construção que trabalha em conjunto com empreiteiros comerciais e desenvolvedores de *software* para criar uma ferramenta de monitoramento *online* dos trabalhadores de sua obra (SAWHNEY; ODEH, 2020).

A Figura 3 também indica que os CPS utilizam a IoT para conectar a camada física do espaço de produção (canteiro de obras, por exemplo) à camada digital (SAWHNEY; ODEH, 2020). A camada digital é composta pelo modelo virtual equivalente, que poderia ser um modelo tridimensional do BIM, e pelo sistema de armazenamento baseado em Nuvem, que atua como um repositório de dados e informações, seguindo a lógica de um CDE (SAWHNEY; ODEH, 2020).

2.3 INTERNET DAS COISAS (IoT)

A Internet é atualmente o meio de troca de informações mais utilizado no mundo e a sua evolução tem possibilitado à interligação entre as pessoas em uma escala e ritmo sem precedentes (DOMINGUE *et al.*, 2011; GUBBI *et al.*, 2013). Porém, o cenário está mudando e a tendência é que a próxima grande evolução não esteja centralizada apenas em pessoas, mas sim em uma interconexão mais ampla que inclui as “coisas” e que resultará na criação de ambientes inteligentes. De acordo com o paradigma IoT, muitos objetos comuns que rodeiam os seres humanos estarão em breve conectados à rede (GUBBI *et al.*, 2013).

A capacidade de gerar impactos na vida cotidiana e no comportamento dos usuários é o principal fator que tem impulsionado o rápido crescimento da IoT (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). A IoT permite uma completa integração entre soluções de tecnologia e de comunicação, o que só foi possível devido às contribuições que recebeu de diferentes áreas do conhecimento ao longo do seu desenvolvimento, entre as quais podem ser citadas a telecomunicação, a informática, a eletrônica e as ciências sociais (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

Em um futuro próximo os efeitos da IoT poderão alcançar de maneira muito ampla tanto o âmbito doméstico quanto o âmbito profissional de usuários privados (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). Considerando a perspectiva das corporações, as suas consequências poderão ser percebidas em diversos setores do mundo dos negócios, principalmente, no que se refere à automação industrial, logística, gestão e transporte de pessoas e coisas (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). No contexto da construção civil, a consolidação da IoT pode ser vista como uma oportunidade única para impulsionar o desenvolvimento dos edifícios e cidades inteligentes (ISIKDAG, 2015).

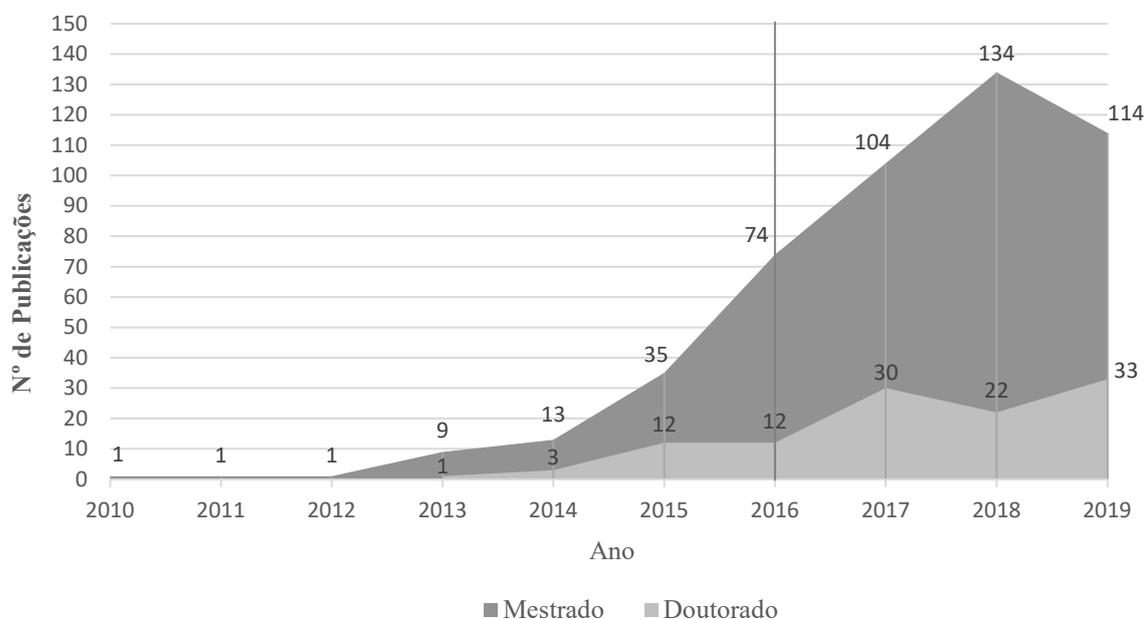
Nos próximos anos, provavelmente a IoT será responsável por construir uma ponte sobre diversas tecnologias para permitir novas aplicações, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida e fazendo com que a economia mundial cresça (AL-FUQAHA *et al.*, 2015). A tendência é que sistemas integrados comecem a reagir de forma autônoma a eventos do mundo real (ou físico), tendo capacidade de influenciar ou atuar na execução de processos, na tomada de ações e na criação de serviços, com ou sem a direta intervenção humana (SUNDMAEKER *et al.*, 2010). Tecnologias como RFID e as redes de sensores e atuadores tendem a evoluir no sentido de atender a estes novos desafios, no qual sistemas de informação e comunicação vão operar “invisivelmente” nos ambientes (GUBBI *et al.*, 2013).

Para investigar o contexto da pesquisa científica sobre IoT no Brasil, Machado (2018) mapeou e identificou 161 dissertações e teses publicadas entre 2010 e 2016. Segundo a referida autora, estas pesquisas se concentram nas áreas de Engenharias (Elétrica, Eletrônica,

Mecânica e correlatas), Ciência da Computação e Informática. Com relação aos domínios de aplicação, a Assistência Médica se destacou com maior número de publicações, mas também foram mapeados estudos com Agricultura Inteligente, Varejo, Cidades Inteligentes, Medição Inteligente, Controle Industrial, Logística e Domótica e Automação Residencial. Também foram encontrados estudos sobre modelos de negócio para implementação da IoT em organizações. Segundo Machado (2018), os números encontrados já indicavam o crescente interesse pelo tema na comunidade científica brasileira

Para ampliar o conhecimento da evolução da IoT no Brasil, o presente estudo mapeou e identificou 437 dissertações e teses publicadas entre 2017 e 2019, complementando os dados de Machado (2018). Conforme descrito no **Anexo A**, foram adotados os mesmos procedimentos metodológicos para levantamento quantitativo e discriminação dos estudos utilizados por Machado (2018), que se baseou na Pesquisa Bibliográfica (GIL, 2010). Os estudos obtidos nesta nova amostra se concentram nas mesmas áreas referidas por Machado (2018), indicadas no parágrafo anterior, embora tenha sido observado uma recorrência de áreas como Administração e Direito voltadas para modelos de negócios e questões de privacidade e ética. A Figura 4 indica o conjunto de dados obtidos por Machado (2018), até 2016, e pelo presente estudo, de 2017 a 2019, em um único gráfico, para facilitar a visualização da tendência de crescimento considerável das publicações sobre IoT ao longo do tempo.

Figura 4 - A evolução no número de dissertações e teses sobre IoT publicadas por ano no Brasil.



Fonte: Adaptado de Machado (2018) para período até 2016 e Autora (2020) para período entre 2017 e 2019.

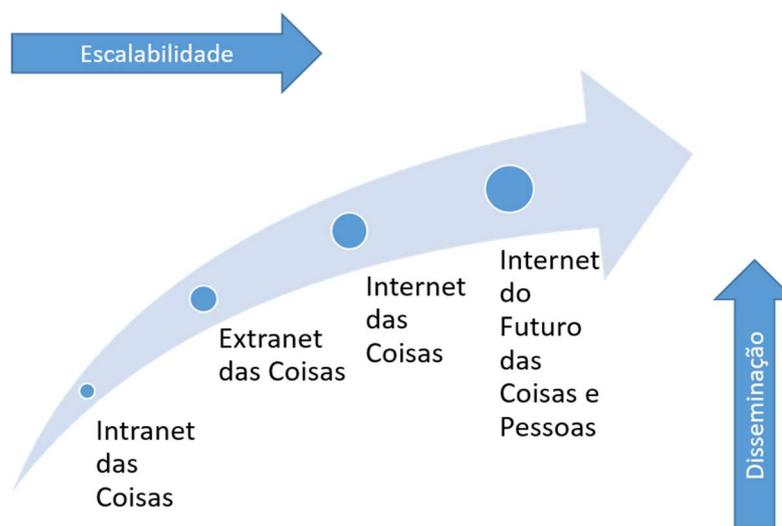
2.3.1 Conceitos e Definições da IoT

O termo “Internet das Coisas” foi empregado pela primeira vez pelos fundadores do grupo de pesquisa Auto-ID Center, do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), destacando-se Kevin Ashton em 1999 e David L. Brock em 2001 (SUNDMAEKER *et al.*, 2010). O grupo foi responsável por dar importantes contribuições para a padronização da tecnologia RFID, além de estudar outras tecnologias de identificação consideradas necessárias para fundamentar o desenvolvimento da IoT como é conhecida hoje (SUNDMAEKER *et al.*, 2010). As primeiras aplicações dessas tecnologias de identificação na indústria estavam associadas a automatização, redução de erros e aumento de eficiência (SUNDMAEKER *et al.*, 2010).

Para falar sobre IoT, é necessário primeiro falar sobre o conceito de Internet do Futuro. Embora a Internet atual tenha sido muito bem-sucedida como um meio onipresente e universal de comunicação e computação, existem diversos problemas e desafios a serem resolvidos para que a sua arquitetura suporte as novas demandas (DOMINGUE *et al.* 2011). Por um lado, o volume de conteúdo multimídia e de dados compartilhados têm crescido em um ritmo que desafia a capacidade atual da Internet. Por outro lado, existe a necessidade de se garantir a confiabilidade, disponibilidade e interoperabilidade dos novos serviços no contexto da rede, por isso, novas linhas de pesquisas têm sido desenvolvidas para estabelecer uma nova geração da Internet (DOMINGUE *et al.*, 2011).

A Figura 5 mostra uma abordagem em fases que inclui a evolução da Intranet / Extranet / Internet das Coisas para uma Internet do Futuro de Coisas e Pessoas, à medida em que aumentam os requisitos de escalabilidade, bem como a disseminação de novas tecnologias relacionadas e aplicações (UCKELMANN, 2011).

Figura 5 - Evolução em fases para a Internet do Futuro de Coisas e Pessoas.



Fonte: Traduzido de Uckelmann (2011).

A Internet do Futuro é um sistema global e comum de comunicação e distribuição de informações que pode ser considerada sob diferentes perspectivas: a perspectiva de redes e infraestrutura compartilhada, a perspectiva de serviços e aplicativos ou, ainda, a perspectiva de mídia e conteúdo (ZAHARIADIS *et al.*, 2011). A Internet do Futuro compreende uma composição de redes de computadores, IoT, IoS, Internet de Pessoas (IoP), Internet de Energia (IoE) e Internet de Mídia (IoM) em uma plataforma de tecnologia da informação global comum de redes integradas e coisas/objetos inteligentes com conexão em rede (VERMESAN *et al.*, 2011).

De acordo com Atzori, Iera e Morabito (2010), existe uma dificuldade de se definir a IoT, que se deve ao próprio termo empregado para denominá-la, o qual é composto de duas palavras. A primeira palavra, "Internet", traz uma visão orientada para a rede da IoT, enquanto a segunda palavra, "Coisas", traz o foco para os objetos genéricos que integram uma estrutura em comum (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). Diferenças entre essas duas visões, que são muitas vezes substanciais, refletem a escolha pela abordagem sobre a perspectiva da IoT "orientada para Internet" ou "orientada para as coisas", o que dependerá do interesse específico, da finalidade ou da origem de quem busca a definição (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

De acordo com INFISO D.4 NETWORKED ENTERPRISE & RFID INFISO G.2 MICRO & NANOSYSTEMS (2008), as divergências em relação à definição da IoT ocorrem também porque este é um conceito que pode assumir diferentes faces. Considerando a perspectiva da sua funcionalidade e identidade, a IoT pode ser entendida como coisas tendo identidades e funcionalidades programadas (comportamentos virtuais), operando em espaços inteligentes e utilizando interfaces inteligentes para se conectar e se comunicar em contextos sociais, ambientais e do usuário. Considerando, por outro lado, a perspectiva da integração, a IoT pode ser entendida como "objetos interconectados atuando no que pode ser chamado de Internet do Futuro" (INFISO D.4 NETWORKED ENTERPRISE & RFID INFISO G.2 MICRO & NANOSYSTEMS (2008).

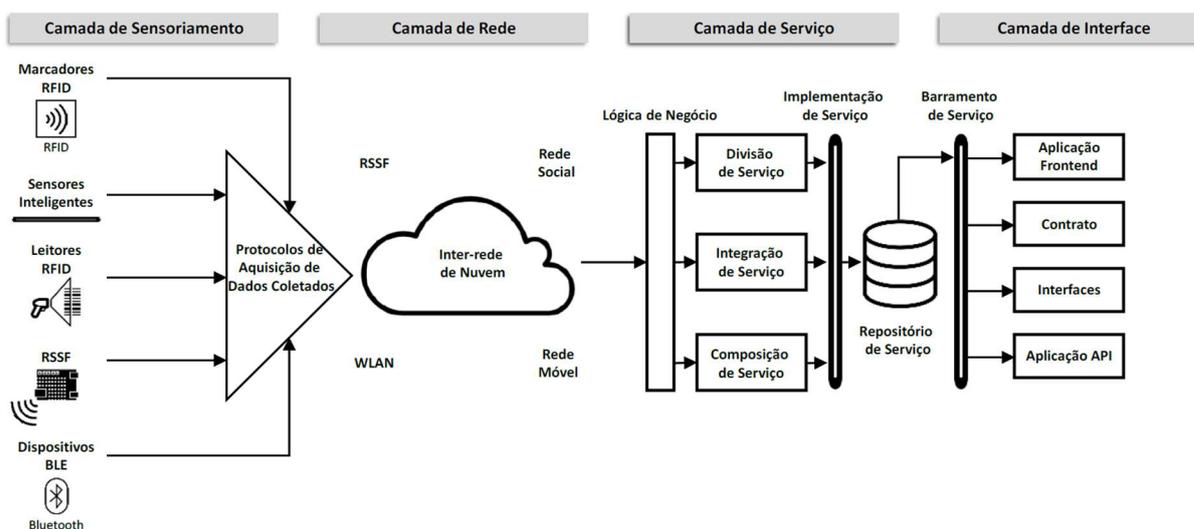
De acordo com a definição de Vermesan *et al.* (2011), adotada para o presente estudo, a IoT é uma parte integrante da Internet do Futuro que pode ser conceitualmente definida como:

Uma infraestrutura de rede global dinâmica com capacidade de auto-configuração baseada em protocolos de comunicação padrão e interoperáveis, onde 'coisas' físicas e virtuais possuem identidades, atributos físicos [...], utilizam interfaces inteligentes e são perfeitamente integradas à rede de informação (VERMESAN *et al.*, 2011).

2.3.2 Arquitetura

Diferentes arquiteturas foram propostas na literatura para representar a IoT. No presente estudo será adotado o modelo de quatro camadas proposto por Li, Xu e Zhao (2014), conforme indicado na Figura 6.

Figura 6 - Arquitetura IoT.



Fonte: Li, Xu E Zhao (2014), traduzido por Machado (2018).

As quatro camadas da arquitetura serão descritas em seguida, conforme Li, Xu e Zhao (2014) e Gubbi *et al.* (2013):

a) **Camada de sensoriamento:** é integrada aos objetos de *hardware* e aos *softwares*, possibilitando detectar o *status* das coisas. Cada objeto deve possuir uma identidade, podendo ser facilmente rastreado no domínio digital. Nesta camada, os sistemas inteligentes associados a *tags* e sensores são capazes de detectar automaticamente o ambiente e de trocar dados. São utilizados protocolos específicos de aquisição dos dados coletados, variáveis conforme o tipo de tecnologia utilizada.

b) **Camada de rede:** consiste na infraestrutura para suportar conexões sem fio ou com fio entre as coisas. É essencial para uma rede descobrir e mapear automaticamente os objetos. Por meio desta camada, as coisas podem efetivamente compartilhar dados, o que é crucial para o gerenciamento e processamento inteligente de eventos na IoT. Além disso, a camada é capaz de agregar dados de infraestruturas de tecnologias existentes e transmiti-los às unidades de tomada de decisão.

c) **Camada de serviço:** atua na criação e gerenciamento de serviços exigidos por usuários ou aplicativos. Uma camada de serviço consiste em um conjunto mínimo de requisitos comuns de aplicativos, APIs e protocolos que suportam aplicativos e serviços necessários. Todas as atividades orientadas a serviços, como troca e armazenamento de

informações, gerenciamento de dados, mecanismos de busca e comunicação, são realizadas nesta camada.

d) **Camada de interface:** consiste nos métodos de interação com usuários ou aplicativos. A IoT conta com um grande número de dispositivos que nem sempre estarão em conformidade com os mesmos padrões, considerando que podem ser adquiridos de fornecedores diferentes. O problema de compatibilidade entre as coisas heterogêneas deve ser abordado nesta camada, para possibilitar a interações entre essas coisas. Esta compatibilidade envolve a troca de informações, comunicação e processamento de eventos, devendo contar com mecanismo de interface eficazes para simplificar o gerenciamento e a interconexão das coisas.

2.3.3 Elementos para Construção da Funcionalidade

De acordo com Al-Fuqaha *et al.* (2015), uma vez compreendida a visão em camadas promovida pela arquitetura, é importante compreender também a visão dos blocos de construção da IoT para obter uma concepção mais real do seu significado e da sua funcionalidade. Existem seis elementos principais que caracterizam a IoT, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Elementos principais necessários para construção da IoT.



Fonte: Traduzido de Al-Fuqaha *et al.* (2015).

O Quadro 1 indica a descrição resumida de cada um desses elementos indicados na Figura 7.

Quadro 1 - Descrição dos principais elementos necessários para a construção da IoT.

ELEMENTO	DESCRIÇÃO
Identificação	Este bloco é crucial para distinguir o ID de cada objeto conectado e o seu endereçamento único na rede de comunicação. Os métodos de identificação ajudam a discernir objetos de maneira clara e exclusiva dentro da rede. O IP é um exemplo de método de endereçamento.
Deteção (sensoriamento)	Este bloco coleta e direciona dados, que são analisados para executar ações específicas com base nos serviços necessários. Através dos sensores ou <i>tags</i> RFID é possível coletar e enviar dados do ambiente aos bancos de dados, por exemplo. Já os atuadores podem alterar o ambiente ou reagir de acordo com os dados coletados.
Comunicação	Este bloco diz respeito às tecnologias de comunicação e formas de conexão relacionadas aos dispositivos IoT. Exemplos de protocolos de comunicação são Wi-Fi e Bluetooth. RFID é um exemplo de tecnologia de comunicação mais específica. A comunicação utilizada influencia no consumo de energia dos objetos, que deve ser preferencialmente baixo.
Computação	Este bloco se refere às unidades de processamento (como microcontroladores e microprocessadores) e aplicativos de <i>software</i> que juntos representam a capacidade computacional da IoT. Diversas plataformas de <i>hardware</i> foram desenvolvidas para executar aplicativos IoT, como o Arduino, Intel Galileo e Raspberry PI, assim como plataformas de <i>softwares</i> e sistemas operacionais específicos. As plataformas de nuvem também formam importante parte computacional da IoT.
Serviços	Serviços de Identificação são os mais básicos e importantes porque para trazer objetos do mundo real para o mundo virtual é preciso primeiro identificar estes objetos.
	Serviços de Agregação de Informações coletam e resumem as medições brutas dos sensores para que sejam processadas e relatadas às aplicações de IoT.
	Serviços de Colaboração e Inteligência utilizam os Serviços de Agregação de Informações e trabalham com os dados obtidos para tomar decisões e reagir.
	Serviços de Ubiquidade tem como objetivo fornecer Serviços de Colaboração e Inteligência sempre que forem necessários, para qualquer pessoa e em qualquer lugar.
Semântica	Semântica na IoT refere-se à capacidade de extrair conhecimento de forma inteligente dos dispositivos que a compõem para fornecer os serviços necessários, enviando as demandas para os recursos certos. A semântica também faz o reconhecimento e a análise dos dados para realizar tomadas de decisão corretamente.

Fonte: Adaptado de Al-Fuqaha *et al.* (2015).

2.3.4 Conectividade

As redes de comunicação são fundamentais para garantir a conectividade em ambientes IoT. No Quadro 2 estão listadas algumas das tecnologias de rede existentes, conforme indicado por Santos *et al.* (2016).

Quadro 2 - Redes de Internet para conectividade da IoT.

REDE	DESCRIÇÃO
Ethernet	Este padrão está presente em grande parte das redes locais que utilizam fios. Sua popularidade se deve à simplicidade, facilidade de adaptação, manutenção e custo. O uso deste padrão é sugerido para dispositivos que não necessitem de muita mobilidade.
Wi-Fi	É uma solução de comunicação sem fio que faz parte do cotidiano de casas, escritórios, indústrias, lojas comerciais e espaços públicos. Foi desenvolvido como uma alternativa ao padrão cabeado Ethernet. Possui vantagens como alcance de conexão e vazão. A principal desvantagem é o consumo de energia, que é maior quando comparado a outras redes sem fio.
ZigBee	As suas principais características são a vazão de dados, o consumo energético e o custo reduzidos. Permite que os dispositivos entrem em modo de economia de energia por longos intervalos de tempo, o que pode prolongar a vida útil. O padrão ZigBee é mantido pela organização ZigBee Alliance, que é responsável por garantir a sua interoperabilidade.
Bluetooth	Bluetooth é um protocolo de comunicação sem fio que foi proposto pela Ericsson e que é mantido atualmente pela Bluetooth Special Interest Group. É muito utilizado em smartphones, headsets e PCs. O BLE é uma versão mais recente do Bluetooth que possui especificação voltada para economizar energia nos dispositivos.
3G/4G	São padrões de telefonia celular aplicáveis à IoT e que podem ser utilizados em projetos que precisam alcançar distâncias grandes. Por outro lado, o seu consumo energético é elevado em relação a outras tecnologias.
LoRaWan	Foi projetada para criar redes de longa distância, numa escala regional, nacional ou global. O seu consumo de energia é relativamente baixo, o que permite aos dispositivos se manterem ativos por longos períodos. Possui baixo custo e tem sido muito adotado entre empresas de <i>hardware</i> .
Sigfox	Foi projetada para lidar com pequenas taxas de transferência de dados. É uma tecnologia recente que atua como uma operadora para IoT e que oferece suporte a uma série de dispositivos. Possui um baixo consumo energético.

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2016).

As principais características técnicas de cada rede em termos de alcance, frequência de atuação, taxa de transmissão e utilização do protocolo IPV6 estão indicadas no Quadro 3, conforme Ray (2018) e Santos *et al.* (2016).

Quadro 3 - Características técnicas de redes de Internet para conectividade da IoT.

REDE	ALCANCE	FREQUÊNCIA	TAXA DE TRSMISSÃO
Ethernet	2000 m	N/A	1 - 10 Gbps
Wi-fi	100 m	5 - 60 GHz	1 Mbps – 6,75 Gbps
ZigBee	100 m	868 / 915 MHz / 2.4 GHz	20 - 250 Kbps
Bluetooth	10 m	2.4 GHz	1 - 24 Mbps

REDE	ALCANCE	FREQUÊNCIA	TAXA DE TRASMISSÃO
3G	200 km	Área de celular inteira	200 Kbps
4G	200 km	Área de celular inteira	0,1 - 1 Gbps
LoraWan	30 km	868 / 900 MHz	0,3 - 50 kbps
SigFox	50 km	868 / 900 MHz	10 - 1000 bps

Fonte: Adaptado de Ray (2018) e Santos *et al.* (2016).

Para Vermesan *et al.* (2011), as redes devem permitir intercâmbios de informações que contemplem comunicação entre dispositivos e objetos inteligentes, comunicação destes com sensores e atuadores, comunicação com unidades de armazenamento e processamento, além de comunicação para interação com seres humanos.

Nos últimos anos, muitos esforços de pesquisa foram empregados em tópicos relacionados ao desenvolvimento da rede 5G, que deve expandir a IoT de hoje e impulsionar as operações de celular, a solução de questões de segurança e os desafios de rede, aumentando significativamente a capacidade e a velocidade para fornecer conectividade confiável e rápida à IoT futura (LI; XU; ZHAO, 2018).

2.3.5 Dispositivos Inteligentes

Os dispositivos IoT podem executar tarefas, processar dados localmente e trocar dados com outros dispositivos e aplicativos conectados, considerando restrições como memória, recursos de processamento, latências de comunicação e velocidade (RAY, 2018). Um dispositivo IoT pode consistir em várias interfaces para comunicação com outros dispositivos, com e sem fio, sendo composto por (a) interfaces para sensores, (b) interfaces para conectividade com a Internet, (c) interfaces de memória e armazenamento, e (d) interfaces de áudio / vídeo (RAY, 2018). As interfaces permitem que os usuários consultem os dispositivos, monitorem seu *status* e os controlem remotamente (RAY, 2018).

Os objetos inteligentes são aqueles que, por meio de tecnologias embarcadas, tornam-se conscientes de seu ambiente e estado e tornam-se capazes de tomar decisões, comunicar informações ou atuar no ambiente, conforme o seu próprio controle (LÓPEZ *et al.* 2009). Um objeto inteligente deve possuir duas ou mais das seguintes características, que podem estar combinadas de diferentes formas, segundo López *et al.* (2009):

- possuir identidade única e ser capaz de armazenar outros dados relevantes, como ocorre com um objeto dotado de uma *tag* RFID, por exemplo;

- ter capacidade de detectar e fornecer dados relevantes sobre sua própria condição física e do ambiente onde está situado. Por exemplo, um objeto dotado de um sensor de temperatura e uma tela LCD;
- enviar comandos de atuação para outros dispositivos internos ou externos. Por exemplo, os dispositivos capazes de disparar alarmes ao verificar a violação de limites preestabelecidos;
- tomar decisões relevantes para o seu próprio destino com base nas informações disponíveis e participar do controle de outros dispositivos ou sistemas, por exemplo, um motor automobilístico com sensores que pode decidir quando o óleo deve ser trocado, além de exibir uma mensagem de alerta ao usuário;
- interagir com a rede de comunicação com ou sem fio e receber informações para melhorar a qualidade de suas outras funcionalidades inteligentes. Por exemplo, um contêiner com sensores e com condições ambientais monitoradas que se ajusta visando garantir a integridade da carga.

Entre as principais tecnologias facilitadoras para a construção de objetos inteligentes estão RFID, sensores e redes de sensores sem fio (LÓPEZ *et al.* 2009). O desenvolvimento de objetos inteligentes está na base de uma mudança significativa com relação aos métodos tradicionais de gerenciamento de produtos (LÓPEZ *et al.* 2009).

2.3.6 Monitoramento e Controle de Espaços Físicos com Dispositivos Inteligentes

Uma área importante que merece destaque no contexto da IoT é o monitoramento e controle de espaços físicos a partir da capacidade de comunicação entre sensores, atuadores e *tags* de RFID, bem como sua integração com redes sem fio. Esta integração precisa ter características adequadas de modulação, confiança, flexibilidade, robustez e escalabilidade (INFSO D.4 NETWORKED ENTERPRISE & RFID INFSO G.2 MICRO & NANOSYSTEMS, 2008).

2.3.6.1 Sensores

As Redes de Sensores Sem Fio (WSNs) têm ganhado destaque mundial recentemente, impulsionando o desenvolvimento de sensores inteligentes. Estes sensores apresentam algumas vantagens em relação aos sensores tradicionais porque são pequenos, utilizam poucos recursos computacionais e possuem um custo comparativamente mais baixo (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Os sensores inteligentes são utilizados para detectar, medir e coletar dados sobre o ambiente para que estes sejam processados e transmitidos aos usuários conforme as demandas (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Existe uma grande variedade de sensores mecânicos, térmicos, biológicos, químicos, ópticos e magnéticos para medir as propriedades do ambiente (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Dependendo da aplicação e do tipo, os sensores podem ter atuadores incorporados (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). No contexto de um ambiente construído, por exemplo, os sensores são capazes de monitorar condições como temperatura, níveis de gás, poluentes, umidade, estado das portas e janelas, ocupações em salas e condições de diferentes sistemas (UNDERWOOD; ISIKDAG, 2011).

2.3.6.2 Atuadores

Um atuador, por sua vez, é um dispositivo utilizado para exercer controle sobre diferentes componentes de um sistema. Os atuadores podem atuar em conjunto com diferentes dispositivos de detecção, realizar ajustes em parâmetros do sensor e promover movimento (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). No contexto de um ambiente construído, os atuadores são capazes de executar ações para afetar o ambiente emitindo som, luz, ondas de rádio e até mesmo cheiros (WHITMORE; AGARWAL; XU, 2015), além de movimentos, entre outros exemplos.

2.3.6.3 RFID

RFID é uma tecnologia de identificação à distância por radiofrequência que suporta um grande número de IDs únicos e cujos sistemas de leitura podem discernir diferentes *tags* localizadas em uma mesma área com uma única leitura e sem a necessidade de assistência humana (WANT, 2006). Foi a primeira tecnologia usada para operacionalizar o conceito M2M, que ocorre na interação entre etiqueta e leitor (AL-FUQAHA *et al.* 2015).

RFID tem como origem tanto os estudos realizados por Michael Faraday em meados do século XIX sobre o conceito de indutância elétrica para campo próximo quanto nas descobertas sobre tecnologias de rádio e radar feitas entre 1900 e 1940 (AHSON; ILYAS, 2008). Já na primeira metade do século XX, os avanços tecnológicos possibilitaram o desenvolvimento de sistemas que também permitiam a identificação para campo distante (AHSON; ILYAS, 2008).

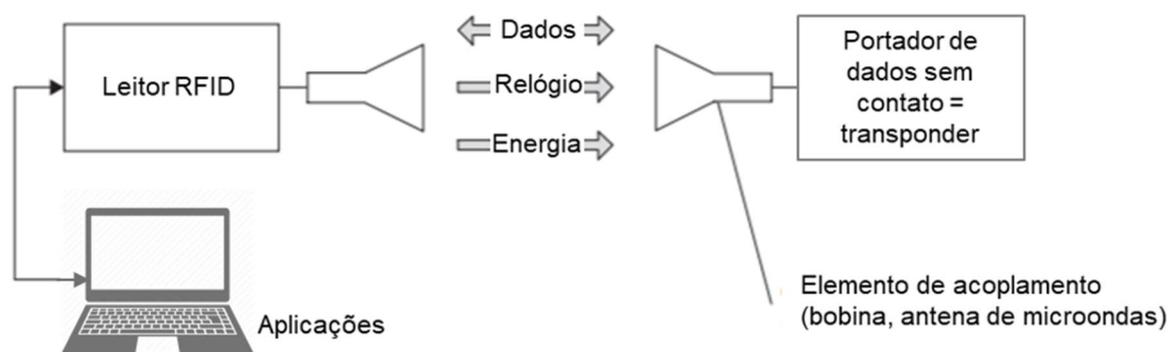
Os princípios da tecnologia RFID foram empregados pelos britânicos na Segunda Guerra Mundial, entre 1939 e 1945, para distinguir se uma determinada aeronave que se aproximava e era detectada pelo radar pertencia ou não a um inimigo (WANT, 2006). Em 1960, um trabalho sobre controle de acesso com um sistema RFID mais moderno foi realizado pelo *Los Alamos National Laboratory*, onde etiquetas RFID eram incorporadas ao crachá de funcionários visando identificar automaticamente cada pessoa e limitar o seu acesso a áreas seguras (WANT, 2006).

Na década de 90, com o crescimento na comercialização do RFID, a necessidade de padronizar os sistemas e as suas frequências de operação para tornar os equipamentos de diferentes fabricantes compatíveis foi percebida por organizações como a *International Standards Organization (ISO)* e a *International Electrotechnical Commission (IEC)*, que empregaram esforços nesse sentido (BARBIN, 2015). O grupo de pesquisa *Auto-ID Center*, do MIT, desenvolveu posteriormente protocolos, o Código Eletrônico de Produto (EPC) e uma arquitetura de rede para acessar dados na Internet de forma padronizada, fazendo com surgisse em 2003 a *EPCglobal*, responsável por comercializar a tecnologia EPC (DUARTE, 2019).

O EPC é um número de identificação exclusivo que é armazenado nas *tags* RFID (AL-FUQAHA *et al.* 2015). Um dos seus objetivos principais é melhorar a visibilidade do objeto na rede, auxiliando na rastreabilidade e obtenção de status e localização atual, por exemplo (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). A segunda geração de *tags* EPC, que é chamada de Gen 2, evoluiu para fornecer melhores serviços aos clientes externos do que a primeira geração, apresentando recursos adicionais como melhor interoperabilidade, alto desempenho, alta confiabilidade e menor custo (AL-FUQAHA *et al.* 2015).

Hoje em dia, os sistemas RFID estão começando a conquistar novos mercados de massa devido às vantagens que apresentam em comparação com outros sistemas de identificação (FINKENZELLER, 2010). Os avanços na tecnologia de circuitos integrados de silício tornaram as etiquetas de RFID mais confiáveis e baratas, facilitando a sua adoção generalizada e em grande escala (BARBIN, 2015). “Existem diferentes tipos de sistemas RFID que podem ser classificados de acordo com o modo de operação, a banda de frequências utilizada e a fonte de alimentação de energia disponível para a etiqueta” (BARBIN, 2015). Entretanto, de modo geral um sistema estrutural RFID típico é composto por um leitor (também chamado de coletor de dados ou interrogador), uma *tag* eletronicamente programada (transponder ou etiqueta) localizada no objeto de interesse e um *software* de controle (FINKENZELLER, 2010; OLIVEIRA; SERRA, 2017), como indicado na Figura 8.

Figura 8 - Leitor e *tag*, os principais componentes de sistemas RFID.



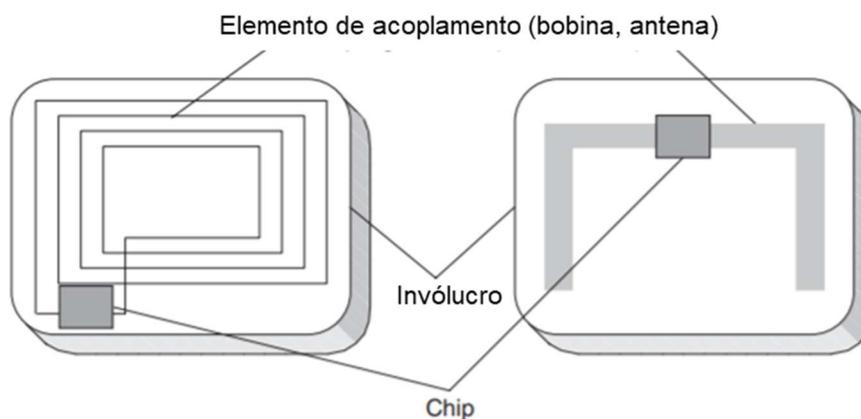
Apesar do uso coloquial do nome, o leitor geralmente é um dispositivo que permite tanto a leitura quanto a gravação de dados, dependendo da sua arquitetura e do tipo de tecnologia utilizada (FINKENZELLER, 2010). Um leitor normalmente contém um módulo de radiofrequência (transmissor e receptor), uma unidade de controle e um elemento de acoplamento ao transponder (FINKENZELLER, 2010). Após a obtenção dos dados, o leitor os envia ao sistema, que é responsável por reconhecer os protocolos de comunicação e dar direcionamento aos dados (OLIVEIRA; SERRA, 2017).

Os leitores podem ser portáteis, existindo modelos extremamente simples para avaliação do sistema em laboratório e modelos mais robustos e à prova de respingos (IP-54) para uso em ambientes industriais adversos (FINKENZELLER, 2010). Leitores portáteis podem ser utilizados para a identificação de animais, para controle de pessoas no transporte público, como terminal de pagamentos e etc. (FINKENZELLER, 2010).

Uma característica importante do leitor é que este pode realizar múltiplas leituras devido a sua capacidade de usar métodos específicos de separação que evitam colisões entre as diferentes frequências das etiquetas de RFID (OLIVEIRA; SERRA, 2017). Os leitores podem ter diferentes recursos de desempenho que envolvem número de *tags* lidas simultaneamente, resistência do gabinete às intempéries e outros fatores ambientais, capacidade de interagir com dispositivos externos, capacidade de filtrar e agregar dados, interface para rede e comunicação, número de portas da antena e potência de saída das ondas de rádio (CLAMPITT, 2007).

As *tags* são os dispositivos que efetivamente transportam os dados e consistem, geralmente, em um elemento de acoplamento e um de microchip eletrônico, podendo ser divididas em duas classes: ativa e passiva (FINKENZELLER, 2010). A Figura 9 apresenta o *layout* básico das *tags*.

Figura 9 - *Layout* básico das *tags*, dispositivo de transporte de dados RFID.



Fonte: Traduzido de Finkenzeller (2010).

As *tags* ativas são as que exigem uma fonte de energia externa ou que usam energia armazenada em uma bateria integrada. No caso de utilização de bateria, além de haver um acréscimo no custo, o tempo de vida útil da *tag* fica condicionado à energia armazenada e ao número de operações de leituras realizadas (AL-FUQAHA *et al.*, 2015; OLIVEIRA; SERRA, 2017; WANT, 2006; FINKENZELLER, 2010). Na transmissão de dados entre a *tag* e o leitor, a bateria de um leitor ativo não é utilizada, pois esta serve exclusivamente para fornecimento de energia necessária para o microchip e para a retenção dos dados armazenados (FINKENZELLER, 2010). Apenas a potência do campo eletromagnético recebido do leitor é utilizada na transmissão de dados entre a *tag* e o leitor (FINKENZELLER, 2010).

As *tags* passivas não exigem baterias nem manutenção, as etiquetas são relativamente pequenas e são compostas por três partes: uma antena, um chip semiconductor conectado à antena e alguma forma de invólucro para manter a etiqueta íntegra e proteger a antena e o chip (AL-FUQAHA *et al.*, 2015; OLIVEIRA; SERRA, 2017; WANT, 2006), conforme anteriormente indicado na Figura 9. Neste caso, o leitor é responsável por alimentar e se comunicar com as *tags* através de um campo eletromagnético, sem necessidade de contato direto (AL-FUQAHA *et al.*, 2015; OLIVEIRA; SERRA, 2017; WANT, 2006).

Uma *tag* desse tipo, que não possui sua própria fonte de tensão (bateria), permanece totalmente passiva quando não está na zona de leitura, pois a energia necessária para ativá-la só é fornecida dentro da zona através da unidade de acoplamento do leitor, assim como ocorre com o pulso de tempo e os dados (FINKENZELLER, 2010). Um fator importante que precisa ser considerado na escolha da *tag* é o material do objeto etiquetado, pois a antena de etiquetas passivas pode vir a sofrer interferências em virtude da interação eletromagnética entre ela e o meio ao redor (BARBIN, 2015), como superfícies metálicas ou líquidos, por exemplo.

Segundo Barbin (2015), com relação à frequência de operação de um sistema RFID, as faixas mais comuns são de Baixa Frequência (LF, do inglês *Low Frequency*), Alta Frequência (HF, do inglês *High Frequency*) e Ultra Alta Frequência (UHF, do inglês *Ultra High Frequency*). A Figura 10 apresenta estas faixas, a faixa de micro-ondas, além de outras características generalizadas para um leitor genérico e que são diretamente relacionadas à frequência. Ressalta-se que esses valores estão evoluindo conforme os equipamentos utilizados evoluem.

Figura 10 - Características de frequência para sistemas RFID.

Faixa de Frequências	< 135 kHz (LF)	13,56 MHz (HF)	860-960 MHz (UHF)	2,45 GHz (microondas)
Distância máxima de leitura	< 0,5 m	1 m	4 – 5 m	1 m
Tipo de etiqueta	Passiva (acoplamento indutivo)	Passiva (acoplamento indutivo)	Passiva ou Ativa	Passiva ou Ativa
Exemplo de aplicação	Controle de acesso, rastreamento de animais.	Cartões inteligentes, controle de acesso, pagamentos, biometria, bibliotecas.	Paletes e caixas em empresas de distribuição, pedágios, controle de bagagens.	Pedágios, monitoração ambiental.
Taxa de leituras múltiplas	Lento  Rápido			
Desempenho em líquidos e metais	Melhor  Pior			
Tamanho para etiquetas passivas	Maior  Menor			

Fonte: Chawla e Ha (2007), traduzido por Barbin (2015).

Os sistemas que utilizam LF e HF se baseiam no princípio de acoplamento capacitivo (elétrico) ou indutivo (magnético) entre as antenas do leitor e da etiqueta, enquanto que em frequências UHF e micro-ondas, que são mais elevadas, a comunicação ocorre através da transmissão/recepção de ondas eletromagnéticas emitidas/recebidas pelo leitor e pela etiqueta (BARBIN, 2015). Sistemas de RFID que realizam leituras em faixas acima de 1m são conhecidos como sistemas de longo alcance e operam utilizando ondas eletromagnéticas das faixas de micro-ondas ou UHF (FINKENZELLER, 2010). Segundo Finkenzeller (2010), utilizando *tags* passivas é possível alcançar distâncias de aproximadamente 3 metros, enquanto que distâncias de até 15 metros podem ser alcançadas com a utilização de *tags* ativas.

Algumas aplicações de sistemas por RFID em diferentes setores são destacadas por Finkenzeller (2010), a exemplo:

- **Controle de acesso:** o controle de acesso usando cartões existe há muito tempo. Porém, os sistemas mais antigos apresentavam um inconveniente no seu procedimento operacional, porque os cartões precisavam sempre ser corretamente inseridos no leitor para garantir a leitura (sistemas com infravermelho, por exemplo). Os sistemas RFID permitem uma flexibilidade maior de leitura, pois a *tag* precisa apenas ser aproximada a uma certa distância da antena do leitor, sem necessidade de contato direto. Além disso, a *tag* pode estar contida em diversos dispositivos (cartões inteligentes, chaveiros, relógios de pulso, dentre outros). Outra vantagem desse tipo de controle de acesso é que o leitor não é danificado por poeira, sujeira ou umidade, não requerendo manutenção e reduzindo o seu custo operacional.

- **Transporte de containers de carga internacional:** em geral, os containers de transporte de carga internacional possuem uma identificação situada na parte externa, que consiste em quatro letras, o código do proprietário, um número de série numérico de seis dígitos e um dígito de teste. O processo de registro manual do número de identificação dos containers na rotina de atividades portuárias está muito suscetível a erros. A norma internacional ISO 10374 de 1991 foi projetada para fornecer uma base para o uso da tecnologia de transmissão automática de dados usando uma *tag* conectada ao container, solucionando os possíveis problemas descritos anteriormente. Além disso, é possível integrar outras informações adicionais, como as medidas de comprimento do container, tipo de recipiente, peso carregado e tara. Uma bateria fornece a fonte de alimentação à *tag* e a sua vida útil corresponde à vida útil do container;
- **Controle de rebanho (gado):** os sistemas de identificação eletrônica também são utilizados na manutenção de rebanhos, tendo como principais aplicações o controle da alimentação automática em estábulos e a medição da produção de leite. Além de aplicações internas para alimentação automática e cálculo de produtividade, esses sistemas também podem ser usados na identificação de animais entre empresas, no controle de epidemias, e no rastreamento da origem dos animais. As *tags* de colarinho podem ser facilmente transferidas de um animal para outro.

Finkenzeller (2010) também destaca alguns benefícios do uso de sistemas RFID, como por exemplo:

- **Controle da qualidade:** ao inspecionar os produtos após o processo produtivo deve-se analisar as informações relacionadas à qualidade, que são coletadas nos pontos de teste ao longo da linha de produção. A utilização de *tags* que armazenam os dados do processo produtivo permite a identificação das informações relacionadas a cada produto e permite saber em qual etapa isso foi realizado;
- **Flexibilidade:** a utilização de *tags* tem facilitado bastante o controle de processos produtivos. Os produtos podem ser fabricados em tamanho de lote, sem a necessidade de comunicações complexas com o computador *host* de cada instalação, pois é possível registrar na *tag* os dados de configuração para serem lidos por robôs e máquinas de produção universalmente programáveis. Esses dados podem ser associados ao objeto na fase preparatória e disponibilizados sempre que necessário;
- **Condições ambientais adversas:** se comparados aos sistemas que utilizam leitores de código de barras (sensíveis ao uso em ambientes sujos e/ou empoeirados), a utilização de sistemas RFID apresenta diversas vantagens, pois em geral mantém suas características operacionais projetadas mesmo em ambientes industriais com

poeira, umidade, óleos, líquidos de refrigeração, gases, altas temperaturas e outros possíveis contaminantes característicos de um ambiente industrial.

Segundo Oliveira e Serra (2017), a indústria da construção civil tem mostrado interesse em utilizar a RFID em processos da sua cadeia produtiva, portanto, existe uma demanda de mercado. “Essa tecnologia pode ser aplicada em inúmeras áreas para fins de controle de almoxarifado, localização de materiais e pessoas, controle de entrada e saída de produtos, veículos e pessoas, identificação de ferramentas ou animais, entre outros” (OLIVEIRA; SERRA, 2017). Entretanto, o desconhecimento a respeito do potencial de uso desta tecnologia para a construção civil é um fator que ainda limita a sua implantação em grande escala.

2.3.7 Desafios para Utilização da IoT

Apesar de todo avanço, algumas questões que envolvem aspectos tecnológicos e sociais ainda precisam ser resolvidas para que a IoT seja aceita e utilizada amplamente. Uma delas é que a IoT deve garantir a completa interoperabilidade entre dispositivos conectados, provendo sempre um grau de inteligência que venha a permitir sua adaptação e autonomia aos diferentes ambientes, enquanto garante confiança no funcionamento, privacidade e segurança ao usuário (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

Outra questão, que é um dos maiores desafios, é o endereçamento único de todos os objetos que estarão conectados, bem como a representação e registro de histórico de todas as informações trocadas em rede (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010), o que resultará na geração de uma grande quantidade de dados que devem ser armazenados, processados e apresentados de forma clara, eficiente e que permita uma fácil interpretação (GUBBI *et al.*, 2013), o que pode ser facilitado pelas ferramentas do *Big Data* (CHEN; MAO; LIU, 2014). As soluções propostas com IoT precisam dar atenção especial para prover recursos eficientes, bem como se preocupar com os problemas de escalabilidade que envolvem o crescimento do número de dispositivos. Atualmente, diversos setores estão envolvidos na atividade de desenvolvimento de soluções para atender às exigências tecnológicas que foram mencionadas (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

De acordo com Gubbi *et al.* (2013), para que a tecnologia relacionada à IoT seja percebida como parte natural do cotidiano dos usuários, os estudiosos da IoT precisam desenvolver conhecimento nos seguintes tópicos: (a) compreensão da relação dos usuários com os seus dispositivos, (b) desenvolvimento de arquitetura de *softwares* e redes de comunicação extensivas para processar e transmitir informações contextualizadas para onde elas são relevantes, e (c) ferramentas analíticas que permitem comportamentos inteligentes e autônomos. Partindo destes três princípios fundamentais, a conectividade inteligente e a computação sensível ao contexto podem ser viabilizadas (GUBBI *et al.*, 2013).

Outro ponto importante a ser resolvido é forma de visualização das informações geradas pelas aplicações em IoT, que é um critério necessário para permitir a ampla interação do usuário com o ambiente inteligente (GUBBI *et al.*, 2013). A extração de dados brutos não é uma etapa considerada trivial, mas para que estes dados sejam convertidos em informação e conhecimento é preciso criar uma interface de visualização atraente e de fácil compreensão (GUBBI *et al.*, 2013).

As informações precisam ser representadas de acordo com as necessidades do usuário final, o que pode ser um fator crítico em momentos de tomada de decisões (GUBBI *et al.*, 2013). À medida em que a tecnologia migra de 2D para 3D, mais informações podem ser fornecidas de maneira significativa para os consumidores (GUBBI *et al.*, 2013). No contexto da construção civil, de acordo com Succar; Saleeb e Sher (2016), o BIM pode ser usado satisfatoriamente pelos usuários como uma interface de visualização para a IoT.

2.3.8 Computação em Nuvem e Big Data

Sensores ao redor de todo o mundo estão coletando e transmitindo dados diariamente no contexto da IoT (CHEN; MAO; LIU, 2014). Este cenário resulta na geração de uma grande quantidade de dados, os quais deverão ser armazenados, processados e apresentados de forma clara e eficiente para garantir sua utilidade e permitir uma fácil interpretação das informações (GUBBI *et al.*, 2013; TAHERKORDI; ELIASSEN; HORN, 2017).

A Computação em Nuvem pode promover uma infraestrutura virtual voltada para IoT que integra dispositivos para monitoramento, ferramentas analíticas, plataformas de visualização e entregas de interfaces adequadas para usuários finais (GUBBI *et al.*, 2013). O termo Computação em Nuvem refere-se hoje em dia ao gerenciamento de recursos de *software* e *hardware* altamente escalonáveis e personalizáveis que são fornecidos como serviços aos usuários e que se divide em três segmentos: fornecimento de *Software* como Serviço (SaaS), Plataforma como Serviço (PaaS) e Infraestrutura como Serviço (IaaS) (ISIKDAG, 2015).

Por sua vez, *Big Data* é um paradigma emergente que possui um conceito abstrato, mas pode ser entendido como grandes conjuntos de dados que não podem ser percebidos, adquiridos, gerenciados e processados por ferramentas tradicionais de Tecnologia da Informação (TI) em períodos toleráveis de tempo (CHEN; MAO; LIU, 2014). As ferramentas de *Big Data* possuem requisitos rigorosos quanto à capacidade de armazenamento e capacidade de processamento, bem como à capacidade de transmissão para a rede (CHEN; MAO; LIU, 2014).

De acordo com Chen, Mao e Liu (2014), relatórios comerciais apontam que os dados gerados pela IoT possuem três recursos que estão em conformidade com o paradigma do *Big Data*: (a) seus terminais geram quantidades massivas de dados; (b) os dados gerados são geralmente semi-estruturados ou não estruturados, e (c) os dados provenientes da IoT só são

úteis quando são analisados. No entanto, o *Big Data* gerado através da IoT tem características próprias que o distinguem do comum, devido aos tipos de dados que são coletados, os quais apresentam heterogeneidade, variedade, ruído e alta redundância (CHEN; MAO; LIU, 2014).

O sucesso futuro da IoT depende muito da integração efetiva de *Big Data* e Computação em Nuvem. Se por um lado a implantação generalizada da IoT impulsiona a geração dos grandes conjuntos de dados que alcançam o paradigma do *Big Data*, por outro lado, o desenvolvimento e aplicação do *Big Data* também acelera as pesquisas relacionadas à IoT (CHEN; MAO; LIU, 2014). Hoje em dia, os bancos de dados utilizados em projetos com IoT geralmente estão associados às plataformas de Computação em Nuvem.

2.4 MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO (BIM)

BIM é um domínio de conhecimento que tem se expandindo rapidamente dentro da indústria de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações (AECO) (SUCCAR, 2009), além de ter uma ampla aceitação acadêmica nas escolas de arquitetura e engenharia ao redor do mundo (KENSEK, 2014). O BIM abrange questões relativas ao compartilhamento de informações, interoperabilidade e colaboração eficiente durante todo o ciclo de vida de uma edificação, desde etapas de viabilidade até os estágios de demolição e reciclagem (ISIKDAG, 2015). Hoje em dia pode ser considerado como o campo mais ativo de pesquisa em Informática na Construção do mundo (ISIKDAG, 2015).

A origem do BIM está associada ao desenvolvimento de duas áreas de conhecimento: o Projeto Auxiliado por Computador (CAD) e a Representação de Informação do Produto de Construção (ISIKDAG, 2015). Por meio da tecnologia BIM, modelos virtuais precisos de um edifício podem ser construídos e gerenciados digitalmente (AZHAR, 2011). O chamado Modelo de Informações de Construção pode ser usado para fases de planejamento, projeto, construção e operação da instalação, ajudando arquitetos, engenheiros e construtores a visualizar o que deve ser construído em um ambiente simulado, no qual é possível identificar problemas de projeto, de construção ou de operação (AZHAR, 2011). O BIM representa um novo paradigma que incentiva a integração de todos os interessados em um projeto (AZHAR, 2011).

O BIM é uma tecnologia que se baseia no modelo de banco de dados e que permite o desenvolvimento e a utilização de informações do projeto (ANDRADE; RUSCHEL, 2011). O surgimento do BIM ocorreu a partir da necessidade de se reduzir a fragmentação da indústria da AECO e fortalecer a integração entre as diferentes disciplinas, no sentido de aumentar a eficiência do setor e reduzir a perda de informações referentes ao edifício ao longo do seu ciclo de vida, o que, conseqüentemente, impacta na redução de custos (ANDRADE; RUSCHEL, 2011).

Tecnologias que proporcionam soluções adicionais para estender a capacidade original dos principais aplicativos BIM estão crescendo exponencialmente, a exemplo das ferramentas de análise estrutural ou de análise de energia (EASTMAN *et al.*, 2011). É importante compreender que o BIM representa não somente uma mudança tecnológica, mas também uma mudança em processos envolvidos no ciclo de vida do edifício, permitindo que construções sejam representadas por objetos virtuais inteligentes que carregam valiosas informações detalhadas sobre si e sobre a sua relação com outros elementos (EASTMAN *et al.*, 2011).

2.4.1 Conceitos e Definições do BIM

Os termos Modelo da Informação da Construção e Modelagem da Informação da Construção são frequentemente usados de maneira intercambiável na AECO (EASTMAN *et al.*, 2011). De acordo com a visão de Isikdag (2015), isto ocorre porque a denominação BIM é utilizada para denotar ambos os conceitos. O primeiro conceito abrange um modelo de informações compartilhadas, enquanto o segundo conceito descreve uma metodologia de gerenciamento de informações.

Para Succar (2009), o BIM interliga três campos. O **campo de tecnologia** engloba o desenvolvimento de *softwares*, *hardwares*, equipamentos e sistemas de rede de aplicabilidade direta e indireta aos setores da AECO e que são necessários para torná-los mais eficientes, produtivos e lucrativos. O **campo do processo** engloba as atividades integradas de grupos responsáveis por adquirir, projetar, construir, fabricar, gerenciar e manter as estruturas, nos quais se incluem proprietários, arquitetos, engenheiros, empreiteiros e gerentes, entre outros envolvidos da indústria da AECO. Já o **campo da política** engloba as atividades desenvolvidas por organizações como centros de pesquisa, instituições de ensino e órgãos reguladores, que atuam na regulamentação e padronização dos processos envolvidos em projetar, construir e operar uma edificação.

De acordo com o *National Institute of Building Sciences* (NIBS, 2007), o BIM é capaz de representar características físicas e funcionais de uma construção, podendo ser definido de três formas: 1) como um **produto**, BIM permite a representação de dados de forma digital e inteligente, além de criar e armazenar informações de maneira integrada, 2) como um **processo colaborativo**, BIM abrange as atividades de arquitetos, engenheiros e construtores, os recursos utilizados e o uso de padrões para automatização, e 3) como um **requisito de gerenciamento**, BIM permite a troca clara de informações, com fluxos e procedimentos de trabalho organizados e com a criação de um ambiente baseado em informações confiáveis relativas a todo o ciclo de vida do edifício.

De acordo com Andrade e Ruschel (2011), o BIM pode ser considerado como um processo de projeto desenvolvido por meio de um modelo digital que possibilita o gerenciamento

das informações de uma edificação. O BIM é capaz de promover a colaboração, coordenação, integração, simulação e otimização de projetos e das fases de construção e operação, envolvendo todo o ciclo de vida da edificação (ANDRADE; RUSCHEL, 2011).

Eastman *et al.* (2011) define o BIM como uma tecnologia de modelagem e um conjunto de processos associados para produzir, comunicar e analisar modelos de construção. Para os referidos autores, os modelos de construção têm as seguintes características:

- a) **Componentes de construção** representados de forma digitais e que contêm dados e atributos gráficos computáveis que possibilitam a sua identificação por diversos *softwares*, além de possuírem regras paramétricas que permitem que sua manipulação ocorra de maneira inteligente;
- b) **Componentes que incluem dados** capazes de representar seu comportamento para aplicações em análises e processos de trabalho;
- c) **Dados consistentes e não redundantes** que permitem que alterações sejam atualizadas e representadas em todas as vistas do componente e dos demais conjuntos aos quais ele esteja associado;
- d) **Dados coordenados**, que permitam que qualquer vista seja representada coordenadamente.

2.4.2 Modelagens Paramétricas

A definição de geometrias a partir de parâmetros tem se mostrado muito eficaz para aplicações no âmbito da construção civil. As entidades paramétricas podem ser manipuladas e transformadas a partir de atributos e propriedades que estão intrinsecamente associados à sua representação (FLORIO, 2007). Este comportamento permite que variações de dimensões, proporções e formas sejam feitas e atualizadas instantaneamente, o que é muito útil para avaliar alternativas de um mesmo projeto, para fazer revisões e para diminuir conflitos entre elementos, aumentando assim a produtividade (FLORIO, 2007).

Na modelagem paramétrica, os objetos da construção não possuem geometrias e propriedades fixas, estes são representados por parâmetros e regras responsáveis por determinar a sua geometria e, também, algumas propriedades e características não geométricas (EASTMAN *et al.*, 2011). Este processo de representação permite a atualização automática dos objetos, conforme o comando do usuário ou mediante mudanças de contexto (EASTMAN *et al.*, 2011). Através de conjuntos base de famílias, que podem ser estendidas, modificadas ou acrescidas em cada projeto, é possível criar qualquer número de instâncias de objetos em diferentes localizações, cujas formas dependerão dos parâmetros e de relações com outros objetos existentes (EASTMAN *et al.*, 2011).

Ao longo do projeto paramétrico, o projetista define uma classe de elementos, ou uma família, ao invés de projetar uma instância de elemento de construção (que poderia ser uma parede ou uma porta, por exemplo) e cada objeto é definido através de parâmetros que poderão abranger distâncias, ângulos e regras, do tipo “fixado a”, “paralelo a”, “distante de”, etc. (EASTMAN *et al.*, 2011). Quando uma parede é colocada em um modelo paramétrico de um edifício, ela automaticamente estará associada às superfícies que a delimitam, aos seus planos de base e topo e às demais paredes com as quais possua alguma interseção, além disso, estarão limitados os espaços em ambos os seus lados (EASTMAN *et al.*, 2011).

Os objetos paramétricos permitem a geração de modelos com geometrias complexas cuja modelagem seria impossível com tecnologias anteriores ao BIM (EASTMAN *et al.*, 2011). Uma vez definidos no projeto, os atributos dos objetos são fundamentais para servir de interface para diversas aplicações (EASTMAN *et al.*, 2011). Além da modelagem paramétrica, a interoperabilidade e a colaboração utilizadas na construção civil também precisam ser mais exploradas para evoluir em relação a outros setores da indústria (ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

2.4.3 Escalabilidade

A escalabilidade permite que o BIM permaneça responsivo independentemente do número de objetos paramétricos 3D no projeto, o que permite que ele mantenha a habilidade de lidar com combinações de projeto de grande escala mesmo que as modelagens sejam feitas com altos níveis de detalhe (EASTMAN *et al.*, 2011). A escalabilidade, porém, dependerá da capacidade do computador e do sistema operacional utilizado (EASTMAN *et al.*, 2011).

2.4.4 Interoperabilidade

A interoperabilidade é uma condição básica para que o BIM possa permitir a comunicação entre diferentes sistemas, além da comunicação entre diferentes disciplinas de um projeto ao longo do ciclo de vida da edificação. É necessário que os modelos sejam interoperáveis para que se possa simular, analisar e avaliar cenários, bem como verificar interfaces referentes à operação e manutenção (ADDOR *et al.* 2010). Problemas de baixa interoperabilidade tornam-se obstáculos para a utilização do BIM, porque dificultam a troca de informações (ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

Eastman *et al.* (2011) definem interoperabilidade como a capacidade de trocar dados entre aplicativos no intuito de colaborar para o andamento do trabalho em questão, suavizando fluxos de trabalho e facilitando sua automação. Está também relacionada ao mapeamento de informações de determinado aplicativo e de subsídios necessários para que estas sejam logicamente interpretadas por outro aplicativo (EASTMAN *et al.*, 2011).

Uma das vantagens trazidas pela interoperabilidade é evitar que seja necessário fazer cópias manuais de dados provenientes de aplicativos distintos, o que contribui para a redução de erros e inconsistências (EASTMAN *et al.*, 2011). Além disso, o aumento da capacidade de interação permite que sejam encontradas soluções melhores e mais específicas para problemas complexos (EASTMAN *et al.*, 2011). No que se refere aos fluxos de dados entre aplicativos, estes podem variar em função do estágio de capacidade do BIM, dos tipos de dados envolvidos e do método de transferência. É possível classificar tais fluxos como troca de dados ou intercâmbio de dados (SUCCAR, 2009; ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

O primeiro tipo de troca de dados ocorre quando são exportados ou importados dados não estruturados e não computáveis e um exemplo deste fluxo é o que ocorre quando são exportados desenhos em CAD a partir de modelos BIM, o que resulta em perdas consideráveis de dados geométricos e semânticos (SUCCAR, 2009). O segundo tipo de troca de dados, por sua vez, pressupõe a existência de interoperabilidade adequada entre o BIM e o outro aplicativo relacionado, ou seja, entre o emissor e o receptor, e ocorre quando são exportados ou importados dados estruturados e computáveis em um processo que resulta em poucas perdas (SUCCAR, 2009).

2.4.5 Extensibilidade

As plataformas BIM possuem APIs amplas e bem documentadas, além de oferecerem suporte às linguagens de programação interativas que podem ser utilizadas por desenvolvedores para personalizá-lo, adicionando funcionalidades ou automatizando tarefas, o que caracteriza a sua extensibilidade (EASTMAN *et al.*, 2011). Este recurso funciona de forma semelhante à AutoLISP do AutoCAD e é importante para gerar funções especializadas, além de permitir a programação de interfaces para outros aplicativos, possibilitando a interoperabilidade (EASTMAN *et al.*, 2011).

Devido a interoperabilidade e extensibilidade, a partir de um modelo original do BIM é possível aplicar abordagens de mapeamento e derivação para obter os chamados modelos derivados, que representam novas formas de visualização geradas a partir do próprio arquivo BIM ou então do banco de dados, API ou interface Web do servidor BIM (ISIKDAG, 2015). Essas visualizações geradas podem ser do tipo transitórias (temporárias) ou do tipo persistentes (permanentes), a depender das necessidades do projeto (ISIKDAG, 2015).

Com relação aos modelos derivados do banco de dados, o BIM pode se beneficiar do SaaS da Computação em Nuvem para melhorar o compartilhamento da informação e minimizar problemas de armazenamento e compartilhamento, além abrir a possibilidade de vinculação online de dados provenientes de sensores da IoT aos elementos virtuais de construção

do BIM (ISIKDAG, 2015). Com o avanço da Indústria 4.0 e o surgimento de tecnologias associadas ao conceito de *Smart Built Environment* (SBE) relatado por Zhang, Seet e Lie (2015), no qual objetos inteligentes estão conectados e interagem com as instalações construídas, surge a necessidade de estudar o papel que o BIM pode desempenhar nesse contexto.

2.4.6 Plataforma para Ecossistemas Digitais baseadas em BIM

Os Ecossistemas Digitais, introduzidos na Seção 2.2, geralmente são orientados por uma plataforma, que se torna o seu principal componente (SAWHNEY; ODEH, 2020). Em geral, as plataformas são recursos, computacionais ou não, que conectam diferentes grupos de partes interessadas visando à obtenção de benefícios mútuos (SAWHNEY; ODEH, 2020). No caso dos Ecossistemas Digitais, essas plataformas são o *software* principal ou uma ferramenta digital (SAWHNEY; ODEH, 2020). Na indústria da construção civil, a plataforma pode ser um *software* BIM, a partir do qual diversas ferramentas e aplicativos complementares podem ser desenvolvidos (SAWHNEY; ODEH, 2020).

Por exemplo, uma empresa desenvolve uma ferramenta de criação BIM que se torna a plataforma principal de um ecossistema (SAWHNEY; ODEH, 2020). Esta empresa (membro principal do ecossistema) fornece as interfaces necessárias (objetos ou APIs, por exemplo) para permitir o acesso às funcionalidades da plataforma (SAWHNEY; ODEH, 2020). Com acesso às interfaces, usuários ou colaboradores externos desenvolvem e adicionam novos produtos (ou serviços) complementares à plataforma principal, como o exemplo de um aplicativo, visando atender às demandas de clientes e usuários finais (TIWANA, 2014; SAWHNEY; ODEH, 2020).

As plataformas consistem no conjunto das principais tecnologias habilitadoras e na infraestrutura com a qual aplicativos podem se comunicar, interagir e interoperar (TIWANA, 2014). Dentro desta lógica, o desenvolvedor da plataforma, os desenvolvedores de aplicativos complementares e os usuários fornecem e extraem valor do ecossistema (SAWHNEY; ODEH, 2020). O objetivo final é desenvolver novos recursos mais rapidamente e promover um nível de inovação muito além do previsto na versão original (TIWANA, 2014). Sawhney e Odeh (2020) fornece três exemplos de Ecossistemas Digitais que utilizam o BIM: 1) Procore, 2) Bentley iModel.js e 3) Autodesk Forge. Este último é o Ecossistema Digital utilizado no presente estudo e que será apresentada em seguida.

A plataforma Autodesk Forge promove um Ecossistema Digital apropriado para as indústrias, incluindo a da construção civil (SAWHNEY; ODEH, 2020). O Autodesk Forge permite que os desenvolvedores façam a integração de seus fluxos de trabalho com diversos produtos da Autodesk (AutoCAD, Revit, Fusion e BIM 360), incorporando componentes destes produtos em seus aplicativos móveis ou aplicativos da Web (SAWHNEY; ODEH, 2020).

As APIs, indicadas no Quadro 4, são fornecidas como SaaS aos usuários e desenvolvedores, tornando possível criar e modificar modelos BIM, bem como extrair e analisar seus dados utilizando os referidos aplicativos externos (SAWHNEY; ODEH, 2020). Diversas organizações já utilizam o ecossistema Forge para desenvolver produtos complementares para os seus clientes (SAWHNEY; ODEH, 2020).

Quadro 4 - Descrição das principais das APIs do Autodesk Forge.

API	DESCRIÇÃO
Visualizador	Permite incorporar modelos de diferentes formatos de arquivos para serem exibidos diretamente no navegador para a interação com o usuário, sem que seja necessária a instalação de outros <i>softwares</i> adicionais.
API de gerenciamento de dados	Permite que os dados do projeto sejam acessados centralmente a partir do Fusion, do BIM 360 e dos serviços de armazenamento em Nuvem para criação de aplicativos.
API de derivação do modelo	Permite converter arquivos de projeto em formatos que ampliam seu potencial e criar novos aplicativos. É possível extrair geometrias e metadados de diversos tipos de formatos de arquivos usualmente utilizados pela indústria.
API de automação de projeto	API de automação de design: permite gerar um grande número de scripts nos projetos para automatizar tarefas repetitivas no contexto da Nuvem, sem que seja necessário fazer novos <i>downloads</i> ou <i>uploads</i> no processo.
API de captura de realidade	Permite criar modelos a partir de fotogrametria e processos digitais para obtenção de imagens, a exemplo das que são capturadas por câmeras portáteis ou por drones. Esta função acelera a transferência de dados para o BIM.
API do BIM360	Permite a criação de aplicativos para ampliar os recursos da plataforma BIM 360, automatizando fluxos de trabalho e configurações de projeto de modo a reduzir a entrada manual de dados.
API de desenvolvimento Web	Permite atualizar aplicativos com notificações sobre alterações em projetos, arquivos e pastas em tempo hábil.
Autenticação	A autenticação e autorização são baseadas em chaves de acesso (<i>tokens</i>) com base no padrão OAuth 2.0 para autenticar solicitações às APIs ou SDKs do Forge.

Fonte: Adaptado de Autodesk Forge (2020).

2.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO 2

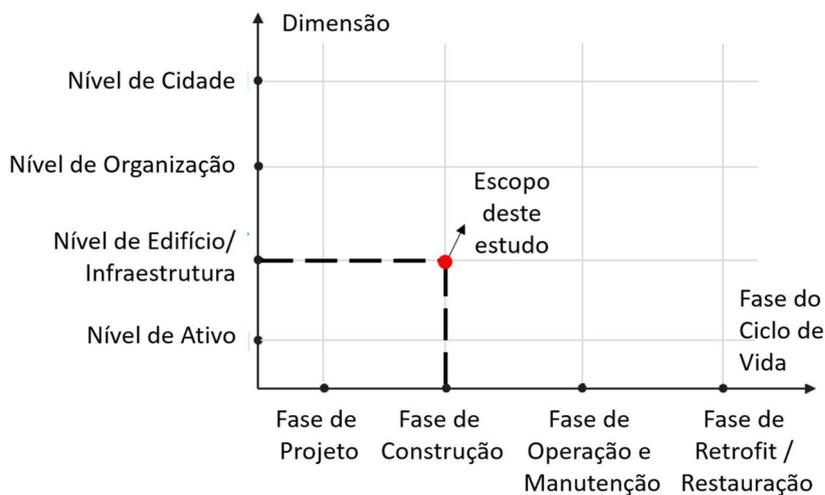
Este capítulo estabeleceu uma base conceitual para compreensão das tecnologias digitais IoT e BIM. No início do capítulo, a pesquisa foi devidamente inserida no contexto da Indústria 4.0 e na estrutura geral do CPS na Construção 4.0. A consolidação deste último termo reforça a intenção do setor da construção civil de absorver novas tecnologias, embora as iniciativas de adoção ainda aconteçam de maneira tímida. Espera-se que novas pesquisas incentivem uma adoção mais ampla para ajudar a reduzir a fragmentação no setor e melhorar a produtividade e a qualidade, entre outros benefícios mencionados.

Os temas IoT e BIM foram abordados separadamente no capítulo, visando ressaltar a importância individual que possuem e alcançar uma maior profundidade conceitual na revisão. A organização do capítulo também teve como objetivo conduzir o leitor a refletir sobre as possíveis interfaces para a integração proposta. No caso da IoT, existem poucos estudos voltados para a sua aplicação na construção civil, o que motivou a apresentação mais detalhada da sua estrutura e potencial. No caso do BIM, embora seu uso esteja mais consolidado na construção civil, muitas vezes a sua capacidade total não é bem compreendida e não é bem explorada, o que justifica a necessidade da discussão de alguns dos seus aspectos.

Na Seção 2.3 deste capítulo foram discutidos definições e aspectos da arquitetura, funcionalidade, conectividade, uso dispositivos inteligentes e desafios para utilização da IoT. Um dos destaques desta discussão é a tecnologia RFID, que consiste em uma das principais formas de operacionalizar a IoT (tecnologia habilitadora), principalmente no monitoramento e controle de espaços físicos. Com base nisso, no presente estudo será proposto um sistema com RFID para o rastreamento de recursos físicos no canteiro de obras. A Computação em Nuvem também foi um dos destaques e embora tenha sido posicionada no tema IoT, também pode ser associada ao BIM, sendo um dos elementos de integração entre ambos.

Na Seção 2.4 deste capítulo foram discutidos definições e aspectos de funcionalidade, modelagem paramétrica, escalabilidade, interoperabilidade, extensibilidade e aplicações em Plataformas Digitais para os Ecossistemas Digitais. As dimensões conceituais abordadas indicam a forma como o BIM lida com os dados e informações da construção civil nas diferentes fases do ciclo de vida de um edifício. Os quatro últimos tópicos abordados no capítulo ressaltam as possibilidades de interface do BIM com outras tecnologias digitais. Destaca-se que, embora o BIM possa ser utilizado em toda as fases do ciclo de vida, este trabalho tem como foco a fase de construção e limita-se ao nível de infraestrutura e edifício, conforme ilustrado na Figura 11.

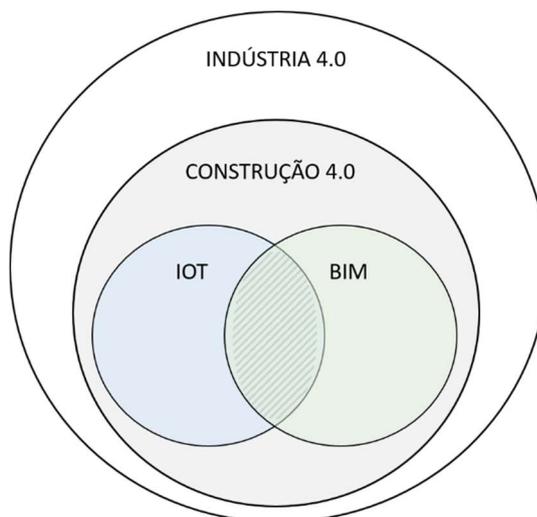
Figura 11 - Fase do ciclo de vida e dimensão de aplicação do presente estudo.



Fonte: Adaptado de Lu *et al.* (2020).

O escopo geral do Capítulo 2 está ilustrado na Figura 12. A área de interseção entre IoT e BIM será melhor discutida no **Capítulo 3**.

Figura 12 - Relação entre conceitos do Capítulo 2.



Fonte: Autora (2020).

No **Capítulo 3**, os conceitos individuais de IoT e BIM serão abordados de maneira integrada na composição dos Gêmeos Digitais. Também serão esclarecidos aspectos da área geral de aplicação, que é o Gerenciamento e Controle de Obras, e os requisitos necessários para rastrear os recursos físicos com IoT, RFID e BIM em uma estrutura unificada. A integração de IoT com BIM têm um grande potencial para gerar inovação e solucionar problemas na indústria da construção civil. O tema é atual, envolve conhecimentos multidisciplinares e representa uma tendência de pesquisa no mundo.

3 INTEGRAÇÃO DE IOT E BIM

Neste capítulo são discutidos alguns conceitos, procedimentos e requisitos referentes à integração proposta. Inicialmente, o Gerenciamento e Controle de Obras é apresentado como área geral de aplicação da pesquisa. Em seguida é abordado o conceito de Gêmeo Digital, que é um dos possíveis desdobramentos da integração de IoT e BIM e que está alinhado com a proposta deste estudo. Também são apresentados métodos de integração de BIM com IoT identificados na literatura. Finalmente, a seção de rastreamento de recursos físicos é apresentada, com os resultados de uma revisão da literatura realizada para identificar requisitos práticos do rastreamento de recursos físicos com RFID e BIM. O capítulo se encerra com a apresentação de uma estrutura conceitual da pesquisa desenvolvida com base na revisão da literatura.

3.1 GERENCIAMENTO E CONTROLE DE OBRAS

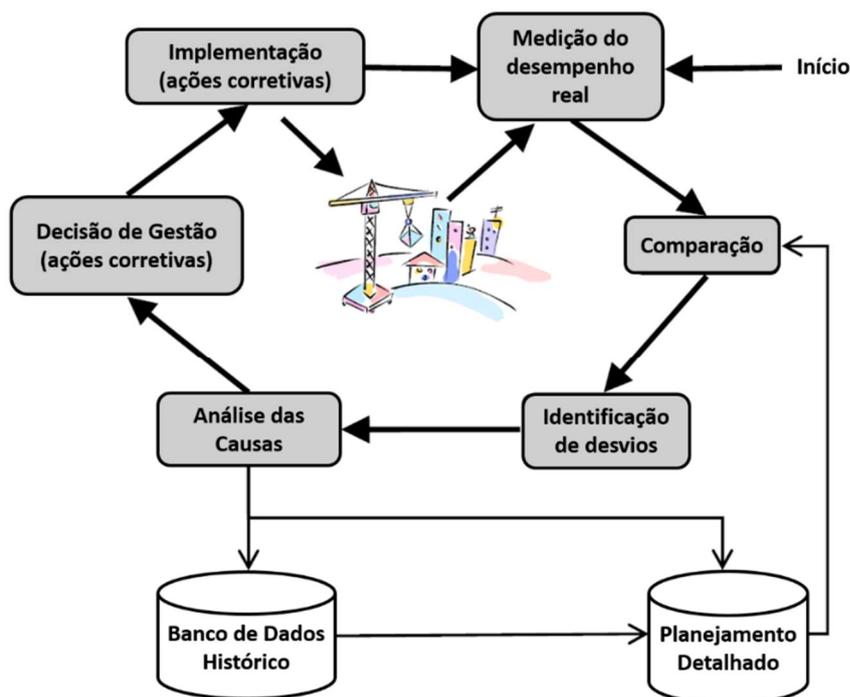
Na indústria da construção, o gerenciamento de projetos é a prática profissional de planejar, programar, monitorar e controlar uma determinada quantidade de recursos (materiais, mão de obra e equipamentos, por exemplo) visando atingir um conjunto de metas, que geralmente consistem em diversas melhorias de engenharia voltadas para um evento único e específico, que é o projeto (DEL PICO, 2013). O termo projeto está sendo empregado nesta seção para definir um empreendimento único, de natureza temporária, que possui objetivos bem definidos e limites específicos de tempo e custo (DEL PICO, 2013).

O controle é a essência de qualquer gerenciamento de projeto, pois fornece as ferramentas analíticas necessárias para manter o projeto dentro do prazo e do orçamento previstos (DEL PICO, 2013). Controlar o projeto significa, em geral, tomar decisões baseadas em todas as informações disponíveis no momento para orientar o projeto da melhor forma possível (DEL PICO, 2013). Isto inclui fazer ajustes no plano e no cronograma quando inevitavelmente ocorrerem mudanças (DEL PICO, 2013). Quando existem poucos mecanismos de controle na obra, o *status* real de avanço do projeto nunca é efetivamente conhecido (DEL PICO, 2013).

Os processos de monitoramento e controle estabelecem um sistema de orientação ou um conjunto de métricas para medir e comparar, a partir da observação do processo de execução, se o desempenho real corresponde ao desempenho planejado (DEL PICO, 2013). O monitoramento do andamento do trabalho deve ser baseado em ciclos de *feedback* da obra, que são uma parte essencial do processo de identificação de desvios, análise de causas e tomada de decisão (NAVON, 2007; DEL PICO, 2013). Em geral, os ciclos de *feedback* costumam acontecer com comunicações verbais, relatórios diários escritos em campo, relatórios de rastreamento de mão de obra e registros de entregas de materiais, marcos alcançados e atividades futuras (DEL PICO, 2013).

Quando o progresso do projeto fica aquém do planejado ou sofre desvios com relação ao cronograma, as ações corretivas podem ser implementadas pelo gerente de projeto para alcançar os resultados originalmente previstos (DEL PICO, 2013). É essencial que estas ações sejam tomadas em tempo hábil para que sejam eficazes (NAVON, 2005; DEL PICO, 2013). A Figura 13 ilustra e resume o ciclo do controle de desempenho na produção, conforme as informações que foram apresentadas nesta seção.

Figura 13 - Ciclo do controle de desempenho na produção.



Fonte: Traduzido de Navon (2007).

Quanto maior for o tempo necessário para identificar os desvios entre o desempenho desejado e o real, maior será o potencial dano e mais complexas e caras serão as ações corretivas (DEL PICO, 2013). Desta forma, se torna cada vez mais essencial que a medição do desempenho real seja baseada em dados de alta qualidade coletados em tempo hábil no campo (NAVON, 2005). Os dados de alta qualidade também são importantes para atualizar o banco de dados histórico do projeto e da empresa (NAVON, 2005). No entanto, o controle de desempenho tradicional costuma ser feito de maneira genérica e baseada em uma coleta manual e massiva de dados (NAVON, 2005). De acordo com Navon (2007), a prática atual costuma envolver as seguintes deficiências:

- a coleta manual de dados para medição de desempenho é dispendiosa e muito propensa a erros e ao fornecimento de dados de baixa qualidade;
- o processo requer a extração extensiva de dados em arquivos, desenhos, cronogramas, orçamentos ou bancos de dados históricos;

- o controle dos projetos normalmente é feito com uma frequência de vezes relativamente baixa, dificultando a análise das causas dos desvios;
- os projetos não são controlados em tempo hábil, mas somente algum tempo após o evento controlado ter ocorrido, o que dificulta significativamente a tomada de medidas corretivas.

Muitas decisões relevantes do controle de produção devem ser tomadas imediatamente no local, por isso, geralmente requerem acesso imediato aos dados relevantes (HWANG; LIU, 2010). A crescente necessidade de informações de *feedback* e monitoramento sobre o desempenho do projeto indicam a necessidade de melhorias nos processos tradicionais (NAVON, 2007). De acordo com Navon (2007), entre as oportunidades de melhorias, destacam-se: (a) o crescente desenvolvimento de tecnológicas promissoras, como o RFID, que motivam iniciativas de pesquisa, (b) a redução considerável do custo destas tecnologias, e (c) a constante evolução no desempenho dessas tecnologias em termos de precisão e confiabilidade.

Nas últimas décadas, existiram diversas tentativas de desenvolver sistemas de aquisição de dados de campo em tempo real para automatizar o controle de projetos de construção em áreas como o controle de segurança, monitoramento de progresso e controle da qualidade (HWANG; LIU, 2010). Embora algumas delas mostrassem potencial, a maioria também apresentou limitações significativas (HWANG; LIU, 2010). O avanço em tecnologias como as de rastreamento com RFID e o avanço do BIM representam uma oportunidade de evolução significativa neste campo (HWANG; LIU, 2010), a partir de novas pesquisas e aplicações.

O BIM pode ser usado em conjunto com tecnologias específicas de posicionamento para gestão da qualidade no canteiro de obras (MA *et al.*, 2018). Diversos pesquisadores indicam que o BIM pode ser útil para melhorar a qualidade na construção porque fornece consistência dos dados do projeto com os dados da qualidade e consistência do processo de construção com o processo de controle da qualidade (CHEN; LUO, 2014). O potencial de implementação do BIM nesta área reside também na capacidade de apresentar dados multidimensionais, incluindo dados do projeto e sequência temporal (CHEN; LUO, 2014).

Qualidade é um dos aspectos mais vitais de um projeto de construção (MA *et al.*, 2018) e pode ser entendida de duas formas: 1) consiste nos recursos dos produtos que atendem às necessidades do cliente e que, portanto, proporcionam a sua satisfação, e 2) consiste em estar livre de deficiências, ou defeitos e erros que prejudique a adequação de um produto ao seu uso, que exigiriam trabalho repetido (retrabalho) ou resultariam em falhas de campo e/ou insatisfação do cliente (JURAN; GODFREY, 1998).

Controle da qualidade, por sua vez, pode ser entendido como um processo gerencial universal para a condução de operações visando fornecer estabilidade e evitar mudanças

adversas (JURAN; GODFREY, 1998). Para fornecer estabilidade, o processo de controle da qualidade avalia o desempenho real, compara o desempenho real aos objetivos e age sobre a diferença resultante (JURAN; GODFREY, 1998). Segundo Chen e Luo (2014), uma das dificuldades observadas nas obras é que o foco do controle da qualidade geralmente está no componente final e pouca atenção é dada ao processo de construção, o que contribui para a ocorrência de defeitos e problemas de gestão.

A inspeção é uma das mais importantes tarefas no controle da qualidade e, geralmente, envolve muitos itens de verificação e objetos de destino, de modo que alguns deles podem ser acidentalmente esquecidos pelos inspetores em campo (MA *et al.* 2018). Além disso, em muitas empresas o registro de dados da inspeção é feito manualmente em papel, de modo que só depois o resultado é transferido para algum *software* gerencial específico (MA *et al.* 2018). Isso pode tornar o processo de inspeção ineficiente e suscetível a falhas que podem comprometer todo o gerenciamento da qualidade, principalmente, quando também existem ineficiências no processo de comunicação desses resultados entre participantes do projeto (MA *et al.* 2018).

Ma *et al.* (2018) desenvolveram e testaram um sistema baseado em tecnologias de posicionamento interno e BIM para gestão da qualidade da construção, cujas funções envolviam a capacidade de gerar as tarefas de inspeção necessárias, coletar os dados da inspeção e resumir os resultados da inspeção de forma automatizada, reduzindo significativamente a carga de trabalho dos inspetores e facilitando a comunicação e colaboração entre os participantes do projeto. O sistema foi considerado bem-sucedido.

Chen e Luo (2014), por sua vez, desenvolveram um modelo integrado para gestão da qualidade baseado no BIM 4D e o modelo apresentou as seguintes vantagens: 1) a utilização das informações diretamente do projeto garante a consistência, 2) os códigos de construção podem ser totalmente padronizados e estruturados ao serem integrados no modelo e 3) a aplicação 4D garante a inspeção e a virtualização do processo global, ajudando os participantes do projeto a entenderem melhor os requisitos de qualidade e a colaborar com base na visualização. No entanto, entre as limitações identificadas estão: 1) um modelo tridimensional do BIM desenvolvido para projeto não contém estruturas temporárias, como por exemplo, formas externas e andaimes, que precisarão ser adicionadas ao modelo original, e 2) pode existir uma dificuldade de uso de computadores ou dispositivos móveis no local da obra, comprometendo o registro de dados de campo e a transferência direta de dados para o BIM.

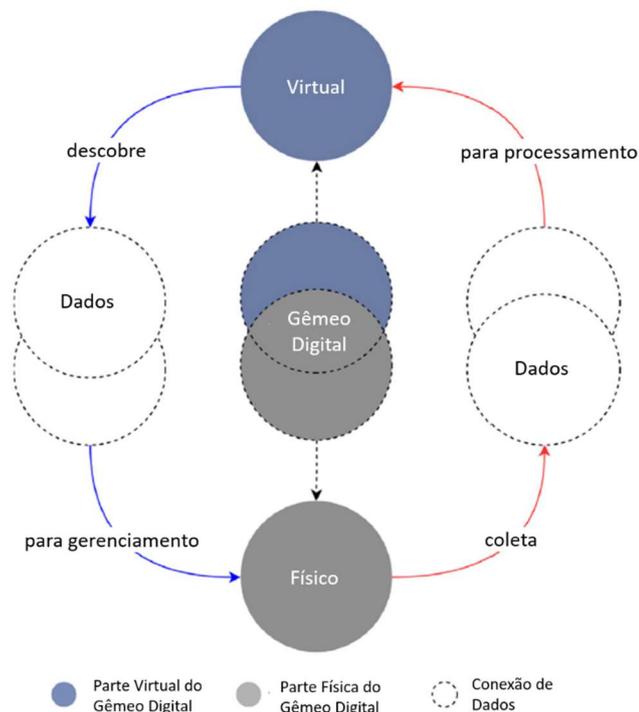
3.2 GÊMEOS DIGITAIS

Um Gêmeo Digital pode ser definido como um perfil digital dinâmico (em constante mudança) que contém os dados históricos e mais relevantes sobre objetos ou processos físicos

representados, permitindo otimizações em seus desempenhos (KUPRIYANOVSKY *et al.* 2020). Segundo Lu *et al.* (2020), o Gêmeo Digital replica digitalmente o comportamento de ativos físicos com base em dados adquiridos (LU *et al.*, 2020). O seu desenvolvimento tem como objetivo ajudar as empresas a detectar problemas físicos mais rapidamente, prever resultados com mais precisão e alcançar melhorias nos produtos gerados (KUPRIYANOVSKY *et al.* 2020). As previsões de desempenho geradas representam uma base precisa para tomadas de decisão (MATEEV, 2020).

A partir dos dados da sua camada sensorial, o Gêmeo Digital responde às necessidades dos usuários (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020), operando na visualização, simulação, manifestação, observação e controle do Gêmeo Físico (PISHDAD-BOZORGI; GAO; SHELDEN, 2020). Uma vez criado, o Gêmeo Digital pode ainda ser vinculado a aspectos comerciais do processo de produção (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020), a depender do nível de maturidade que alcance. Gêmeos Digitais têm sido utilizada na Indústria 4.0 em atividades de engenharia, manufatura, operação, manutenção e serviços (MATEEV, 2020) e seus principais componentes (virtuais, físicos e de conexão de dados) estão indicados na Figura 14.

Figura 14 - Principais componentes de um Gêmeo Digital.



Fonte: Traduzido de Boje *et al.* (2020).

3.2.1 Gêmeos Digitais na Construção 4.0

O CPS fornece a estrutura necessária para criar um Gêmeo Digital de uma unidade de fabricação como o canteiro de obras (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020). Os componentes físicos são conectados e sincronizados com o Gêmeo Digital através de sensores

(SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020). Para completar o ciclo (*loop* de dados), também é possível provocar alterações na unidade de fabricação através do uso de atuadores (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020). Assim, componentes físicos e digitais do CPS ficam conectados e sincronizados (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020).

Um dos principais aspectos que justificam o potencial do Gêmeo Digital do CPS é o amplo horizonte de possíveis análises de dados (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020). Com as análises é possível medir se o desempenho do Gêmeo Físico está em conformidade com os objetivos inicialmente previstos, gerando *feedbacks* que permite avaliar também a eficácia do projeto (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020). Assim, registra-se tanto as intenções iniciais do projeto como o *status* conforme construído (VASEY; MENGES, 2020). Nesse sentido, os Gêmeos Digitais do CPS podem ser muito úteis, por exemplo, para o monitoramento do progresso da construção (PISHDAD-BOZORGI; GAO; SHELDEN, 2020).

Algumas das áreas de aplicação de Gêmeos Digitais na indústria da construção são: otimização de energia, análise de estruturas complexas, teste de materiais, monitoramento estrutural visando aumentar a segurança humana, reduzir custos de manutenção e promover otimizações (MATEEV, 2020), além das cidades inteligentes (GAO *et al.* 2018), localização de ativos, monitoramento de saúde e segurança dos trabalhadores em campo, segurança no canteiro de obras e gerenciamento de situações de emergência (PISHDAD-BOZORGI; GAO; SHELDEN, 2020).

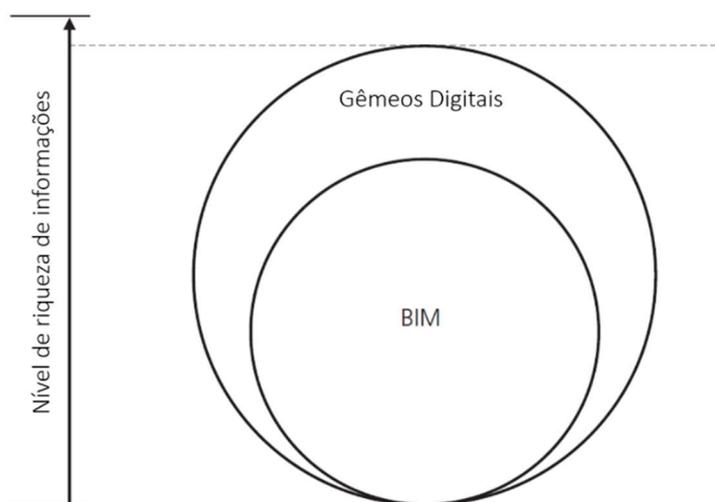
Um exemplo de Gêmeo Digital é um banco de dados que registra em detalhes todos os acontecimentos da fase de construção de um edifício, indicando: 1) uma linha do tempo com registro de todas as alterações de *status* relacionadas a atividades para entrega de um projeto, 2) o registro de quem reportou as alterações de *status*, 3) o registro de questões e obstáculos enfrentados durante o processo de construção, e 4) o registro de quando as questões e obstáculos foram resolvidos e de quem as resolveu (MATEEV, 2020). Observa-se que existem aplicações que não utilizam um modelo virtual geométrico do objeto ou processo físico representado para criar um Gêmeo Digital.

A vantagem das representações tridimensionais para criar um Gêmeo Digital é que os dados coletados podem ser relacionados em um contexto espacial, o que se adequa bem às necessidades da construção civil (VASEY; MENGES, 2020). O BIM claramente tem um grande potencial como Gêmeo Digital do ambiente construído (PISHDAD-BOZORGI; GAO; SHELDEN, 2020) e já vem sendo utilizado como infraestrutura para diversos aplicativos de CPS (PISHDAD-BOZORGI; GAO; SHELDEN, 2020). Porém, alguns obstáculos ainda precisam ser superados em termos de interoperabilidade, automação e sincronização de dados

para permitir a sua mudança de um ambiente de informação estático e fechado para um ambiente dinâmico baseado na Web (BOJE *et al.* 2020). As pesquisas no tema ainda são muito escassas (BOJE *et al.* 2020).

Modelos BIM trazem novas possibilidades de visualização e de conexão entre os mundos físico e digital e tem evoluído para alcançar o patamar dos Gêmeos Digitais (KUPRIYANOVSKY *et al.* 2020). No entanto, o conceito de Gêmeos Digitais é mais amplo do que o conceito do BIM (LU *et al.*, 2020). Ao contrário dos modelos BIM, os Gêmeos Digitais não apenas replicam o gêmeo físico, mas também são conectados a ele, atualizado automaticamente conforme o gêmeo físico muda (SACKS *et al.* 2020). Desta forma, os Gêmeos Digitais pressupõem um nível maior de riqueza de informações porque incluem: (a) a transmissão de dados em pelo menos uma direção, e (b) o monitoramento do objeto ou sistema físico em tempo hábil (LU *et al.*, 2020). A relação entre os conceitos está ilustrada na Figura 15.

Figura 15 - Classificação conceitual do BIM com relação aos Gêmeos Digitais.



Fonte: Traduzido de Lu *et al.* (2020).

Considerando a perspectiva da riqueza de informações e da capacidade analítica, o BIM sozinho não é suficiente para fornecer o gerenciamento eficaz e eficiente dos ativos monitorados (LU *et al.*, 2020). Um dos principais requisitos para transformar um modelo BIM em um Gêmeo Digital é a necessidade de lidar com a captura, troca, uso e gerenciamento sincronizado de informações ao longo de todo o ciclo de vida do ativo de interesse (LU *et al.*, 2020). Outro requisito é a necessidade de atenção aos padrões de interoperabilidade (LU *et al.*, 2020), porque as informações relacionadas à construção ou à infraestrutura precisam ser integradas de forma direta ou indireta a outras tecnologias digitais (LU *et al.*, 2020).

Os modelos BIM têm sido bem-sucedidos na representação de informações semânticas e geométricas detalhadas, porém, para torná-los um recurso vivo de fornecimento de informações em tempo hábil é preciso integrá-lo aos recursos de tecnologias (ISIKDAG, 2015), como a IoT. Por exemplo, consultando apenas um modelo convencional gerado no BIM, pode-se

descobrir se uma porta em um edifício já foi instalada, o material dessa porta ou até mesmo as alterações feitas nessa porta até a data da consulta. No entanto, não é possível saber se em um determinado momento essa porta está aberta ou fechada (ISIKDAG, 2015). Isso porque está é uma informação de *status* a ser coletada no momento, *in loco*. Soluções espaço-temporais demandam uma integração bem-sucedida de sensores de diferentes capacidades, frequências de leitura, precisões e localizações com as redes (BOJE *et al.* 2020).

Com o uso da IoT, informações significativas sobre os *status* dos elementos reais e sobre os *status* de espaços físicos podem ser fornecidas (ISIKDAG, 2015). Nesta estrutura, o BIM fica responsável por fornecer um contexto espacial significativamente aprimorado para os sistemas distribuídos baseados em IoT (GAO *et al.* 2018). Algumas das ferramentas disponíveis para o compartilhamento de informações para Gêmeos Digitais no BIM são: Trimble, Bentley (iModel.js) e Autodesk BIM 360 (VAIDYANATHAN; VARGHESE; DEVKAR, 2020). Para os possíveis usos do Gêmeos Digitais com BIM na fase de construção da obra, Boje *et al.* (2020) indicam a simulação da logística da construção, o monitoramento do canteiro de obras e o controle da segurança e da qualidade, entre outros.

Sacks *et al.* (2020) recentemente propuseram o conceito de Gêmeos Digitais da Construção, que consiste em um novo modo de gestão da construção que aproveita o fluxo de dados de uma variedade de tecnologias digitais de monitoramento baseado no local e funções artificialmente inteligentes para fornecer informações de status precisas e para analisar e otimizar proativamente o projeto, o planejamento e a produção.

Os Gêmeos Digitais da Construção propostos por Sacks *et al.* (2020) aplicam tecnologias e processos BIM, do pensamento de construção enxuta e da Inteligência Artificial para formular um modo de gestão da construção centrado em dados. Os benefícios da gestão de construção centrada em dados surgem principalmente da consciência situacional significativamente melhor que ela pode fornecer aos gerentes de construção e trabalhadores em todos os níveis, tornando a gestão da construção mais proativa do que reativa (SACKS *et al.* 2020).

Apesar dos benefícios, segundo Sacks *et al.* (2020), muito trabalho de pesquisa e desenvolvimento serão necessários para progredir no fluxo de trabalho dos Gêmeos Digitais da Construção, particularmente nas seguintes áreas: (a) interpretação de múltiplos fluxos de dados para derivar informações de status; (b) projeto de mecanismos de armazenamento de dados adequados; (c) potenciais interações entre os Gêmeos Digitais do projeto, dos recursos da construção e dos ambientes circundantes; (d) aplicabilidade de ferramentas de Inteligência Artificial; e (e) modelos de negócios comerciais e organizacionais. Os fluxos de pesquisa atuais sobre aquisição, interpretação e enriquecimento semântico de informações de imagens e nuvens de pontos também são componentes essenciais que podem ser explorados.

3.2.2 Métodos para Integração de IoT e BIM

A integração BIM e IoT ainda se encontra em estágios iniciais de pesquisa (TANG *et al.* 2019). Segundo Tang *et al.* (2019), os dados fornecidos com BIM e IoT se complementam para suprir limitações individuais destas tecnologias. Os modelos BIM oferecem representações de alta fidelidade no nível do componente do projeto, incorporando geometria, localização espacial e um conjunto escalável de propriedades (metadados), enquanto a IoT aprimora essas informações à medida que fornecem status em tempo hábil das operações em fases de construção e operação (TANG *et al.* 2019).

Os dados BIM e IoT podem ser acessados por diferentes mecanismos que incluem interfaces manuais de sistemas proprietários, APIs de programação, conexões de bancos de dados aos sistemas e exportação por meio de um dos diversos padrões abertos que tem surgido para BIM e IoT (TANG *et al.* 2019). A indústria de *softwares* BIM também já começa a desenvolver e apresentar soluções comerciais que exploram tecnologias facilitadoras para atender a integração de IoT e BIM, porém, muitas destas soluções ainda se encontram em fases iniciais de aplicação e/ou exigem programação via API (MACHADO, 2019).

Os dados gerados por dispositivos da IoT geralmente são organizados como fluxos de dados de séries temporais (TANG *et al.*, 2019). Para integrar dispositivos BIM e IoT, existem três pontos principais a serem considerados: 1) o BIM serve como repositório de dados para informações contextuais que podem ser armazenadas nas ferramentas BIM (por exemplo, no modelo do Revit) ou no formato *Industrial Foundation Classes* (IFC); 2) os dados de séries temporais coletados são armazenados em um banco de dados relacional bem estruturado que pode ser consultado com o *Structured Query Language* (SQL); e 3) é preciso escolher um método de integração entre informações contextuais e dados de séries temporais (TANG *et al.*, 2019).

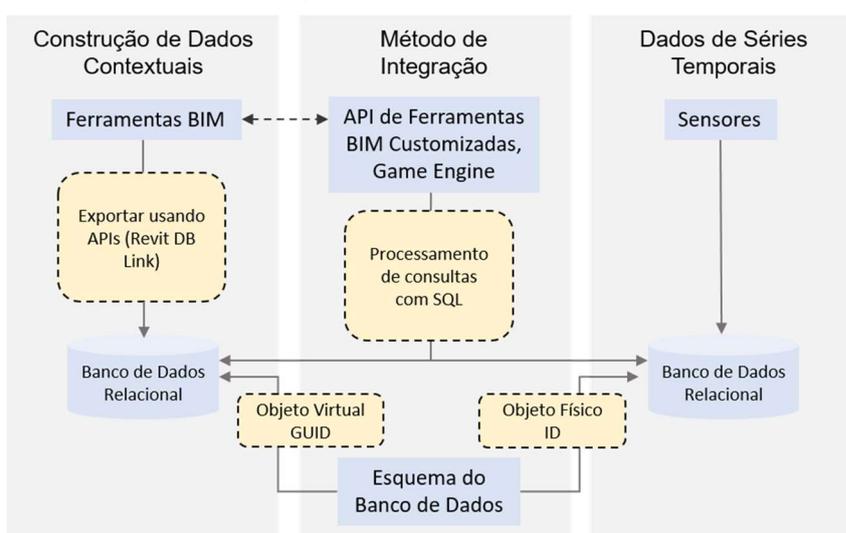
Tang *et al.* (2019) esclarecem em seu estudo que existem pelo menos cinco diferentes métodos de integração de informações contextuais (dados BIM) e séries temporais (dados do sensor). Os referidos autores analisaram metodologias e implementação revisadas em 97 artigos de 14 revistas científicas relacionadas à AEC e em bancos de dados outros setores industriais na última década. O presente estudo está mais alinhado com o primeiro método indicado por Tang *et al.* (2019), embora no presente estudo tenha sido feita uma adaptação na estrutura proposta para que fosse utilizado um banco de dados não relacional e o Forge ao invés de um *Game Engine*. Os cinco métodos serão descritos nas próximas Seções.

3.2.2.1 APIs de ferramentas BIM em conjunto com banco de dados relacional

O primeiro método aborda a utilização de APIs de ferramentas BIM com banco de dados relacionais, incluindo as seguintes etapas: (i) os dados de séries temporais coletadas pelo

sensor são armazenados e atualizados no banco de dados relacional (por exemplo, banco de dados do servidor Microsoft SQL Server ou o Microsoft Access); (ii) os modelos BIM gerados com ferramentas BIM, como o Revit, podem ser exportados para formatos de banco de dados relacionais usando APIs como o Revit DB Link, o Dynamo ou o Grasshopper; (iii) define-se um esquema de banco de dados que esclareça o relacionamento entre os objetos virtuais e os sensores físicos, o que pode ser feito por meio da utilização de um identificador exclusivo global (GUID ou UUID); (iv) as importação e exportações bidirecionais do banco de dados relacional e do modelo BIM podem ser feitas usando as APIs; e (v) o processamento de consultas de dados do sensor pode ser feito por meio de APIs personalizadas, por mecanismo de processamento de terceiros (como por exemplo o mecanismo Unity) ou por consulta direta no banco de dados SQL (TANG *et al.*, 2019). Figura 16 representa graficamente as etapas básicas desse primeiro método.

Figura 16 - APIs de ferramentas BIM em conjunto com banco de dados relacional.



Fonte: Traduzido de Tang *et al.* (2019).

Segundo o estudo de Tang *et al.* (2019), a maioria das pesquisas utilizam esse método devido às vantagens que ele apresenta. Os referidos autores apontam que a primeira vantagem é que a integração pode ser feita utilizando APIs já existentes e que os dados podem ser exportados no padrão *Open Database Connectivity* (ODBC), que é compatível com bancos de dados externos como o MS Access e o MySQL. A segunda vantagem é a maior facilidade para vincular os dados provenientes dos sensores com dados do modelo, considerando que ambos os bancos de dados são relacionais. A terceira vantagem é que utilizando as APIs os dados da série temporal podem ser atualizados automaticamente nas ferramentas BIM. A

Tang *et al.* (2019) afirmam, porém, que existem também algumas desvantagens neste método, como por exemplo, uma possível limitação em termos de atualização, considerando que apenas parâmetros compartilhados entre projetos e famílias podem ser exportados. Além

disso, embora os dados do sensor possam ser atualizados automaticamente no banco de dados relacional, a exportação manual de arquivos de modelo ocorre repetidamente se a alteração do modelo ocorrer (TANG *et al.*, 2019).

Essa abordagem se adequa melhor a modelos BIM com menor complexidade e com um número limitado de sensores, porque cada um dos sensores físicos precisa ser manualmente representado como objetos virtuais equivalentes (TANG *et al.*, 2019). Este método requer menos experiência em IFC e em programação, além de oferecer uma facilidade de uso que motiva uma adoção mais ampla (TANG *et al.*, 2019).

3.2.2.2 Dados do BIM em banco de dados relacional com um novo esquema de dados

Segundo Tang *et al.* (2019), este método consiste em transformar dados do BIM em um banco de dados relacional bem estruturado para consulta SQL, permitindo a extração de informações da perspectiva de diferentes usuários. Uma das formas de vincular os dados dos sensores ao BIM é conectando sensores físicos às respectivas representações virtuais dos sensores via GUID. Os dados coletados dos sensores físicos são mapeados como propriedades dos sensores virtuais. Este método pode ser adotado através da manipulação de modelos IFC (TANG *et al.*, 2019).

Este método é mais flexível para projetos complexos, com contexto espacial complicado e muitos sensores, mas os referidos autores pontuam que criar um novo esquema de dados requer esforços significativos no mapeamento de dados, o que demanda tempo (TANG *et al.*, 2019). Além disso, é necessário manipular o SQL caso seja necessário realizar consultas ao banco ou fazer operações especiais. Quando comparado ao uso de APIs de ferramentas BIM já existentes, esse método requer mais experiência em IFC, banco de dados e conhecimento de programação (TANG *et al.*, 2019).

3.2.2.3 Abordagem com nova linguagem de consulta

Segundo Tang *et al.* (2019), esse método consiste em criar uma nova linguagem de consulta para acessar dados do sensor nos modelos BIM ou modelos IFC, ao invés de usar SQL. Utiliza-se uma abordagem que retém dados contextuais e dados de séries temporais em sua forma original, que pode ser aplicada a vários tipos de projetos sem demandar uma modelagem pesada ou o mapeamento de dados.

Uma das limitações desse método é a dificuldade de integrar os dados do sensor em tempo real com o BIM, considerando que é quase impossível transformar os dados do sensor em tempo real em formato IFC e armazená-los no modelo BIM (TANG *et al.*, 2019). As linguagens de consulta desenvolvidas até então não têm ainda a capacidade de consultar dados do sensor em tempo real, sendo necessário o uso de ferramentas externas para o processamento

do fluxo de eventos, como por exemplo o software Esper (TANG *et al.*, 2019). Segundo os referidos autores, a abordagem proposta nesse método raramente é discutida na literatura e requer conhecimento de design de linguagem e programação de API (TANG *et al.*, 2019).

3.2.2.4 Abordagem com Web Semântica

Segundo Tang *et al.* (2019), a integração de BIM e tecnologias de Web Semântica utiliza a representação de conjunto de dados heterogêneos com *Resource Description Format* (RDF) e tem potencial para atender aos requisitos de armazenamento e compartilhamento de projetos com IoT e BIM. As etapas básicas para implementação estão listadas a seguir: (i) as informações contextuais, informações do sensor e outras informações da construção são representadas no padrão RDF, usando abordagem de Web Semântica; (ii) os dados de séries temporais coletados pelo sensor são extraídos do banco de dados relacional e representados no formato RDF, com Web Semântica; (iii) os silos de dados são vinculados a diferentes domínios por meio de uma identificação exclusiva; (iv) as consultas de informações contextuais ou consultas de dados do sensor online são conduzidas usando uma linguagem de consulta RDF chamada SPARQL; e (v) Os resultados da consulta podem ser mostrados em aplicativos de diferentes formas, inclusive através de APIs (TANG *et al.*, 2019).

A abordagem adotada nesse método é útil para projetos com um escopo mais amplo que conecta vários tipos de fontes de dados, porém, exige a modelagem de objetos virtuais, conhecimento de tecnologias da Web Semântica e uma transformação pesada de dados, que pode ser complicada para edifícios complexos e sistemas de gerenciamento de dados com leituras contínuas em tempo real (TANG *et al.*, 2019).

3.2.2.5 Abordagem híbrida, com Web semântica e banco de dados relacional

Segundo Tang *et al.* (2019), neste método utiliza-se a Web Semântica e também os bancos de dados relacionais para armazenar os dados. As etapas básicas para implementação estão listadas a seguir: (i) as informações contextuais, informações do sensor e outras informações da construção são representadas no padrão de RDF usando abordagem de Web Semântica; (ii) os dados de séries temporais coletados pelo sensor são representados no banco de dados relacional; e (iii) as informações contextuais com dados de séries temporais são mapeadas e podem ser referenciados usando o ID do sensor descrito em RDF (TANG *et al.*, 2019).

Essa abordagem reúne duas tecnologias, o que resulta em métodos de consulta integrados. As informações contextuais representadas em RDF são consultadas utilizando SPARQL, enquanto os dados de séries temporais armazenados no banco de dados relacional são consultados utilizando SQL. Como as informações contextuais e os dados de séries temporais são mapeados, as consultas SQL podem ser criadas usando consultas SPARQL em

dados RDF (TANG *et al.*, 2019). Essa abordagem é um dos métodos mais promissores para facilitar a implantação da IoT na indústria de construção, sendo adequada para diferentes tipos de projetos sem apresentar uma conversão de dados com alto custo computacional, além de oferecer uma oportunidade de integrar outras fontes de dados para estender o escopo do projeto devido à padronização que estabelece (TANG *et al.*, 2019).

3.2.3 Classes de Problemas e Séries de Usos dos Modelos da Integração IoT e BIM

Machado e Ruschel (2018) conduziram uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para identificar, analisar e estratificar em classes de problemas os componentes, modelos e métodos de soluções existentes na literatura que integram IoT e BIM, considerando as seguintes fases do ciclo de vida da edificação: Planejamento/Programa e Projeto; Construção e Comissionamento; Operação e Manutenção; e Demolição ou Descarte. As autoras seguiram a taxonomia elaborada por Succar, Saleeb e Sher (2016). Em seguida serão apresentadas as classes de problemas e as respectivas séries de uso do modelo, dentro de cada fase, conforme definido por Machado e Ruschel (2018).

3.2.3.1 Planejamento/Programa e Projeto

- Sensibilidade à Eficiência Energética: Captura e Representação, Planejamento e Projeto, Simulação e Quantificação, Monitoramento e Controle e Ligação e Extensão;
- Planejamento de Sistemas Inteligentes: Planejamento e Projeto, Simulação e Quantificação;
- Concepção e Autoria de Projetos: Planejamento e Projeto, Simulação e Quantificação, Monitoramento e Controle, Ligação e Extensão.

3.2.3.2 Construção e Comissionamento

- Gestão de Saúde e Segurança no Ambiente de Trabalho: Planejamento e Projeto, Simulação e Quantificação, Construção e Fabricação, Operação e Manutenção, Monitoramento e Controle, Ligação e Extensão;
- Detecção e Rastreamento de Objetos Inteligentes: Captura e Representação, Planejamento e Projeto, Construção e Fabricação, Operação e Manutenção, Monitoramento e Controle, Ligação e Extensão;
- Visualização, Interação e Comunicação entre Agentes no Ambiente de Trabalho: Captura e Representação, Planejamento e Projeto, Planejamento e Projeto, Construção e Fabricação, Operação e Manutenção, Monitoramento e Controle, Ligação e Extensão.

3.2.3.3 Operação e Manutenção

- Sensibilidade à Eficiência Energética: Captura e Representação, Planejamento e Projeto, Simulação e Quantificação, Monitoramento e Controle, Ligação e Extensão;
- Instrumentação e Monitoramento da Integridade Estrutural: Captura e Representação, Simulação e Quantificação, Operação e Manutenção, Monitoramento e Controle, Ligação e Extensão;
- Operações de Resposta a Emergências: Captura e Representação, Simulação e Quantificação, Operação e Manutenção, Monitoramento e Controle, Ligação e Extensão;
- Planejamento de Sistemas Inteligentes: Captura e Representação, Ligação e Extensão;
- Qualidade Ambiental Interna: Captura e Representação, Simulação e Quantificação, Operação e Manutenção, Monitoramento e Controle, Ligação e Extensão;
- Detecção e Rastreamento de Objetos Inteligentes: Captura e Representação, Planejamento e Projeto, Construção e Fabricação, Operação e Manutenção, Monitoramento e Controle, Ligação e Extensão;
- Visualização, Interação e Comunicação entre Agentes no Ambiente de Trabalho: Captura e Representação, Planejamento e Projeto, Simulação e Quantificação, Construção e Fabricação, Operação e Manutenção, Monitoramento e Controle, Ligação e Extensão.

3.2.3.4 Demolição ou Descarte

- Visualização, Interação e Comunicação entre Agentes no Ambiente de Trabalho: Captura e Representação, Planejamento e Projeto, Simulação e Quantificação, Construção e Fabricação, Operação e Manutenção, Monitoramento e Controle, Ligação e Extensão.

3.3 RASTREAMENTO DE RECURSOS FÍSICOS EM CANTEIROS DE OBRA

Esta seção apresenta uma Revisão Sistemática da Literatura com o propósito de identificar quais são os principais requisitos para o desenvolvimento de um sistema RFID / IoT / BIM para rastrear formas metálicas, objeto de estudo deste trabalho, tendo como base estudos da literatura que utilizaram tecnologias e métodos adaptáveis para o contexto das formas, embora tenham utilizado diferentes aplicações para outros recursos físicos. O Quadro 5 indica os artigos que fazem parte da amostra obtida com a RSL, com indicação dos autores, do ano de publicação e do título.

Quadro 5 - Lista dos 16 trabalhos na amostra final.

AUTOR	ANO	TÍTULO
Akanmu, Anumba e Messner	2012	<i>An RTLS-Based Approach to Cyber-Physical Systems Integration in Design and Construction.</i>
Ikonen <i>et al.</i>	2013	<i>Use of embedded RFID tags in concrete element supply chains.</i>
Motamedi, Soltani e Hammad	2013	<i>Localization of RFID-equipped assets during the operation phase of facilities.</i>
Wang <i>et al.</i>	2013	<i>A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality.</i>
Costin, Teizer e Schoner	2015	<i>RFID and BIM-enabled worker location tracking to support real-time building protocol control and data visualization.</i>
Feng <i>et al.</i>	2015	<i>An Intelligent Logistics Management Model in Prefabricated Construction</i>
Zhong <i>et al.</i>	2015	<i>Towards Physical Internet-enabled Prefabricated Housing Construction in Hong Kong.</i>
Akanmu <i>et al.</i>	2016	<i>Auto-generated site layout: an integrated approach to real-time sensing of temporary facilities in infrastructure projects.</i>
Fang <i>et al.</i>	2016	<i>Case Study of BIM and Cloud-Enabled Real-Time RFID Indoor Localization for Construction Management Applications.</i>
Li <i>et al.</i>	2017	<i>Integrating RFID and BIM technologies for mitigating risks and improving schedule performance of prefabricated house construction</i>
Zhong <i>et al.</i>	2017	<i>Prefabricated construction enabled by the Internet-of-Things.</i>
Iacovidou, Purnell e Lim	2018	<i>The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution?</i>
Li C. <i>et al.</i>	2018	<i>An Internet of Things-enabled BIM platform for on-site assembly services in prefabricated construction.</i>
Li X. <i>et al.</i>	2018	<i>RBL-PHP: Simulation of Lean Construction and Information Technologies for Prefabrication Housing Production.</i>
Xue <i>et al.</i>	2018	<i>Linking radio-frequency identification to Building Information Modeling: Status quo, development trajectory and guidelines for practitioners.</i>
Ma, Jiang e Shang	2019	<i>Visualization of Component Status Information of Prefabricated Concrete Building Based on Building Information Modeling and Radio Frequency Identification: A Case Study in China.</i>

Fonte: Autora (2020).

No estudo desenvolvido pelos autores Motamedi, Soltani e Hammad (2013), investiga-se o uso da tecnologia RFID para localização interna de ativos, os quais foram equipados com etiquetas RFID, durante a fase de operação das instalações. Os dados relacionados à localização das etiquetas RFID anexadas aos ativos eram extraídos de um modelo em BIM e for-

precisam informações sensíveis ao contexto dentro do prédio, o que poderia melhorar os processos de Gerenciamento de Facilidades (FM). Utilizando a localização dos ativos salvos nas *tags* anexadas aos ativos fixos, uma equipe de FM era capaz de ler *tags* à distância e localizá-las em uma planta baixa. A solução desenvolvida, no entanto, não contempla diretamente a conexão *online* entre o sistema e o modelo BIM, de onde apenas são extraídos dados.

No estudo desenvolvido por Wang *et al.* (2013), os autores consideram que apesar do aumento da visibilidade e utilização do BIM em projetos da construção, existe uma quantidade limitada de investigações examinando como o BIM pode ser integrado à comunicação *online* com elementos físicos para contribuir, por exemplo, para o monitoramento diário da produção. Ao abordar essa lacuna, Wang *et al.* (2013) propuseram em seu estudo uma estrutura conceitual para integrar o BIM com Realidade Aumentada (RA) e tecnologias como RFID para identificar, rastrear e monitorar cada recurso físico individual nos processos construtivos, de modo a possibilitar a visualização do contexto físico de cada atividade ou tarefa de construção. Esta estrutura conceitual proposta pelos referidos autores compreendeu três camadas: (1) BIM; (2) rastreamento/detecção de RA para reconhecimento de contexto que inclui o RFID; e (3) visualização/interação de RA.

Ainda segundo Wang *et al.* (2013), cada componente do edifício estaria associado a um *status*, de modo que o BIM forneceria dados e informações estáticas e predefinidas e a RA forneceria um *link* entre o BIM e o planejamento de recursos através de tecnologias de detecção/rastreamento, como código de barras, GPS e RFID. Isso possibilitaria a realização de um planejamento dinâmico em tempo hábil. Assim, a plataforma envolvendo BIM e RA com apoio da RFID seria capaz de fornecer informações sobre o progresso conforme planejado e o progresso atual e futuro, de uma forma clara e visual. Os referidos autores indicam, porém, a necessidade de examinar empiricamente em trabalhos futuros como a estrutura conceitual proposta seria usada para melhorar produtividade e desempenho em processos de construção reais.

Segundo o estudo desenvolvido por Costin, Teizen e Schoner (2015), ter um sistema de rastreamento em tempo hábil para materiais, equipamentos e pessoal instalado nos locais de trabalho da construção civil pode ajudar os gerentes de projeto a melhorar a segurança, o controle da qualidade e a logística dos trabalhadores, além de manter o ambiente organizado. Costin, Teizen e Schoner (2015) afirmam que a identificação e rastreamento da localização de recursos físicos com tecnologias como RFID constituem um avanço significativo no gerenciamento dos processos de construção, melhorando produtividade e eficiência.

No entanto, segundo Costin, Teizen e Schoner (2015), ainda não foi estabelecido um modelo padronizado de implementação para realizar este processo na prática. O objetivo da

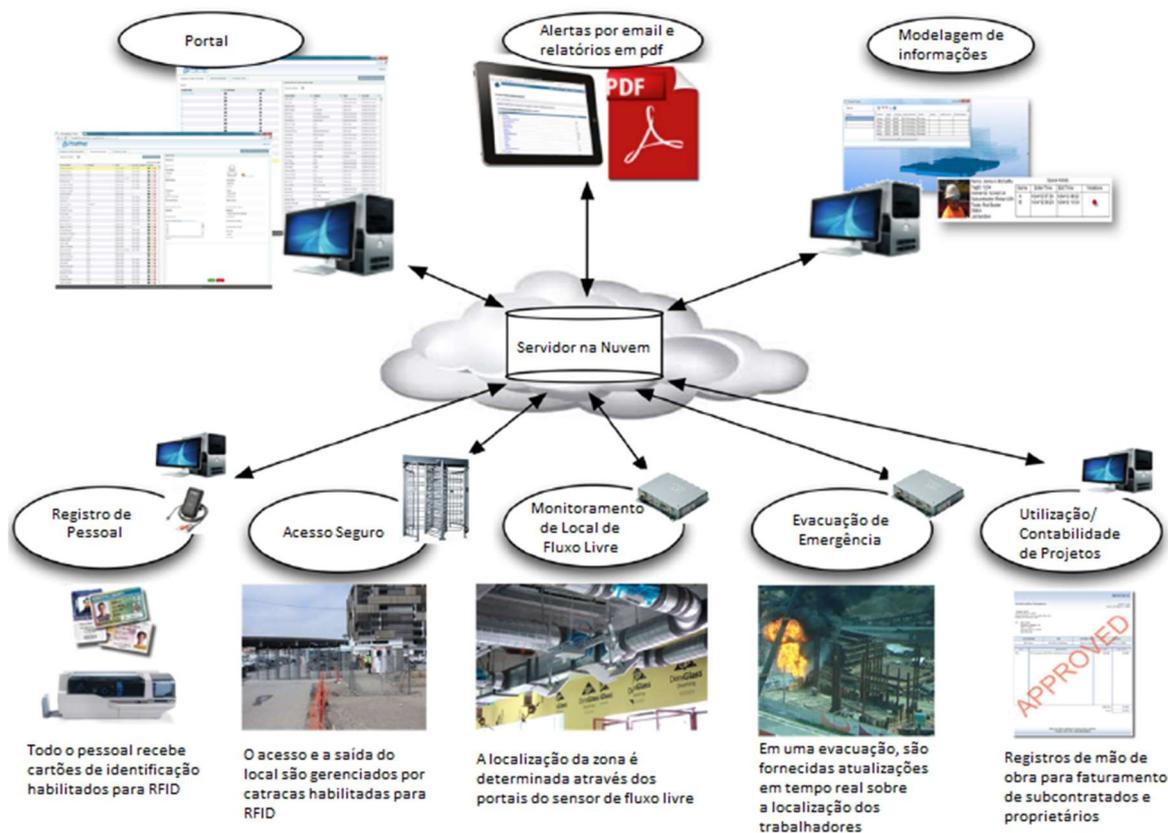
pesquisa foi utilizar a integração entre RFID e BIM para produzir indicadores avançados para segurança e controle de protocolos pré-definidos na construção, aprimorar o controle da qualidade e reduzir o retrabalho ou danos ao trabalho finalizado. O sistema desenvolvido é centralizado em um servidor baseado na Computação em Nuvem para lidar com os dados online (COSTIN; TEIZEN; SCHONER, 2015).

Nesse sistema, as *tags* de RFID ficam inseridas em cartões de identificação dos trabalhadores e os dados gerados a partir da leitura dessas *tags* são filtrados e armazenados para uso posterior (COSTIN; TEIZEN; SCHONER, 2015). Os principais dados consistem no número de identificação do crachá com RFID, do registro de datas e horas e do registro da identificação do leitor, que determina em que zona foi feita a leitura (COSTIN; TEIZEN; SCHONER, 2015).

O armazenamento de dados é feito *online* em um portal da Web baseado em Nuvem, que suporta notificações e é capaz de enviar relatórios por e-mail, quando necessário (COSTIN; TEIZEN; SCHONER, 2015). No banco de dados do referido sistema, as leituras das *tags* podem ser vinculadas a informações adicionais de interesse que podem ser facilmente acessadas pelo usuário final que pode ser, por exemplo, um gerente de projetos (COSTIN; TEIZEN; SCHONER, 2015).

Do ponto de vista do BIM, Costin, Teizen e Schoner (2015) indicam que a saída final de dados do banco de dados precisa estar vinculada ao IFC para promover a interoperabilidade do sistema. No modelo em IFC cada etiqueta RFID precisa ser atribuída ao objeto no qual é etiquetada. Quando uma *tag* RFID é colocada em um objeto (por exemplo, trabalhador ou equipamento), esta *tag* também pode ser considerada como um objeto a ser reconhecido pelo sistema. Na Figura 17, está indicado o esquema de coleta, análise e comunicação de dados do sistema, com a transferência e armazenamento dos dados no servidor central.

Figura 17 - Sistema proposto de rastreamento centralizado em Computação em Nuvem.



Fonte: Traduzido de Costin; Teizen e Schoner (2015).

Existem problemas que impedem a implementação completa de outros sistemas semelhantes em canteiros de obra, como por exemplo: 1) a dificuldade de manipular manualmente a grande quantidade de dados gerados, e 2) a possibilidade de os dados conterem anomalias de leitura, como falsos negativos, falsos positivos e leituras duplicadas, o que pode diminuir a integridade das análises (COSTIN; TEIZEN; SCHONER, 2015).

Por isso, Costin, Teizen e Schoner (2015) também propuseram um algoritmo para filtrar e gerenciar os dados produzidos a partir do método. Os resultados preliminares encontrados pelos referidos autores mostram que a integração dessas tecnologias pode produzir dados que são usados no rastreamento de recursos em tempo real, na análise de dados, na conformidade das normas e no controle das violações de zonas de segurança. Além disso, o sistema também forneceu informações de visualização imediatas que podem fornecer uma variedade de benefícios.

Com base em análises experimentais Costin, Teizen e Schoner (2015) mostraram através de um sistema relativamente robusto que a integração do sistema RFID e do BIM constitui uma ferramenta prática e engenhosa para fornecer informações em tempo hábil e que o rastreamento de localização ajuda a manter o controle de produção. O artigo, porém, foca na

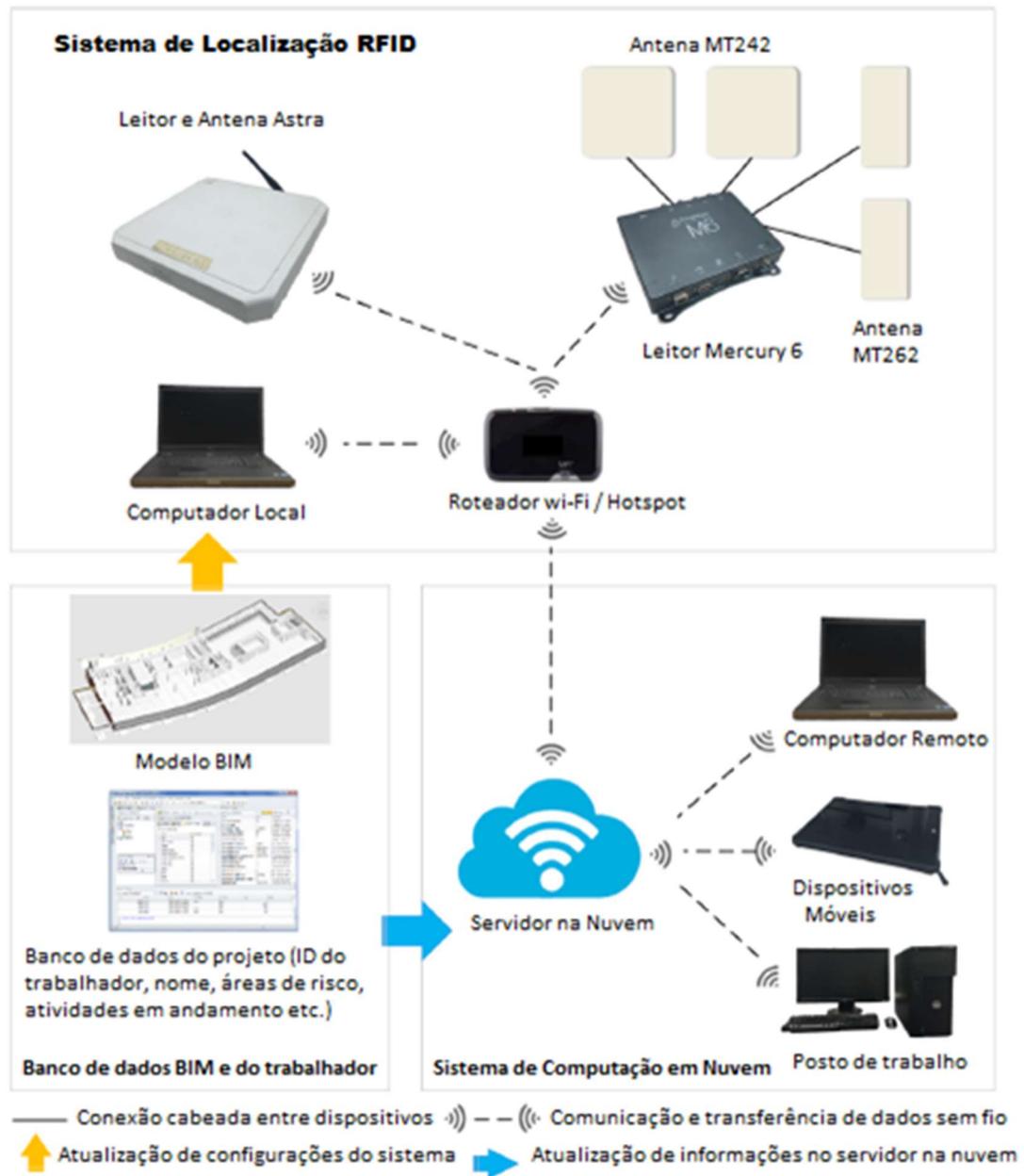
área de segurança e não dá indicações claras sobre como ampliar o sistema para o rastreamento de outros recursos físicos como equipamentos e materiais, apesar de indicar essa possibilidade.

No estudo desenvolvido por Fang *et al.* (2016), os autores abordam em seu trabalho que, embora a tecnologia RFID tenha mostrado um grande potencial para aplicações na construção, existem desafios críticos que impedem a sua adoção para o rastreamento de recursos móveis nos canteiros de obras, sendo destacados quatro desafios principais:

- 1) escalabilidade insuficiente para permitir a implementação em larga escala para qualquer canteiro genérico;
- 2) necessidade de uma infraestrutura no local para processamento e visualização de dados, pois muitas vezes dispositivos como *notebooks* e fontes de alimentação não estão disponíveis durante a construção para apoiar uma eventual necessidade de reconfigurações do sistema. Além disso, quando colocados inadequadamente, os cabos de dados e de energia nos pisos podem representar um risco à segurança das pessoas;
- 3) falta de estratégia eficaz para visualizar informações de localização, pois as informações de localização precisam ser visualizadas com atrasos mínimos e de maneira eficaz para apoiar efetivamente tomadas de decisão; e
- 4) capacidade limitada para compartilhar dados de localização de recursos de construção entre usuários remotos, pois as informações de localização coletadas pelo sistema precisam ser processadas pelo computador, verificadas pelo banco de dados do trabalhador, compatibilizadas e convertidas antes de serem disponibilizadas, o que acaba gerando atrasos.

Nesse sentido, o estudo desenvolvido por Fang *et al.* (2016) envolveu o projeto, desenvolvimento e avaliação de desempenho de um sistema de localização interna em tempo real para fins de monitoramento de trabalhadores em canteiros de obra. O sistema consiste em três componentes principais: o sistema de localização passiva RFID, o sistema virtual de visualização no BIM em diferentes dispositivos e o sistema baseado em plataformas de Computação em Nuvem, conforme indicado na Figura 18 (FANG *et al.*, 2016).

Figura 18 - Sistema proposto de localização interna.



Fonte: Traduzido de Fang *et al.* (2016).

O BIM é utilizado como componente de visualização do monitoramento *online* no sistema proposto, considerando que os dados brutos coletados pelo RFID indicam apenas quando uma *tag* é detectada e por qual antena foi detectada, mas são as plantas baixas geradas a partir do modelo BIM que fornecem visualização contextual da localização (FANG *et al.*, 2016). O sistema de Computação em Nuvem, por sua vez, é composto por um ponto de acesso Wi-Fi, um servidor em nuvem e dispositivos associados. O ponto de acesso Wi-Fi recebe dados de localização do sistema de localização RFID e envia os dados para o servidor em Nuvem pela Internet (FANG *et al.*, 2016).

O serviço Computação em Nuvem é implementado de forma que as informações sobre a localização dos trabalhadores podem ser acessadas através de um navegador Web nos dispositivos associados, que podem ser computadores ou dispositivos móveis (FANG *et al.*, 2016). Um gerente de segurança poderia monitorar o local do trabalhador a partir de um *notebook* em seu escritório ou realizar uma inspeção de campo no local com um *tablet*. O sistema também é capaz de armazenar os dados históricos de localização no servidor para análises posteriores (FANG *et al.*, 2016).

Um teste de campo em um ambiente real de construção foi realizado pelos referidos autores para a avaliação de desempenho do sistema proposto, levando em consideração critérios como a precisão, a latência de dados e o processamento e visualização de dados em tempo real para monitoramento remoto (FANG *et al.*, 2016). Também foram discutidas outras questões práticas como facilidade de uso, escalabilidade e limitações (FANG *et al.*, 2016). Como limitações do sistema, Fang *et al.* (2016) identificaram que a cobertura da rede de RFID está sujeita à distância entre cada antena, que a latência do sistema depende de características técnicas dos leitores fixos, da sua localização e da intensidade do sinal do roteador de rede e que as antenas devem preferencialmente ser colocadas em locais mais altos que eliminem o risco de tropeços ou de algum tipo de restrição no espaço.

Segundo os referidos autores, os resultados deste estudo indicam que o BIM e a solução de localização de RFID habilitada em Nuvem têm um grande potencial em aplicações práticas, como controle de segurança local, gerenciamento de segurança, gerenciamento de recursos e monitoramento de produtividade. Assim como no estudo anterior, de Costin, Teizen e Schoner (2015), o foco da aplicação é na área de segurança e não é indicado pelos autores como adaptar o sistema para outros tipos de recursos físicos além dos trabalhadores.

Iacovidou, Purnell e Lim (2018) indicaram em seu estudo que a integração de RFID com BIM pode ser uma extensão valiosa das capacidades destas tecnologias. Os autores fazem uma abordagem sobre as questões de sustentabilidade no setor da construção e defendem que o uso do RFID e sua integração com o BIM podem criar o ambiente certo para o desenvolvimento de novos modelos de negócios focados no gerenciamento sustentável de recursos físicos. Iacovidou, Purnell e Lim (2018) se propõem a rastrear e armazenar informações sobre as propriedades dos componentes estruturais da construção.

O RFID pode estimular a reutilização de componentes de construção, ajudando a reduzir seu desperdício (IACOVIDOU; PURNELL; LIM, 2018). Iacovidou, Purnell e Lim (2018) refletem que a adoção generalizada de RFID na construção depende do desenvolvimento de estudos que permitam a sua completa capacidade. A abordagem adotada pelos autores limita-se a sustentabilidade ao longo do ciclo de vida dos componentes avaliados.

Diversos artigos da amostra abordam o tema dos elementos de construção pré-fabricados / pré-montados e lidam principalmente com a produção de pré-fabricação, logística e montagem no local, como Feng *et al.* (2015), Li X. *et al.* (2018), Li C. *et al.* (2018), Li *et al.* (2017), Xue *et al.* (2018), Zhong *et al.* (2017), Zhong *et al.* (2015), Ikonen *et al.* (2013) e Ma, Jiang e Shang (2019). Considerando os estudos com aplicação prática na amostra, todos os autores utilizaram pelo menos, como infraestrutura física mínima, um leitor de RFID e etiquetas nos elementos de interesse. Na maioria dos estudos, foi utilizado um leitor portátil. No entanto, os autores Akanmu *et al.* (2016), Costin, Teizer e Schoner (2015), Fang *et al.* (2016), Feng *et al.* (2015), Ma, Jiang e Shang (2019) utilizaram leitores fixos.

De acordo com Xue *et al.* (2018), os sistemas RFID UHF fornecem uma solução satisfatória para a maioria das aplicações na prática na fase de construção, como no rastreamento de *status* dos elementos de construção ou para fins de manutenção. Se o aplicativo exigir uma distância de comunicação acima de 1 metro, os referidos autores recomendam o uso de *tags* ativas, enquanto que, para distâncias inferiores a 1 metro, as *tags* passivas são mais recomendados. Alguns autores da amostra usam recursos adicionais para promover a localização de elementos no canteiro de obras. Fang *et al.* (2016) e Ma, Jiang e Shang (2019) relataram o uso de antenas auxiliares, enquanto Ikonen *et al.* (2013), Li *et al.* (2017), Li X. *et al.* (2018), Zhong *et al.* (2015) e Zhong *et al.* (2017) relataram o uso de tecnologias GPS associadas ao RFID.

Em relação à infraestrutura de sistemas habilitados para RFID, IoT e BIM, os autores Li *et al.* (2017), Li C. *et al.* (2018), Xue *et al.* (2018), Zhong *et al.* (2017) usaram em seus estudos ou recomendaram o uso de um *gateway* inteligente. Um *gateway* inteligente é um dispositivo configurado para coletar dados em tempo real que pode se comunicar e interagir com os sistemas de tomada de decisão para dar suporte aos sistemas RFID (LI C. *et al.*, 2018). O *gateway* pode ser ativado para se comunicar com os leitores RFID via Bluetooth e, em seguida, enviar dados para os servidores em nuvem por meio de redes de comunicação como 4G ou Wi-Fi, por exemplo (LI C. *et al.*, 2018).

Em relação às bases de dados, Akanmu, Anumba e Messner (2012), Akanmu *et al.* (2016), Ikonen *et al.* (2013), Li *et al.* (2017), Ma, Jiang e Shang (2019) relataram o uso de bancos de dados SQL (estruturados). De acordo com Xue F *et al.* (2018), uma tendência importante nos sistemas RFID é o uso de BIM associado à Computação em Nuvem para estabelecer plataformas habilitadas para receber as informações coletadas em tempo real (XUE *et al.*, 2018). Os autores Costin, Teizer e Schoner (2015), Fang *et al.* (2016), Li *et al.* (2017), Li C. *et al.* (2018), Xue *et al.* (2018), Zhong *et al.* (2017) e Zhong *et al.* (2015) mencionam servidores em nuvem em seus estudos.

Em relação ao BIM, Segundo Xue *et al.* (2018), o BIM na Nuvem pode ser implantado por meio de uma plataforma comercial como Autodesk BIM 360 ou Graphisoft BIM. No entanto, essas plataformas talvez não ofereçam os protocolos necessários ou a flexibilidade necessária para receber os dados capturados pelo sistema RFID. Uma segunda abordagem sugerida é desenvolver o modelo BIM em *software* comercial como o Autodesk Revit, exportar os dados BIM para um formato aberto, como IFC, e convertê-los na Nuvem através da renderização usando Web Graphics Library (WebGL), por exemplo (XUE *et al.*, 2018). Nesta segunda abordagem, os sistemas de gerenciamento podem incluir protocolos de rede, como HTTP (ou HTTPS) e Secure File Transfer Protocol (SFTP), e formatos para representação de objetos e dados, como XML /JavaScript Object Notation (JSON) (LI C. *et al.*, 2018).

Considerando a interface de visualização de dados, pelo menos um dos seguintes dispositivos é usado em todos os estudos de amostra como dispositivos de exibição física: *laptop*, *tablet*, celular, *smartphone*, Assistente Digital Pessoal (PDA) ou computador de mesa. As redes de comunicação Bluetooth, 3G / 4G, Ethernet, Wi-Fi e ZigBee foram mencionadas nos estudos.

3.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO 3 E ESTRUTURA CONCEITUAL

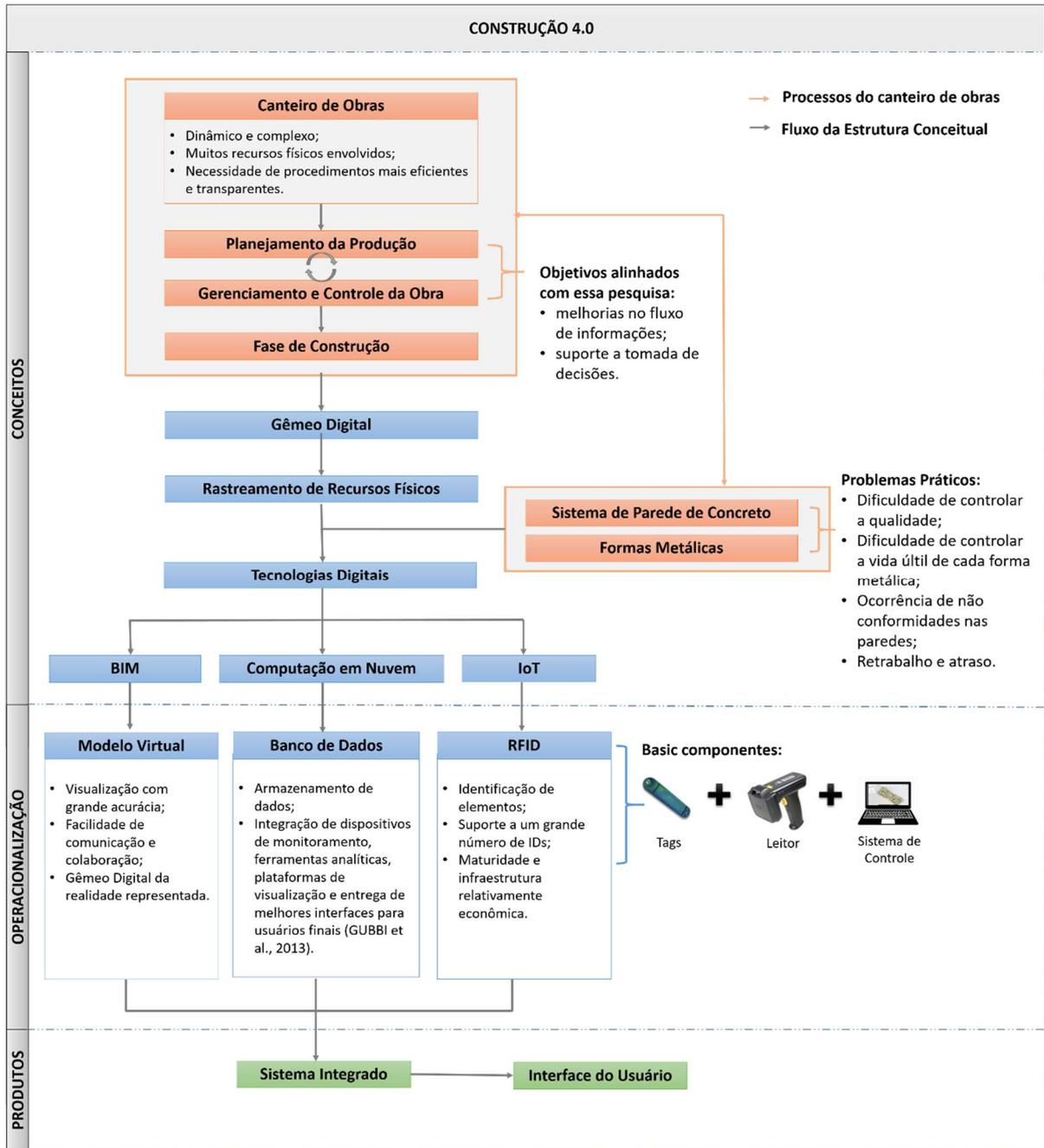
Com base nos conceitos, definições, procedimentos e requisitos apresentados ao longo da revisão da literatura sobre BIM, IoT e RFID, foi construída uma estrutura conceitual para o rastreamento de recursos físicos em canteiros de obras usando BIM, IoT e RFID, levando também em consideração os aspectos relacionados às formas metálicas manipuladas no sistema de parede de concreto armado, que se constituem no objeto do estudo.

No contexto da Construção 4.0, o ponto de partida do estudo é a necessidade de procedimentos mais eficientes e transparentes no canteiro de obras. Pretende-se promover melhorias no fluxo de informações e apoiar tomadas de decisão na gestão desse canteiro. O presente estudo está relacionado ao planejamento da produção, mas o foco é o gerenciamento e controle da obra. A partir do ambiente físico do canteiro é possível gerar um Gêmeo Digital, cuja camada de aplicação é o rastreamento de recursos físicos. Este rastreamento pode ser feito por meio das tecnologias digitais associadas a melhorias nos modelos de gerenciamento e controle da obra. O foco são as formas metálicas do sistema construtivo de paredes de concreto.

Entre as tecnologias digitais, BIM, Computação em Nuvem e IoT são as utilizadas na estrutura conceitual. Para operacionalizar esses conceitos em prática, os Modelos Virtuais, um Servidor Aplicação e Banco de Dados / Nuvem e um sistema RFID podem ser usados, respectivamente, como mostra a Figura 19. Como um produto da integração dessas tecnologias e alinhado aos objetivos deste para a pesquisa, foi desenvolvido um Sistema Integrado

com a respectiva Interface do Usuário para extrair informações para rastrear recursos físicos, como as formas metálicas manipuladas no sistema de paredes de concreto armado. Para desenvolver esse sistema, foi necessário formalizar requisitos práticos para implementar a integração proposta de tecnologias. A Figura 19 apresenta os principais conceitos abordados e suas interconexões, a operacionalização desses conceitos e os produtos gerados.

Figura 19 - Estrutura Conceitual.



Fonte: Autora (2020).

4 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta a estrutura metodológica adotada para o desenvolvimento desta pesquisa, incluindo a descrição da estratégia de pesquisa utilizada, o delineamento da pesquisa e o detalhamento das respectivas fases e etapas envolvidas.

4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Os métodos de pesquisa prescrevem um conjunto de regras, atividades e procedimentos que possibilitam a construção do conhecimento científico conforme critérios aceitos pela comunidade acadêmica (ANDERY *et al.*, 2004; VAISHNAVI; KUECHLER, 2015). A escolha por um método de pesquisa adequado evidencia um maior rigor na condução da pesquisa em áreas do conhecimento como a engenharia (LACERDA *et al.* 2013).

A *Design Science* é considerada como um paradigma epistemológico para o estudo daquilo que pode ser criado em oposição à ocorrência natural, ou seja, de objetos e fenômenos artificiais (artefatos) (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015; VAISHNAVI; KUECHLER, 2015; SIMON, 1996). O seu principal propósito é orientar pesquisas no sentido de melhorar sistemas existentes, resolver problemas reais ou criar novos artefatos capazes de contribuir para melhoria do desempenho humano, seja na sociedade ou nas organizações (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015). A *Design Science* também é utilizada para fortalecer a base de conhecimento existente, a partir das necessidades organizacionais e acadêmicas observadas ou dos problemas de interesse do pesquisador (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015).

A *Design Science Research (DSR)*, por sua vez, é um método conduzido sob o paradigma da *Design Science* que visa estabelecer e operacionalizar pesquisas orientadas para a solução de problemas específicos, tendo como objetivo encontrar uma solução satisfatória para a situação, ainda que esta solução não seja considerada ótima (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015).

O rigor, a relevância e a validade pragmática, a qual também pode ser compreendida como a utilidade, são fatores fundamentais para que investigações que adotam DSR possam ser consideradas válidas e confiáveis (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015). “Profissionais em organizações podem usar os resultados dessas investigações e o conhecimento gerado para resolver problemas práticos”, ou seja, problemas do mundo real (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015).

O conhecimento gerado pela DSR é prescritivo e considera a singularidade do artefato em seu contexto (LACERDA *et al.*, 2013). Os artefatos gerados incorporam essas prescrições

e podem ser manifestados na forma de constructos, modelos, métodos e instanciações (implementações), envolvendo atividades como construção, avaliação, teorização e justificativa no seu desenvolvimento (MARCH; SMITH, 1995).

A estruturação do conhecimento obtido a partir da DSR em Classe de Problemas, que é definida por Lacerda *et al.* (2013) como: “a organização de um conjunto de problemas, práticos ou teóricos, que contenha artefatos avaliados, ou não, úteis para a ação nas organizações”, permite a generalização das soluções prescritivas para outros ambientes e contextos externos. Lacerda *et al.* (2013) indica que Planejamento e Controle da Produção, Mensuração dos Custos e Alinhamento Estratégico são exemplos de Classes de Problemas.

Para garantir uma maior assertividade na pesquisa, torna-se necessário determinar o que já existe sobre o artefato em uma determinada classe de problemas antes de iniciar o seu efetivo desenvolvimento (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015). A Figura 20 contém resumidamente os principais conceitos da *Design Science* que foram abordados neste capítulo.

Figura 20 - Principais conceitos da Design Science.

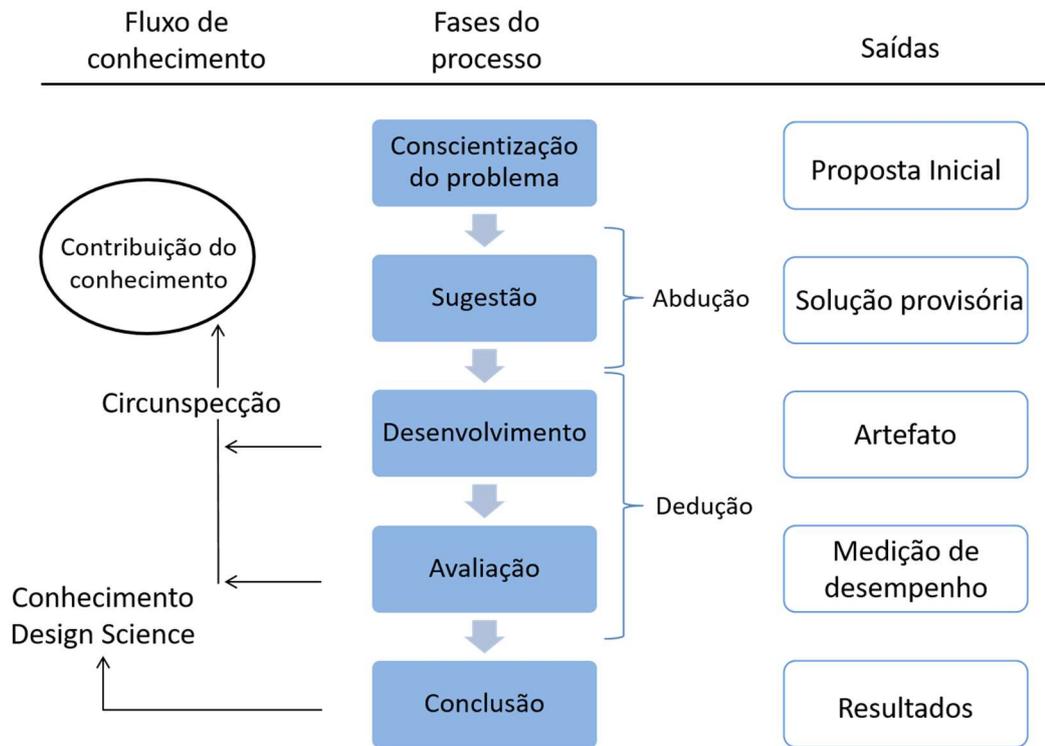
Definição de Design Science	<ul style="list-style-type: none"> • Ciência que busca consolidar o conhecimento sobre o design e desenvolvimento de soluções, para melhorar os sistemas existentes, resolver problemas e criar novos artefatos.
Artefato	<ul style="list-style-type: none"> • Algo feito pelo homem, uma interface entre o ambiente interno e o ambiente externo de um determinado sistema.
Soluções Satisfatórias	<ul style="list-style-type: none"> • Soluções suficientemente adequadas para o contexto em questão; as soluções devem ser viáveis à realidade e não precisam necessariamente ser soluções ideais.
Classes de Problemas	<ul style="list-style-type: none"> • Organização que orienta a trajetória e o desenvolvimento do conhecimento no contexto da Design Science.
Validade Pragmática	<ul style="list-style-type: none"> • Procura garantir a utilidade da solução proposta para o problema, considera: custo / benefício da solução, especificidades do ambiente em que será aplicada e necessidades reais dos interessados na solução.

Fonte: Traduzido de Dresch, Lacerda e Antunes (2015).

Um dos métodos para operacionalizar a DSR envolve a utilização de um processo cíclico que consiste no delineamento da pesquisa, conforme as seguintes fases: (a) Conscientização; (b) Sugestão; (c) Desenvolvimento; (d) Avaliação e (e) Conclusão (TAKEDA *et al.*

1990; LACERDA *et al.* 2013; DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015; VAISHNAVI; KUECHLER, 2015). A Figura 21 indica o fluxo de conhecimento, as fases do processo e os resultados previstos para cada fase, além do processo cíclico de reflexão (circunspeção).

Figura 21 - Fluxo de conhecimento, fases do processo e resultados previstos na DSR.



Fonte: Traduzido e adaptado de Dresch, Lacerda e Antunes (2015) e Vaishnavi e Kuechler (2015).

O método de abdução, indicado na Figura 21, é um processo de criação de hipóteses explicativas para um fenômeno ou situação de interesse a partir do uso de raciocínio criativo, podendo ser utilizado pelo pesquisador no processo de compreensão do problema estudado e no delineamento de possíveis soluções (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015). Já o método de dedução consiste na construção do conhecimento a partir de determinadas premissas e da análise das relações entre elas, podendo ser utilizado para construir novos conhecimentos com base em um conhecimento anterior, bem como explicar e prever o comportamento do objeto de estudo (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015).

A primeira fase da DSR, conforme a Figura 21, é a Conscientização, que representa a compreensão, o primeiro contorno e a posterior formalização do problema apontado, na qual o pesquisador identifica as repercussões deste problema para a organização, bem como os objetivos e metas necessárias para solucioná-lo de forma satisfatória, considerando suas fronteiras e contexto (LACERDA *et al.*, 2013). O resultado é uma proposta inicial, podendo ser formal ou informal, que direciona os esforços de pesquisa a serem empregados nas próximas fases (VAISHNAV; KUECHLER, 2015).

A segunda fase da DSR é a Sugestão, que se constitui em um processo relativamente subjetivo e essencialmente criativo no qual podem ser desenvolvidos protocolos bem fundamentados para garantir a validade e a rastreabilidade da pesquisa (LACERDA *et al.*, 2013). Esta fase resulta em tentativas de solucionar o problema (LACERDA *et al.*, 2013) e pode envolver o desenvolvimento de protótipos baseados na fase anterior de Conscientização (VAISHNAV; KUECHLER, 2015).

A terceira fase da DSR é o Desenvolvimento, que é quando o artefato é efetivamente constituído em seu estado funcional, considerando as fronteiras e contexto estabelecidos na fase de Conscientização (LACERDA *et al.*, 2013). É a fase em que a DSR produz os resultados e o conhecimento útil para ser aplicado, tendo em vista que o conhecimento gerado deve ser generalizável para a Classe de Problema definida (LACERDA *et al.*, 2013).

A quarta fase da DSR é a Avaliação, que envolve um processo rigoroso para verificar o comportamento e desempenho do artefato dentro do seu contexto, onde é verificado se as soluções propostas foram efetivamente alcançadas visando não somente a validade científica, mas também a validade pragmática para as organizações (LACERDA *et al.*, 2013). Caso as hipóteses iniciais sobre o comportamento do artefato não se confirmem na primeira rodada, ocorre uma retroalimentação da fase de Conscientização para refazer o ciclo até deixar a solução suficientemente útil e produtiva (VAISHNAV; KUECHLER, 2015).

Os produtos da DSR são avaliados conforme critério de valor e utilidade, sendo desejável saber, por exemplo, se a solução funciona e se representa uma melhoria (MARCH; SMITH, 1995). A avaliação do artefato deve seguir critérios determinados conforme o seu ambiente específico, o que pode ser feito a partir de constructos (MARCH; SMITH, 1995). Um constructo é um recurso científico formado por um conjunto de termos e variáveis que visa traduzir um conceito teórico em uma relação com o mundo real por meio de uma representação empírica, com base em fenômenos observáveis e mensuráveis (MARTINS; PELISSARO, 2005).

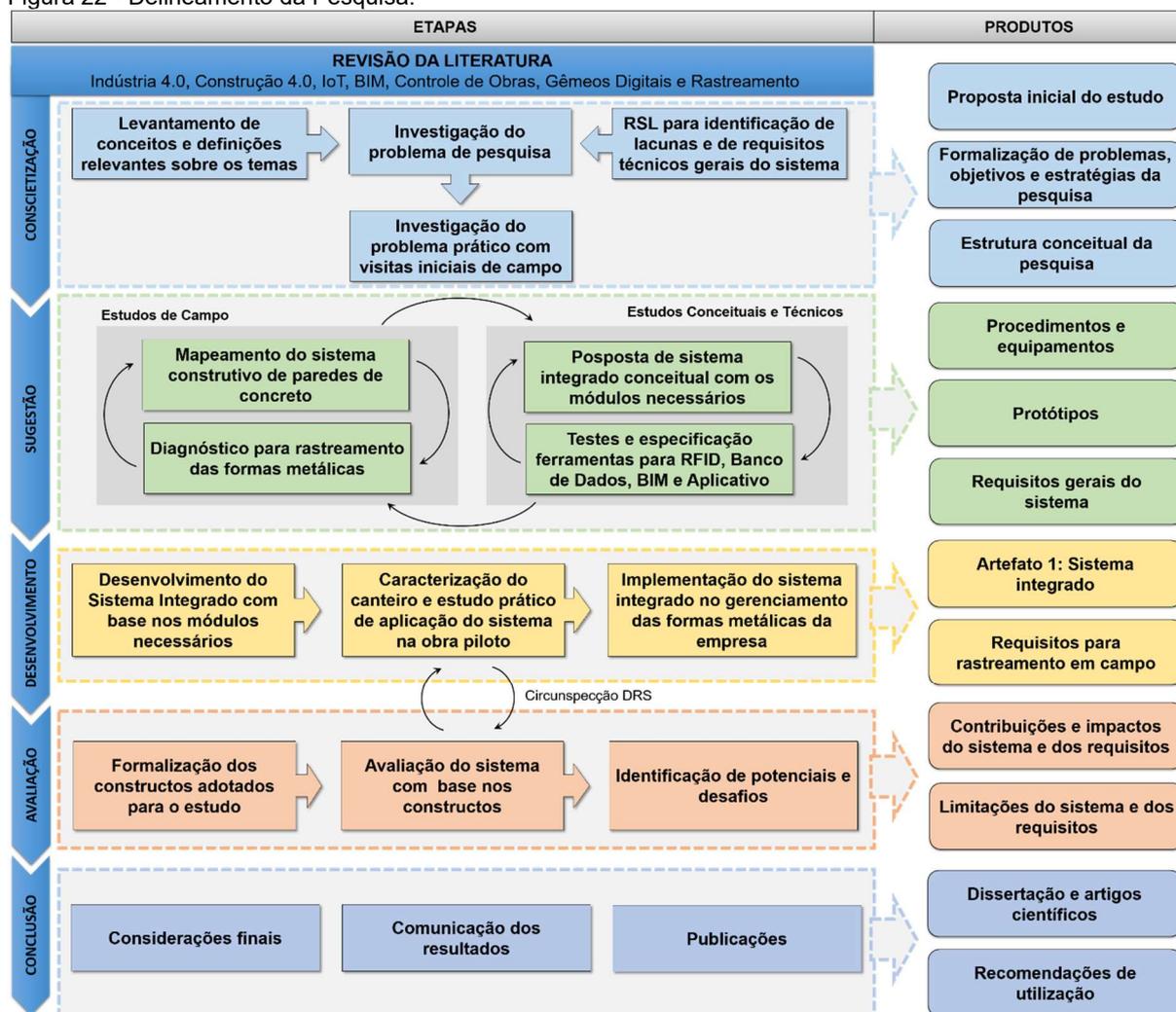
A quinta e última fase é a Conclusão, que é onde deve ocorrer a formalização geral do processo e a comunicação dos resultados à comunidade acadêmica e aos profissionais interessados (LACERDA *et al.*, 2013). Esta fase conclui o desenvolvimento do artefato quando o resultado alcançado é considerado suficientemente satisfatório, mesmo que após todas as revisões continuem existindo desvios com relação às hipóteses adotadas no estudo (VAISHNAV; KUECHLER, 2015). A determinação do que seria um resultado satisfatório deve ser definida desde a Conscientização e pode ser feito de duas maneiras: através do consenso entre as partes envolvidas no problema ou através do avanço da solução alcançada em comparação com as soluções anteriores (LACERDA *et al.*, 2013).

Nesse sentido, considerando o objetivo de desenvolver artefatos capazes de contribuir para melhorar o desempenho de organizações da construção civil no contexto dos canteiros de obras e tendo em vista construir o conhecimento prescritivo necessário de forma rigorosa, relevante, válida e confiável, a estratégia escolhida para conduzir esta pesquisa é a *Design Science Research* (DSR). A classe de problema identificada nesta pesquisa é o Controle da Produção. A unidade de análise adotada é o sistema construtivo de paredes de concreto e o objeto de análise são as formas metálicas.

4.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A pesquisa foi delineada a partir fases da DSR apresentadas na seção anterior, conforme indicado na Figura 22. As fases, as etapas realizadas e os respectivos produtos serão detalhados nas próximas seções.

Figura 22 - Delineamento da Pesquisa.



Fonte: Autora (2020).

Os estudos de campo foram realizados na Empresa X e nas Obra A, B e C, conforme caracterizado a seguir.

4.2.1 Caracterização da Empresa e das Obras

A Empresa X selecionada para o estudo de campo é uma organização de grande porte que atua no mercado baiano na área de construção desde 1987 e que, a partir de 2004, também passou atuar com incorporações. A empresa já realizou diversas obras públicas, incluindo infraestrutura, recuperação de patrimônio público, obras industriais e obras residenciais. Também possui parcerias firmadas com grupos de pesquisa da universidade, incentiva a inovação tecnológica e tem interesse em aprimorar seus processos de gestão.

A Empresa X é responsável pelos três empreendimentos nos quais foram realizados os estudos de campo. Esses empreendimentos foram referenciados na pesquisa como “Obra A”, “Obra B” e “Obra C” e ambos consistem em conjuntos habitacionais residenciais vinculados ao programa federal “Minha Casa, Minha Vida”. Os edifícios (blocos) em todas as obras são construídos a partir do sistema construtivo de parede de concreto com o uso de formas metálicas de alumínio, que são o objeto deste estudo.

Na **Obra A** ocorreu a investigação do problema prático e visitas iniciais de campo na fase de Conscientização. Essa obra está localizada na região metropolitana de Salvador. O canteiro de obras estudado possui uma área de 52.136,17 m², sendo 34.851,60 m² referente à área construída. O empreendimento é composto por 36 blocos, cada um com 5 pavimentos (térreo mais primeiro ao quarto). Cada andar é formado por quatro apartamentos, totalizando 720 unidades habitacionais. A Obra A está ilustrada na Figura 23.

Figura 23 - Ilustração do empreendimento da Obra A.



Fonte: Material publicitário da Empresa X (2020).

Na **Obra B** ocorreu o mapeamento e diagnóstico para rastreamento das formas metálicas na fase de Sugestão. Essa obra está localizada em Camaçari, região metropolitana de Salvador. O canteiro de obras estudado possui uma área de 32.003,10 m², sendo 25.596,25 m² referente à área construída. Após a conclusão, o empreendimento será composto por 24

blocos, cada um com 5 pavimentos (térreo mais primeiro ao quarto). Cada andar é formado por quatro apartamentos, totalizando 480 unidades habitacionais. O acompanhamento dessa teve início após a fase de movimentação de terra, contemplando as atividades de execução de fundação, estruturas e acabamentos, que muitas vezes ocorriam simultaneamente nos diferentes blocos. A Obra B está ilustrada na Figura 24.

Figura 24 - Ilustração do empreendimento da Obra B.



Fonte: Material publicitário da Empresa X (2021).

Na **Obra C** foi realizado o estudo de campo para a aplicação do sistema na fase de Desenvolvimento. Essa obra está localizada em Salvador. O canteiro de obras estudado possui uma área de 21.856,63 m², sendo 19.618,78 m² referente à área construída. Após a conclusão, o empreendimento será composto por 20 edifícios (blocos), cada um com 5 pavimentos (térreo mais primeiro ao quarto). Cada andar é formado por quatro apartamentos, totalizando 400 unidades habitacionais. O acompanhamento dessa obra contemplou a fase de estruturas e acabamento de diferentes blocos. A Obra C está ilustrada na Figura 25.

Figura 25 - Ilustração do empreendimento da Obra C.



Fonte: Material publicitário da Empresa X (2021).

Durante a construção dos blocos, na Obra A e na Obra B foram utilizados dois jogos de forma em cada, enquanto que na Obra C foi utilizado apenas um jogo de forma. Cada jogo é referente a meio pavimento. Cada jogo possui dois conjuntos internos, um correspondente ao meio pavimento com escada e outro ao meio pavimento sem escada. Segundo informado por um funcionário responsável pelas formas, cada jogo é composto por cerca de 500 módulos (placas) que são encaixadas umas nas outras durante a montagem. A partir de um cadastro solicitado e acompanhado na obra pela pesquisadora, averiguou-se que cerca de 260 dessas placas são referentes exclusivamente às paredes da estrutura (as demais são das lajes e escadas, por exemplo).

O tempo médio necessário para a execução de um pavimento completo é de dois dias, ou seja, ocorre a produção de meio pavimento por dia. No primeiro dia é realizada a armação de todas as ferragens e a concretagem do meio pavimento com escada. No dia seguinte, ocorre a concretagem do meio pavimento sem escada e a armação das ferragens do meio pavimento com escada acima, em um ciclo que ocorre sucessivamente até a conclusão do edifício.

Considerando que este método construtivo apresenta alguns problemas relativos à qualidade das paredes, que geram retrabalho, a empresa utiliza atualmente uma Ficha de Verificação de Serviço (FVS) implementada para dispositivos móveis (*tablet*), que geralmente é aplicada por um estagiário da obra durante o procedimento de inspeção dos serviços, na tentativa de monitorar e controlar esses problemas. As formas metálicas de alumínio utilizadas nas Obra A, B e C são consideradas pela Empresa X como um tipo de recurso físico que gera impactos significativos na produtividade e na qualidade.

4.3 FASE DE CONSCIENTIZAÇÃO

A Conscientização compreendeu as etapas de revisão da literatura, o levantamento de informações sobre todos os temas envolvidos, a proposta inicial do estudo, a identificação de lacunas na literatura, a investigação e formalização do problema de pesquisa e do problema prático, bem como a definição dos objetivos e estratégias para condução do estudo de campo. Esta fase foi dividida em três etapas que, em conjunto, resultaram na estrutura conceitual do trabalho apresentada na Seção 3.4 e na proposição teórica dos artefatos.

O artefato proposto na pesquisa como resultados desta fase de Conscientização foi: um sistema capaz de envolver o processo de coleta, armazenamento, gerenciamento e visualização dos dados em uma plataforma única, incluindo requisitos para rastrear recursos físicos no canteiro de obras através da integração da IoT com o BIM.

4.3.1 Revisão Exploratória da Literatura

Esta revisão foi realizada no início do processo de pesquisa para aprofundar a compreensão sobre os temas envolvidos, apoiar na reflexão sobre as justificativas para o estudo e auxiliar na definição de estratégias para as próximas etapas. Os principais tópicos abordados foram IoT, RFID e BIM. Foram selecionados e consultados diversos materiais acadêmicos e científicos sobre o tema, como livros, dissertações, teses e artigos. As principais plataformas utilizadas foram Google Acadêmico e Scopus. Esta etapa resultou em um maior entendimento do contexto da pesquisa, na fundamentação teórica e na identificação de conceitos e definições de forma individual, bem como princípios envolvidos na integração entre as tecnologias. Também foi realizada uma pesquisa bibliográfica para investigar a evolução de pesquisas sobre IoT no Brasil, considerando teses e dissertações publicadas desde 2017 até 2019. O gráfico resultante foi apresentado na Figura 4 da Seção 2.3.

4.3.2 Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

Segundo Kitchenham (2004), a RSL é um meio de identificar, avaliar e interpretar o máximo possível da literatura relevante relacionada à uma questão de pesquisa específica, uma determinada área ou um fenômeno de interesse. Ainda segundo a referida autora, a RSL é considerada uma forma de estudo secundário, enquanto os estudos individuais relacionados são chamados de estudos primários.

Neste tipo de revisão, toda a estratégia de busca deve ser bem documentada para que os leitores possam verificar o seu rigor e integridade (KITCHENHAM, 2004). A necessidade de uma RSL pode decorrer da exigência do pesquisador de resumir de maneira completa e imparcial informações de interesse, visando tirar conclusões mais gerais sobre algum fenômeno do que seria possível em estudos individuais, ou então da necessidade de estabelecer um prelúdio para outras atividades de pesquisa (KITCHENHAM, 2004).

Alguns dos possíveis objetivos da RSL são: (a) resumir a evidência existente relativa a uma tecnologia, (b) identificar lacunas em uma pesquisa atual para sugerir investigações mais aprofundadas, e (c) fornecer uma estrutura / plano de fundo para posicionar adequadamente novas atividades de pesquisa (KITCHENHAM, 2004). O protocolo para realização da RSL foi estabelecido conforme o delineamento proposto por Kitchenham (2004), seguindo os tópicos descritos em seguida.

Justificativa: a RSL foi conduzida para mapear estudos anteriores, analisar soluções empíricas já conhecidas, bem como identificar de forma integrada as relações entre os conceitos e variáveis envolvidos no estudo. As principais lacunas identificadas na literatura consistem na ausência de estudos sobre o rastreamento específico de formas metálicas no can-

teiro de obras ou recursos com características semelhantes (provisórios e móveis) e na dificuldade de identificar os requisitos, principalmente de caráter técnico e operacional, necessários para desenvolver um sistema de rastreamento com IoT, RFID e BIM.

Questão de pesquisa da RSL: as lacunas identificadas foram convertidas na seguinte questão de pesquisa: “Quais são os principais requisitos para o desenvolvimento de um sistema IoT / RFID / BIM para rastrear formas metálicas no sistema construtivo de paredes de concreto moldadas *in loco*, tendo como base estudos realizados para outros tipos de recursos físicos da construção civil?”.

Estratégia de busca: o procedimento utilizado para condução da RSL contemplou as seguintes macros etapas: (a) Escolha das bases de dados; (b) Definição dos critérios de inclusão da revisão; (c) Definição dos critérios de exclusão da revisão; e (d) Análise dos artigos resultantes. Três bases de dados acadêmicas, Scopus, Compendex e Web of Science, foram selecionadas para a pesquisa devido à sua ampla cobertura de artigos acadêmicos relevantes. Inicialmente, os seguintes grupos para pesquisa foram definidos: (a) IoT e RFID, (b) BIM, (c) Rastreamento, e (d) Construção e Formas Metálicas. Após alguns estudos de escopo, em cada grupo foram incluídos termos relacionados e considerados equivalentes. No Quadro 6 estão indicados os termos de pesquisa resultantes, que foram utilizados em cada uma das bases de dados para estabelecer os limites conceituais da revisão.

Quadro 6 - Grupos definidos e termos de pesquisa definidos em língua inglesa.

GRUPOS	TERMOS DE PESQUISA DEFINIDOS
IoT e RFID	"Internet of Things" OR "IoT" OR "RFID" OR "Radio Frequency" OR "Radio-Frequency" OR "Radio Frequency Identification" OR "Pervasive Computing" OR "Ubiquitous Computing"
BIM	"Building Information Modeling" OR "BIM" OR "Building Information Model"
Rastreamento	"Track" OR "Tracking" OR "Traceability" OR "Addressing"
Construção e Formas metálicas	"Construction" OR "Metal Formwork"

Fonte: Autora (2020).

Crerios de inclusão: cada artigo deveria conter pelo menos um termo de cada grupo. Os termos de pesquisa foram buscados especificamente no título, no resumo ou nas palavras-chave dos artigos das bases de dados. Todo o período disponível nas bases de dados foi incluído na pesquisa. A revisão se limitou a selecionar artigos publicados em periódicos científicos revisados por pares. Um total de 46 artigos foi obtido com a aplicação dos critérios de inclusão.

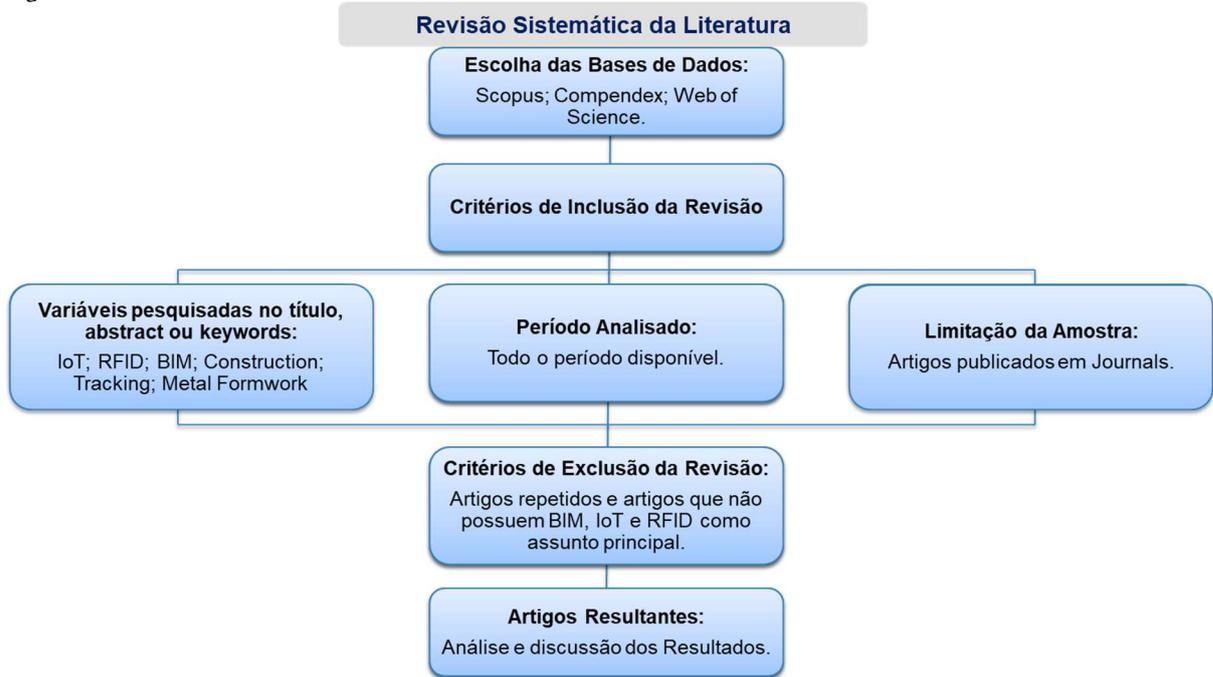
Crêterios de exclusão: para alcançar a amostra final de artigos, foram adotados como critério a remo o de duplica es e a remo o de artigos que não tratavam de BIM, IoT e RFID como tema principal. Também foram excluídos artigos não redigidos em língua inglesa, que foi selecionada devido   sua reconhecida universalidade. A aplica o dos referidos critérios ocorreu mediante a leitura feita de forma pareada (pela pesquisadora e por um aluno de Inicia o Científica) do título, resumo e palavras-chave dos artigos, resultando em um total de 21 artigos.

Avalia o da qualidade: esta verifica o foi realizada para complementar a aplica o dos critérios de exclusão e definir os artigos resultantes. Para a avalia o foi necessária uma leitura completa do conteúdo de cada artigo de forma pareada (pela pesquisadora e por um aluno de Inicia o Científica), visando averiguar a adequa o ao tema principal e a conformidade com a questão de pesquisa. No total, 16 artigos foram obtidos como amostra final após esta avalia o.

Estratégia de extra o de dados: desejava-se identificar se cada estudo primário contava com alguma aplica o prática em campo, ou se apresentava um protótipo em laboratório ou se fornecia somente contribui es teóricas. Além disso, uma planilha foi montada para extrair, quando possível, os seguintes dados de cada estudo primário: temática, objetivos, métodos, área de aplica o principal, recursos físicos estudados e resultados principais, bem como indica es técnicas como forma de processamento de dados local ou em Nuvem, rede de comunica o, *hardwares*, *softwares*, plataformas BIM, banco de dados, dispositivos para visualiza o de interface, linguagens de programa o e protocolos de comunica o utilizados. A análise dos dados extraídos foi feita de forma qualitativa.

Síntese dos resultados extraídos: os resultados, discussões e conclusões obtidos a partir da RSL foram apresentados na Se o 3.3. Os requisitos identificados após a análise da amostra contribuíram para elabora o da estrutura conceitual que foi apresentada na Se o 3.4. Uma estrutura preliminar do sistema integrado também foi proposta com base nos requisitos, visando sua futura implementa o em ambientes reais de constru o. A Figura 26 resume as etapas e os procedimentos principais adotados na RSL.

Figura 26 - Delineamento da RSL.



Fonte: Autora (2020).

A RSL foi apresentada no Capítulo 3, na Seção 3.3.

4.3.3 Visitas Iniciais em Campo

As visitas ocorreram nos dias 27/08/2019, 28/08/2019 e 31/10/2019 (com duração entre 2h e 6h) e contribuíram para o reconhecimento inicial de campo da Obra A da Empresa X. Essa obra utilizava o sistema construtivo de paredes de concreto moldada *in loco* e possuía características semelhantes, tais como a logística interna, o número de blocos e o número de pavimento, em relação às obras onde será desenvolvido o estudo nas etapas seguintes.

As visitas na Obra A contemplaram primeiro a observação assistemática de diferentes atividades relacionadas às paredes de concreto e formas metálicas. Segundo Marconi e Lakatos (2003), a observação assistemática é quando o pesquisador observa e registra os fatos da realidade sem que sejam utilizados meios técnicos especiais. Após isso foram realizadas entrevistas não estruturadas (informais) com colaboradores envolvidos e a confirmação de informações levantadas da literatura. Como resultado, obteve-se a compreensão do contexto no qual pretendia-se desenvolver o artefato e a formalização do problema prático da pesquisa. O Quadro 7 resume as visitas técnicas realizadas na Obra A.

Quadro 7 - Resumo de visitas técnicas realizadas na fase de Conscientização na Obra A.

Visitas	Ambiente	Ações desenvolvidas	Fontes de evidência
27/08/2019 (2h)	Escritório	Alinhamento do projeto com diretrizes de planejamento e qualidade da empresa.	Entrevistas não estruturadas com gerente de Sistema de Gestão Integrado, analista BIM e engenheiros da empresa.

Visitas	Ambiente	Ações desenvolvidas	Fontes de evidência
28/08/2019 (6h)	Canteiro	Reconhecimento inicial de campo, compreensão de contexto e registros fotográficos.	Observação assistemática.
31/10/2019 (6h)	Canteiro		

Fonte: Autora (2021).

4.4 FASE DE SUGESTÃO

A Sugestão compreendeu o estudo de campo feito na Obra B, que consistiu no mapeamento de processo do sistema construtivo e no diagnóstico para rastreamento das formas metálicas. Este estudo visou compreender as características do objeto de estudo, os aspectos logísticos do canteiro e os procedimentos de controle de produção adotados na obra. As informações coletadas contribuíram para o avanço na identificação do conjunto de requisitos necessários para rastrear os recursos físicos.

Além disso, essa fase também contemplou a avaliação técnica das ferramentas e equipamentos necessários para o desenvolvimento da pesquisa e a construção de protótipos que serviram como prova de conceito do uso das tecnologias e validação interna das considerações teóricas obtidas na fase anterior. As ferramentas e equipamentos estão relacionadas às camadas de: (a) coleta e gerenciamento de dados no ambiente físico, (b) armazenamento em banco de dados, (c) contextualização dos dados no ambiente virtual do BIM, e (d) visualização dos dados. As informações coletadas ajudaram no avanço da parte operacional necessária para o desenvolvimento do sistema integrado (artefato).

4.4.1 Mapeamento e Diagnóstico para Rastreamento das Formas

Nesta etapa foi possível compreender as características físicas das formas metálicas em seu ambiente de utilização, a logística envolvida na movimentação das formas no canteiro e todas as atividades relacionadas ao sistema construtivo de paredes de concreto. O objetivo final foi construir uma base para identificar maneiras de implementar as tecnologias envolvidas de forma adequada e eficaz no processo existente.

Para tanto, foram realizadas visitas técnicas à Obra B, conforme Quadro 8. A coleta de dados na Obra B ocorreu por meio de: (a) observação sistemática, na qual o observador estabelece um planejamento prévio e sabe o que deve ser observado em cada situação, utilizando instrumentos como anotações ou dispositivos para a coleta dos dados ou fenômenos observados (MARCONI; LAKATOS, 2003); e (b) entrevista não estruturada focalizada, na qual apesar de existir um roteiro de tópicos relativos ao problema estudado, o entrevistador tem liberdade para guiar cada situação em qualquer direção que considere adequada, de modo a

explorar mais amplamente uma questão sem obedecer, a rigor, a uma estrutura formal (MARCONI; LAKATOS, 2003 apud ANDER-EGG, 1978).

Para coleta de dados na Obra B, foi elaborado um roteiro com tópicos relativos ao processo construtivo e à qualidade das paredes e formas, tendo em vista melhorar a percepção da pesquisadora sobre o sistema construtivo. Os tópicos contemplavam os procedimentos de armazenamento, transporte e montagem das formas, o estado de conservação e vida útil das formas, a capacitação das equipes envolvidas, a adequação dos materiais de construção utilizados, ocorrência de não conformidades nas paredes, a ocorrência de retrabalho e a produtividade. O roteiro está indicado no **Apêndice 1**. Para a coleta de dados no galpão de armazenamento das formas da Empresa X, novos tópicos foram adicionados à investigação e um novo roteiro foi elaborado, incluindo questões específicas sobre o controle de quantidade, qualidade e manutenção das formas, conforme indicado no **Apêndice 2**. O Quadro 8 resume as visitas técnicas realizadas.

Quadro 8 - Resumo de visitas técnicas realizadas na fase de Sugestão na Obra B.

Visitas	Ambiente	Ações desenvolvidas	Fontes de evidência
05/02/2020 (5h)	Canteiro	Registro fotográfico para mapeamento de processo interno do sistema construtivo e diagnóstico para as formas metálicas.	Observação sistemática e entrevistas não estruturadas focalizadas com técnico em edificações, encarregado da montagem de formas, estagiários e soldadores da equipe do canteiro.
07/02/2020 (6h)	Canteiro	Levantamento de quantitativo de placas das paredes, registro fotográfico para mapeamento de processo interno do sistema construtivo e diagnóstico para as formas metálicas.	
17/02/2020 (1h)	Escritório	Alinhamento do projeto conforme as informações coletadas em campo na obra.	Entrevistas não estruturadas com gerente de Sistema de Gestão Integrado, analista BIM, coordenadora de qualidade e engenheiros da empresa.
13/03/2020 (2h)	Canteiro	Registro fotográfico para mapeamento de processo interno do sistema construtivo e diagnóstico para as formas metálicas.	Observação sistemática e entrevistas não estruturadas focalizadas com soldador encarregado do galpão, soldador ajudante, técnico em edificações e estagiária.
13/03/2020 (2h)	Galpão	Caracterização das formas, mapeamento de processo externo do sistema construtivo e diagnóstico para as formas metálicas.	
17/04/2020 (2h)	Escritório (virtual)	Apresentação dos resultados preliminares e alinhamento de próximas etapas.	Entrevistas não estruturadas com gerente de Sistema de Gestão Integrado e analista BIM.

Fonte: Autora (2021).

A primeira visita técnica à Obra B foi realizada no dia 05/02/2020 (duração média de 5 horas), quando foi iniciada a observação sistemática e registro fotográfico de todas as atividades relacionadas ao sistema construtivo de paredes de concreto. O mesmo procedimento ocorreu na segunda visita, realizada no dia 07/02/20 (duração média de 6 horas). Os funcionários da Empresa X que possuíam experiência prática com o problema pesquisado foram entrevistados, incluindo o técnico em edificações, o encarregado, estagiários e soldadores. Muitas respostas foram obtidas ou confirmadas a partir da observação sistemática.

Após as visitas ao canteiro ainda restaram algumas lacunas, verificou-se a necessidade de compreender melhor as atividades relacionadas às formas metálicas que ocorriam fora do canteiro, mas ainda nos domínios da Empresa X. Por isso, foi realizada uma visita ao galpão de armazenamento e manutenção das formas no dia 13/03/2020 (duração média de 2 horas), que contribuiu também para melhorar a caracterização das formas e completar o registro do seu fluxo na obra. As entrevistas foram realizadas com dois soldadores, sendo um responsável e um ajudante. Ainda no dia 13/03/2020 foi realizada uma nova visita a Obra B para coleta de dados complementares e finalização dos registros fotográficos (duração média de 2 horas).

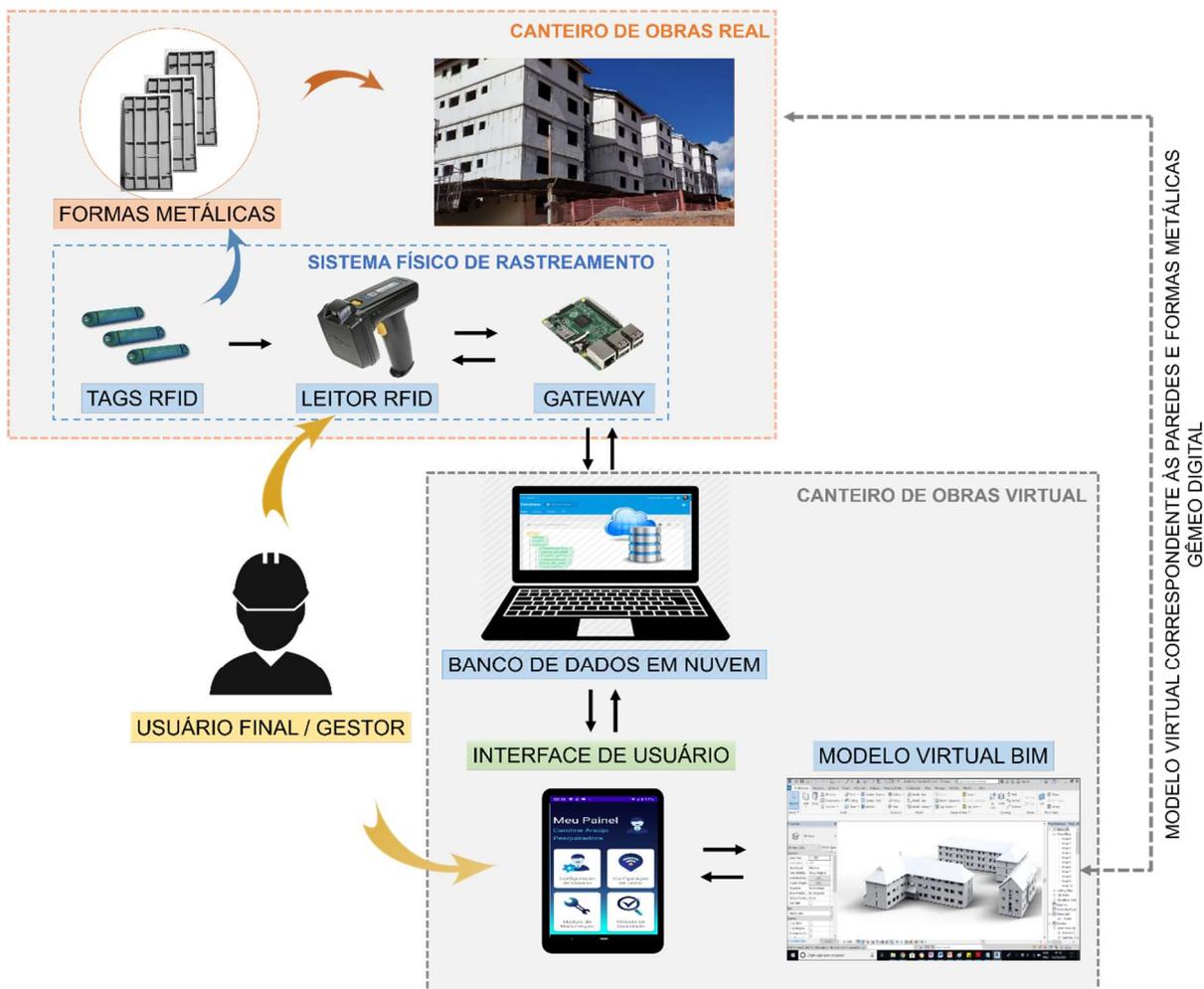
As informações obtidas no estudo preliminar na Obra A e no estudo na Obra B possibilitaram o mapeamento de processo do sistema construtivo de paredes de concreto moldadas *in loco*. A partir do mapeamento foi gerado um relatório fotográfico sequencial incluindo todas as etapas consideradas relevantes ao processo.

Ao longo das visitas, ainda como resultado das entrevistas e observação, também foi possível completar o diagnóstico para as formas metálicas com a identificação de uma série de problemas relacionados às formas e possíveis consequências negativas para a obra e para a empresa. As informações adicionais foram obtidas com entrevistas não estruturadas com a equipe de planejamento e qualidade do escritório da Empresa X, por meio de reuniões com a gerência, contatos telefônicos e meios eletrônicos.

4.4.2 Estudo dos Requisitos do Sistema Integrado

Esta etapa envolveu a sugestão de um modelo conceitual do sistema integrado para rastreamento de formas metálicas e definição de requisitos técnicos e práticos para nortear as demais etapas, além da criação de protótipos. Com isso foi possível testar a interação entre as tecnologias envolvidas visando atender às necessidades de campo. O sistema proposto consiste em associar *tags* RFID ao ID de elementos virtuais equivalentes no BIM e armazenar as informações de interesse sobre essas formas em um banco de dados, o qual se comunica com ambiente físico e com o ambiente virtual. A solução geral preliminar do processo de coleta e representação dos dados no sistema está indicada na Figura 27. Os requisitos técnicos gerais relacionados aos campos da Figura 27 serão discutidos a seguir.

Figura 27 - Estrutura conceitual preliminar do sistema integrado.



Fonte: Autora (2020).

Sistema Físico de Rastreamento: para viabilizar o rastreamento das formas foi determinada a utilização de um sistema UHF RFID, de acordo com as recomendações de Xue *et al.* (2018). Este sistema consiste em um leitor UHF e etiquetas UHF passivas que sejam apropriadas para superfícies metálicas. De acordo com os estudos da maioria dos autores previamente revisados na RSL e considerando que as formas metálicas são recursos que se deslocam no ambiente da construção, o leitor selecionado é do tipo portátil (*handheld*). Interações do sistema RFID com outras tecnologias como GPS, antenas auxiliares e *beacons* baseados em Bluetooth não foram incluídas no presente estudo, embora sejam uma possibilidade futura.

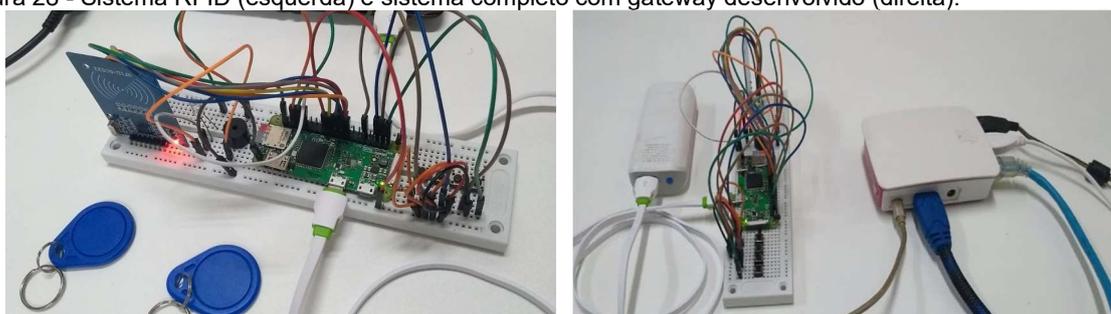
Conforme a estrutura preliminar indicada na Figura 27, o primeiro passo a ser dado no canteiro de obras real é aplicar as *tags* UHF de identificação exclusivas em cada uma das placas metálicas estudadas (ou componentes das formas, a depender das necessidades da empresa). Em seguida, o processo envolve o uso do leitor UHF móvel por um operador para capturar os dados contidos nas *tags*, realizando a leitura sempre que necessário. Nesta primeira versão proposta para o sistema, os dados na estrutura geral eram enviados para um

equipamento chamado de *gateway* inteligente, que fica instalado localmente. Ele era o responsável por estabelecer a comunicação com o banco de dados em Nuvem via Internet, onde é realizada a etapa de armazenamento estruturado de dados. Um protótipo de *gateway* chegou a ser desenvolvido durante o estudo, conforme indicado em seguida.

Gateway Inteligente: No presente estudo, a função do *gateway* foi se conectar aos elementos de um sistema RFID com o BIM, se comunicar com redes internas e externas, além de atuar na transferência de dados. Como prova de conceito, um protótipo do *gateway* inteligente foi desenvolvido de forma colaborativa com um professor do curso de Ciência da Computação e com membros do grupo de pesquisa GETEC¹, visando permitir: (a) avaliar melhor o potencial e as limitações das tecnologias usadas, (b) estudar a melhor forma de estruturação e configuração do banco de dados para a aplicação, e (c) avaliar as características da comunicação estabelecida (Wi-Fi ou Bluetooth).

Os dispositivos inteligentes Raspberry PI Zero W e Raspberry PI 3 foram utilizados, além das ferramentas SQLite (banco de dados local relacional), Firebase (banco de dados *online* NoSQL), Revit Autodesk e Unity. Os dados coletados eram provenientes de um sistema prototípico de RFID de baixo custo composto por um leitor MFRC-522 de baixa frequência e *tags* de baixa frequência embutidas em chaveiros. O sistema RFID foi feito em LF devido à disponibilidade prévia de equipamentos que funcionam com essa frequência no laboratório, embora o projeto fosse adaptável para UHF. Dispositivos auxiliares como *LED's*, *buzzer*, *jumper's*, *protoboard*, baterias e quatro *push buttons* foram utilizados para permitir a interação com o usuário. A Figura 28 indica os protótipos físicos desenvolvidos.

Figura 28 - Sistema RFID (esquerda) e sistema completo com gateway desenvolvido (direita).



Fonte: Autora (2020).

O desenvolvimento do *gateway* inteligente foi baseado na plataforma SOFT-IoT (ANDRADE *et al.*, 2018). O Raspberry PI 3 foi utilizado para implementação do servidor do *gateway*. O procedimento inicial para habilitar o *gateway* para a aplicação desenvolvida consistiu

¹ Prof. Dr. Cássio Vinicius Serafim Prazeres, mestrando Eng. Caio Mendes Lima e aluno de IC Julio Cesar Lopes Santos.

em quatro etapas: (1) instalação do sistema operacional Raspbian, (2) instalação dos pacotes necessários para a aplicação em Python, (3) configuração do Raspberry PI 3 para torná-lo um roteador de rede local, e (4) configurações necessárias para que o *gateway* acesse a sua própria rede Wi-Fi local e também a rede cabeada WLAN. Dessa forma, para a construção do servidor foi necessária a criação de uma pasta local no *gateway* para que todos os arquivos fossem alocados de forma correta e organizada. Após as configurações e testes referentes ao funcionamento de cada arquivo e já considerando a conexão com o sistema RFID, o Raspberry PI3 tornou-se propriamente um *gateway* capaz de lidar com os dados. A comunicação entre o *gateway* e o banco de dados ocorria via Wi-Fi.

O Raspberry PI Zero W foi utilizado como microcontrolador exclusivamente para habilitar o leitor MFRC-522 do sistema RFID a se comunicar via protocolo MQTT-SN via Bluetooth com o *gateway*, para o qual eram enviados os dados coletados. Para tanto, o Raspberry PI Zero W se conecta à rede Wi-Fi local do Raspberry PI 3 (*gateway*). A linguagem de programação utilizada nesta etapa foi Python3. O procedimento inicial para permitir a aplicação desenvolvida consistiu em quatro etapas: (1) instalação do sistema operacional Raspbian, (2) instalação dos pacotes necessários para a aplicação em Python, (3) configuração do Raspberry PI Zero W para acessar automaticamente a rede local do *gateway*, e (4) instalação dos componentes físicos do circuito elétrico.

A plataforma Unity foi utilizada para o desenvolvimento referente aos recursos visuais, servindo como suporte para os modelos BIM e possibilitando a comunicação com a Web por meio do WebGL (API em JavaScript). Os procedimentos necessários para estabelecer esta comunicação consistiram nas seguintes etapas: (1) importação do modelo BIM para o Unity, gerando o modelo derivado tridimensional; (2) ajuste de funcionalidades de visualização do modelo; (3) estabelecimento de comunicação entre o modelo e o banco de dados; e (4) exportação do modelo em WebGL. Os resultados obtidos na prova de conceito do *gateway* inteligente foram publicados no artigo Araújo *et al.* (2020).

Embora o *gateway* tenha servido como prova de conceito e tenha sido relevante para a fase de Sugestão da DSR, após os ciclos de reflexões geradas ao longo do estudo e considerando dificuldades relacionadas à sua instalação e mobilidade no campo, ficou decidido que a função do *gateway* seria incorporada ao dispositivo a ser utilizado para a Interface com Usuário, ou seja, um *tablet* ou celular. Na versão final do sistema, portanto, todo o conhecimento obtido foi adaptado para esta nova proposta e o *gateway* físico não foi mais utilizado.

Banco de Dados: com base nos estudos desenvolvidos por Akanmu, Anumba e Messner (2012), Akanmu *et al.* (2016), Ikonen *et al.* (2013), Li *et al.* (2017), Ma, Jiang e Shang (2019), o banco de dados considerado mais adequado para receber os dados coletados no

rastreamento é do tipo SQL. Porém, seguindo a sugestão de trabalhos futuros proposta por Tang *et al.* (2020), considerou-se importante neste estudo avaliar as vantagens que um banco de dados NoSQL pode promover, em termos de armazenamento, estruturação e escalabilidade de dados. De acordo com as recomendações apresentadas por Xue *et al.* (2018) e outros estudos mencionados anteriormente, foi definido para o presente estudo que o banco de dados deveria ser baseado em Computação em Nuvem, com armazenamento de dados em *online*. Além disso, também ficou definido que deveria ter compatibilidade com plataformas e *software* como serviço e ter uma função para armazenamento de dados *off-line*.

Ambiente BIM: ainda conforme indicado na Figura 27, o BIM tem como principal atribuição nesse estudo a representação da realidade por meio do conceito de Gêmeo Digital, com possibilidade de fluxo de dados bidirecional entre o ambiente físico e o ambiente virtual. No canteiro de obras virtual, cada um dos elementos de interesse (formas metálicas e paredes) deve ser representado virtualmente no modelo BIM do canteiro com seu respectivo ID exclusivo, que será associado ao ID da *tag* equivalente contido no ambiente físico. Essa associação é possível através da comunicação que ocorre entre o ambiente virtual e o banco de dados, o qual será previamente configurado para esse fim. O modelo BIM do presente estudo limita-se a representar a estrutura dos blocos (paredes de concreto) e as formas metálicas.

No ambiente virtual, o modelo BIM segue uma das abordagens indicadas por Xue *et al.* (2018), na qual primeiro o modelo é gerado em *software* comercial como o Revit e depois é traduzido para uma plataforma Web, gerando um modelo derivado que deve preservar parâmetros originais. Quanto à integração do BIM com demais tecnologias, é seguido o primeiro método de integração proposto por Tang *et al.* (2019), que foi apresentado no Capítulo 3.2.2.1.

Interface com Usuário / Aplicativo: após traduzido, o modelo poderá ser visualizado e manipulado pelos usuários ou gestores de obra na Interface do Usuário. Para esta interface foram consideradas duas possibilidades: um site, disponibilizado na Internet, ou um aplicativo com funções *online* e *off-line*, acessível por dispositivos portáteis que podem ser facilmente levados ao canteiro de obras, como *tablets* e *smartphones*. Esta última possibilidade foi a escolhida. Na interface do usuário, que contém o modelo BIM, o gestor da obra ou outro eventual usuário rastreia as informações sobre as características e o status das formas e das paredes geradas, bem como acompanha o progresso da obra. Os módulos pensados para o sistema integrado serão apresentados na fase de Desenvolvimento da DSR.

4.4.3 Especificações das Ferramentas

Nesta etapa são apresentadas e descritas as tecnologias utilizadas no estudo para o rastreamento de formas metálicas, incluindo *hardwares* e *softwares*.

Ferramentas do Sistema Físico de Rastreamento (Camada de Sensoriamento): a infraestrutura básica de campo para o estudo consiste no equipamento coletor de dados (leitor) portátil RFID UHF, nas *tags* passivas UHF e no dispositivo móvel que recebe o aplicativo. Com relação ao leitor, desejava-se no mínimo: (a) comunicação via Bluetooth com dispositivos móveis, (b) suporte para o sistema operacional Android, e (c) fornecimento do SDK para possibilitar a programação. Uma minuciosa busca foi realizada na Internet para identificação dos principais fornecedores do mercado e dos principais modelos disponíveis. Os critérios comparativos gerais para escolha do leitor RFID estão indicados em seguida:

- Distância, frequência e velocidade de leitura;
- Capacidade de Memória;
- Sistema Operacional;
- Protocolo;
- Duração da Bateria;
- Suporte à tecnologia Android;
- Processador;
- Classificação de grau de proteção (IP);
- Temperatura de operação;
- Preço;
- Peso;
- Resistência à queda;
- Comunicação via Bluetooth ou Wi-Fi;
- Fornecimento de SDK;
- Mecanismo de Interação com Usuário;
- Dimensões;
- Custo-benefício.

Devido ao orçamento previsto para o projeto, o critério do custo-benefício definiu a escolha final do leitor: o modelo I300 UHF, comercializado no Brasil pela empresa INOVACODE e fabricado pela empresa CHAFON. Este modelo está indicado nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 - Leitor RFID modelo I300 UHF e indicadores do painel para interação com usuário.

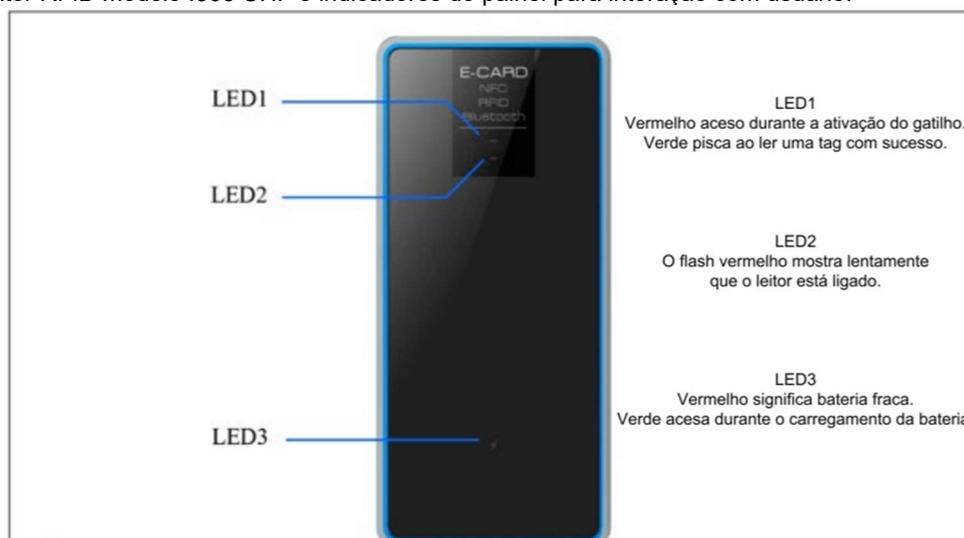


Figura 30 - Informações para utilização do leitor RFID modelo I300 UHF.

	
Item	
Botão Trigger	Ative o leitor para ler o UID do tag e enviar para o host
Chave liga / desliga	Set esquerda para ligar e direita para desligar
	
Item	
Micro USB	Carregamento de bateria e porta COM virtual USB

Fonte: INOVACODE (2021).

No Quadro 9 estão indicadas as suas características técnicas:

Quadro 9 - Principais características técnicas do leitor RFID selecionado.

Características Técnicas	Modelo Inovacode I300 UHF
Distância de Leitura Máx.	2 m
Frequência de Leitura	UHF, configurável para faixa de 902 a 928MHz ou faixa de 865 a 868MHz
Velocidade de Leitura	Velocidade superior a 50 peças / segundo para leituras múltiplas
Capacidade de Memória	370 peças, máx. 128 bits EPC ou 120 peças, máx. 496bitsEPC
Sistema Operacional	Não informado
Protocolo	ISO180000-6E (EPCC1G2)
Duração da Bateria	Bateria de lítio, suporta 3 horas de leitura, carregamento USB (5V)
Suporte	Android e Windows Desktop
Processador	Não informado
Grau de Proteção (IP)	Não informado
Temperatura de Operação	-10°C a +70°C
Peso	Aproximadamente 300g
Resistência à queda	Não informado
Preço	R\$1899,00
Comunicação	USB e Bluetooth 4.0
Fornecimento de SDK	Sim
Interação com Usuário	Sinalização via LED
Dimensões	110 x 50 x 5,8 mm

Fonte: INOVACODE (2020).

Para definição das *tags* RFID foram pré-determinados os critérios para funcionamento do sistema. Desejava-se no mínimo as seguintes características: (a) *tags* passivas UHF, (b) possibilidade de aplicação em superfícies metálicas, (c) dimensões físicas com ordem de grandeza de 10 cm, e (d) proteção contra intempéries e impactos. Uma busca foi realizada na

Internet para identificação dos principais fornecedores de *tags* e modelos disponíveis. Os critérios comparativos gerais para escolha das tags RFID estão indicados em seguida:

- Frequência de operação;
- Protocolos suportados;
- Configuração de memória;
- Alcance de leitura em metal;
- Alcance de leitura em não metal;
- Material do invólucro;
- Intervalo de temperatura de operação;
- Força máxima de compressão;
- Classificação de grau de proteção (IP);
- Dimensões;
- Peso;
- Aplicações sugeridas pelo fabricante;
- Custo-benefício.

Foi elaborada uma planilha comparativa com as *tags* que atendiam as características necessárias, visando gerar melhores análises. Inicialmente foram analisados 27 modelos distintos de *tags*. Após a análise da tabela e sob a perspectiva da melhor aplicabilidade ao projeto, foi selecionada a *tag* UHF Ironside Slim (Quadro 10). Esta *tag* foi desenvolvida para ter alto desempenho em superfície metálica, mas também pode ser utilizada em superfícies não metálicas. A fixação pode ser feita por meio de adesivo ou mecanicamente. Esta opção apresentou o melhor custo-benefício entre as opções de compra em empresas nacionais.

Quadro 10 - Principais características técnicas da *tag* de RFID selecionada.

Características Técnicas	Modelo tag UHF Ironside Slim
Frequência de operação	860 a 960 MHz
Protocolos suportados	EPC Class 1 Gen2, ISO 18000-6C
Configuração de memória	128 bits EPC, 512 bits Memória de Usuário, 96 bits TID
Alcance de leitura em metal	Até 7m
Alcance de leitura em não metal	Até 3,5m
Material do invólucro	Plástico de engenharia de alta resistência
Intervalo de temperatura de operação	-35°C a +85°C
Força máxima de compressão	Não informado
Grau de Proteção (IP)	IP68
Dimensões	84 x 21 x 10 mm
Peso	15 g
Preço	R\$ 31,78 cada
Tempo de Vida	50 anos de retenção de dados, 100.000 ciclos de gravação
Temperatura de Operação	-35°C a +85°C
Fixação	Adesivo Acrílico; Adesivo Poliuretano; Epóxis; Selantes de Silicone; Fixação Mecânicas.
Resistência	Óleo de motor; Água salgada (10% salinidade); Ácido Sulfúrico (10%, pH 13); NaOH (10%, pH 13).

Fonte: INOVACODE (2021).

Devido ao orçamento previsto para o projeto, foram adquiridas 100 tags, que é uma quantidade suficiente para atender à todas as formas internas de parede de um apartamento. O modelo de *tag* selecionado está indicado nas Figuras 31.

Figura 31 - Tags RFID modelo UHF Ironside Slim.



Fonte: INOVACODE (2021).

Com relação ao dispositivo para servir de interface com o usuário no canteiro de obras, assumir as funções de *gateway* e controlar o sistema RFID, através do aplicativo desenvolvido, foi utilizado em campo um smartphone de modelo Remi Note 9, da empresa Xiaomi, com memória RAM de 4GB, memória ROM de 128GB e com sistema operacional Android. Ressalta-se que o aplicativo funciona em qualquer dispositivo com sistema operacional Android, tendo sido feitos também alguns testes com modelos das empresas Samsung e Motorola.

Ferramentas do Banco e Dados (Camada de Rede): o Firebase foi selecionado como banco de dados principal. Segundo Khedkar e Thube (2017), o Firebase é uma API fornecida pelo Google, compatível com a sincronização de aplicações Web e com sistemas operacionais Android e IOS para dispositivos móveis. Uma de suas funções é a criação de bancos de dados NoSQL hospedados em Nuvem, como o Real-time Database, que foi utilizado no presente estudo. O seu armazenamento de dados ocorre em formato JSON e os dados são sincronizados continuamente para cada cliente associado, podendo ser acessados de todas as plataformas compatíveis (KHEDKAR; THUBE, 2017). No Quadro 11 estão indicadas algumas das suas principais características.

Quadro 11 - Características principais do Firebase.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIÇÃO
Autenticação	Este recurso permite que apenas usuários autorizados acessem os aplicativos desenvolvidos. O acesso pode ser feito através do Gmail, Github, Twitter, Facebook ou através de uma autenticação personalizada.
Hospedagem	É uma ferramenta utilizada por desenvolvedores que permite implementar aplicativos na Web e enviar conteúdo de forma rápida e eficaz para os servidores da Google. O Firebase tem suporte para escolha de domínios personalizados e certificados para cada site hospedado.
Mensagens	Permite transmitir mensagens para diferentes plataformas (Android, IOS ou na Web) com segurança e sem custos adicionais, permitindo interações com os usuários.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIÇÃO
Análises	Esse recurso permite entender como os usuários estão usando o banco de dado e as aplicações associadas. Podem ser fornecidas informações detalhadas sobre quais usuários são mais ativos ou sobre qual recurso é mais utilizado, por exemplo.
Armazenamento	O Firebase oferece facilidade e segurança no armazenamento, permitindo guardar e recuperar conteúdos como imagens, vídeos e áudio diretamente pelo SDK de usuários autorizados,
Banco de dados	O banco de dados no Firebase é baseado em Nuvem, mas é considerado altamente confiável do ponto de vista da preservação dos dados devido à sua funcionalidade <i>off-line</i> . Ainda que ocorra uma perda na conexão, os dados serão mantidos no banco.
Relatório de falhas	Este recurso cria relatórios de erro sobre a aplicação. Os erros são agrupados de acordo com a sua gravidade. Também é possível criar eventos personalizados para capturar as etapas que levaram à falha da aplicação.

Fonte: Adaptado de Khedkar e Thube (2017).

A funcionalidade *off-line* do Firebase é interessante para o contexto do canteiro de obras, porque permite operar mesmo sem uma conexão de rede estável. Porém, ressalta-se que isso pode gerar conflitos e inconsistências, caso duas ou mais atualizações/alterações sejam feitas localmente no sistema (por exemplo, por diferentes usuários) antes de ocorrer a sincronização para o banco de dados principal.

Ferramentas BIM (Camada de Serviço): o Revit Autodesk foi utilizado como *software* para gerar os modelos BIM devido à sua compatibilidade com as demais ferramentas e experiência prévia da pesquisadora. De acordo com Eastman *et al.* (2011), o Revit foi introduzido pela Autodesk em 2012 e atualmente é o líder do mercado do BIM. A sua instalação encontra-se disponível para processadores de 32 ou 64 *bits* e para diferentes versões de sistemas operacionais Windows e Mac. A produção de desenhos é feita de forma associativa e gerenciável e operações simultâneas podem ser feitas no mesmo projeto, bem como atualizações de informações e gerenciamento de visualizações.

Uma de suas vantagens é a possibilidade de edição bidirecional entre o modelo tridimensional produzido e os desenhos gerados (plantas, cortes e vistas). O Revit suporta o desenvolvimento de novos objetos paramétricos personalizados, bem com a personalização de objetos predefinidos em suas bibliotecas de objetos, desenvolvidas tanto pela própria Autodesk quanto por terceiros. Os objetos contidos nos modelos carregam em si uma identificação (ID) própria e localmente única. A API do Revit fornece suporte para o desenvolvimento de aplicativos externos (EASTMAN *et al.*, 2011). Esses aplicativos permitem explorar funções como análises estruturais, fabricação de componentes, impressões a laser, estudos de instalações, análises energéticas e estimativas de custo, entre outras (EASTMAN *et al.*, 2011).

A fase de seleção das ferramentas consistiu em testar as possíveis plataformas BIM e Bancos de Dados, comparando seus desempenhos. A partir dos critérios estabelecidos na RSL e de pesquisas exploratórias em sites comerciais, as seis plataformas BIM testadas foram: (a) BIM Server Center; (b) Xeokit; (c) Sketchup; (d) Forge; (e) Clara.io, e (f) Unity, que foi utilizado no projeto do *gateway*. Para melhor entendê-los, foi desenvolvida uma análise comparativa com alguns itens essenciais para o projeto, incluindo formatos de arquivos compatíveis, aplicabilidade a dispositivos móveis, interoperabilidade com Banco de Dados, limitações, opções de uso *off-line* e necessidade de um *plug-in*.

O Forge foi selecionado e utilizada para gerar e gerenciar o modelo derivado. Esta plataforma BIM foi descrita na Seção 2.4.6. Ela amplia funcionalidades de outros produtos da Autodesk ao permitir que sejam desenvolvidos aplicativos personalizados e fluxos de trabalho conectados a partir dos dados originais de um determinado projeto. Forge atende a setores como projetos de arquitetura, engenharia, construção e fabricação. Por meio de APIs, os usuários podem armazenar, visualizar, extrair e analisar dados do modelo BIM, desenvolvido no Revit. (AUTODESK FORGE, 2020).

Ferramentas Complementares de Suporte (Camada de Serviço): o Visual Studio Code foi o editor de código-fonte utilizado, que suporta as linguagens JavaScript, TypeScript e Node.js, além de possuir um ecossistema de extensões para outras linguagens como C++, C#, Java, Python e PHP (VISUAL STUDIO, 2018). Está sendo utilizado para apoiar o desenvolvimento de rotinas de integração entre o BIM e o banco de dados. O Heroku foi o serviço de hospedagem na Web utilizado para o modelo BIM. Ele consiste em uma plataforma PaaS na nuvem, multilíngue (Ruby, Ruby on Rails, Java, Node.js, Clojure, Scala, Python e PHP). É utilizado como servidor de maneira gratuita, permitindo que seus usuários desenvolvam e enviem seus aplicativos e que todo o fluxo de atividades ocorra de forma segura e escalável, simultaneamente (HEROKU, 2020).

Ferramentas da Interface com Usuário (Camada de Interface): Android Studio é o ambiente oficial de desenvolvimento de aplicativos para todos os dispositivos que utilizam o sistema operacional Android. Além do editor de código e das ferramentas de desenvolvedor avançadas, oferece recursos para melhorar a compilação, como emulador e ferramentas para detectar problemas de desempenho, usabilidade e compatibilidade com versões (ANDROID, 2020). GIMP é uma plataforma cruzada distribuída gratuitamente para edição de fotos, composição de imagens e autoria de imagens. Está disponível para GNU / Linux, OS X, Windows e mais sistemas operacionais, com opções de personalização e plug-ins de terceiros (GIMP, 2020).

No Quadro 12 é apresentado um resumo das ferramentas selecionadas:

Quadro 12 - Resumo das ferramentas selecionadas.

CAMADA DE USO	FERRAMENTA	FUNÇÃO
Ferramentas do Sistema Físico de Rastreamento (Camada de Sensoriamento)	 I300 UHF	Coleta de Dados
	 UHF Ironside Slim	Identificação de elementos físicos
Ferramentas do Banco e Dados (Camada de Rede)	 Firebase	Armazenamento e gerenciamento de dados
Ferramentas BIM (Camada de Serviço)	 AUTODESK REVIT	Modelo BIM
	 AUTODESK FORGE	Modelo derivado BIM
Ferramentas Complementares de Suporte (Camada de Serviço)	 Visual Studio Code	Desenvolvimento de rotinas para Firebase e Forge
	 HEROKU	Hospedagem do modelo BIM na Web
Ferramentas da Interface com Usuário (Camada de Interface)	 Android Studio	Desenvolvimento <i>Back-End</i> do aplicativo
	 GIMP	Desenvolvimento do <i>Front-End</i> do aplicativo

Fonte: Autora (2020).

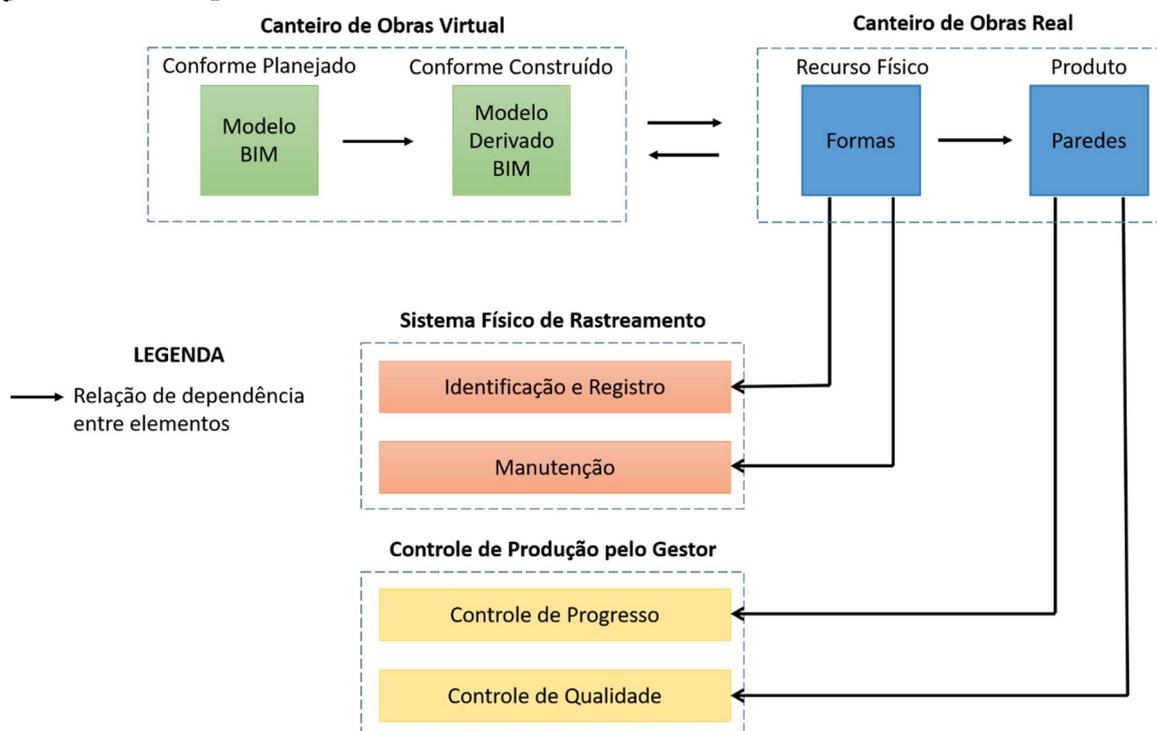
4.5 FASE DE DESENVOLVIMENTO

Esta fase envolveu o desenvolvimento e implementação piloto do sistema integrado para rastreamento de formas metálicas no canteiro de obras em formato de aplicativo, para ser utilizado em dispositivos móveis.

4.5.1 Desenvolvimento do Sistema Integrado

O desenvolvimento do sistema integrado (aplicativo) contou com o apoio de alunos de Iniciação Científica² que foram envolvidos no projeto. Esta etapa está fundamentada nos resultados e reflexões obtidas nas fases anteriores. A Figura 32 indica uma estrutura geral que serve de base para o aplicativo desenvolvido. As setas indicam uma relação de dependência entre os elementos considerados.

Figura 32 - Estrutura geral do sistema.



Fonte: Autora (2021).

Conforme indicado, para compor o ambiente virtual faz-se necessário o modelo BIM gerado pela empresa por um *software* comercial na fase de projeto e planejamento. Este modelo BIM é traduzido para um modelo derivado BIM, que deverá interagir com o campo para trocar informações atualizadas conforme ocorre a construção, seguindo o conceito de Gêmeos Digitais. Os elementos de interesse no canteiro são as formas metálicas (recurso físico) e as paredes de concreto (produto gerado), ambos inseridos no canteiro de obras real.

Com relação às formas, as demandas identificadas na obra consistem na identificação e registro de cada placa e no melhor controle da manutenção e vida útil das formas. Com relação às paredes, as demandas consistem no controle de progresso e controle da qualidade para correção de não conformidades relacionadas a problemas gerados pelas formas.

² Beatriz S. Vilas Bôas de Jesus (Engenharia Civil), Julio Cesar L. Santos (Engenharia Elétrica), Yago C. Martins Rodrigues (Engenharia da Computação) e Sara S. Santana (Engenharia Elétrica).

O sistema foi compatibilizado com a FVS utilizada pela empresa. Baseado na estrutura da Figura 32, o aplicativo foi desenvolvido a partir de módulos principais relacionados às demandas de campo, conforme indicado na Figura 33 e descrito resumidamente em seguida.

Figura 33 - Módulos principais do aplicativo.



Fonte: Autora (2021).

1- Módulo de Manutenção: consiste no registro de informações essenciais sobre cada forma metálica que faz parte do conjunto utilizado no processo construtivo. O usuário insere a informação. Para habilitar a funcionalidade deste módulo, uma etiqueta contendo um ID único deve ser previamente colocada em cada forma. Após esta etapa, ao acessar a interface do usuário e selecionar este módulo, haverá uma solicitação de leitura do *tag* junto ao leitor RFID para direcionar as informações que serão inseridas para o local correto no banco de dados.

No cadastro de novas formas, as informações incluem dimensões, peso, data de registro e código de identificação numérica da forma. Também é possível realizar alterações em cadastros feitos anteriormente, por exemplo, quando há mudanças nas dimensões das peças. Todas as alterações feitas ficam registradas no banco de dados com data e horário. Este módulo refere-se também à manutenção de cada forma. Permite ao usuário registrar informações sobre defeitos nas formas e respectivas manutenções, além de permitir o acesso às informações já cadastradas. Essas informações incluem defeitos observados, tipos de manutenção realizadas, histórico de defeitos e manutenções e registros fotográficos relacionados.

Uma função incorporada a esse módulo é a de procurar determinada forma em campo ou no galpão. Para isso é necessário selecionar a forma de interesse em uma lista e aproximar o leitor das *tags* do local. Quando encontra a *tag* selecionada, o dispositivo móvel vibra para alertar o usuário, além de dar uma indicação visual na tela.

2- Módulo de Qualidade: consiste em associar o rastreamento de formas metálicas às informações relativas às paredes de concreto para controle da qualidade. O objetivo principal deste módulo é comparar os dados coletados e a qualidade das paredes de concreto, verificadas após a remoção das formas. Para isso, é necessário fazer o registro fotográfico de cada trecho gerado da parede correspondente à forma que a gerou.

3- Módulo BIM: este módulo consiste no Gêmeo Digital do ambiente real do canteiro de obras, portanto, contém o modelo derivado BIM. Desde o início do projeto, o identificador único de cada forma cadastrado no Módulo 1 é associado ao identificador único de um objeto virtual correspondente no BIM. Este módulo é desenvolvido para representar as informações contidas nos outros módulos, além do progresso da obra, no modelo derivado tridimensional. O objetivo é que ele possa apoiar tomadas de decisão.

4- Módulo Inserir Sequência: do ponto de vista do sistema, um dos principais desafios identificados está relacionado às seguintes questões: (a) as formas metálicas são recursos móveis, provisórios e montados *in loco*, sendo que a sequência de montagem pré-definida no projeto ou na pré-montagem não é rigorosamente seguida na obra; e (b) o sistema RFID utilizado é capaz de discernir múltiplas *tags* à distância, mas não é capaz de identificar a posição de cada *tag* lida para indicar em que ordem sequencial elas estão montadas.

Como a sequência de pré-montagem no galpão não corresponde necessariamente à sequência de montagem adotada em campo, isso gerava uma dificuldade para preparar o modelo BIM e garantir que as formas em campo corresponderiam ao seu respectivo elemento no Gêmeo Digital. Conseqüentemente, era difícil garantir que determinadas formas realmente moldaram determinada parede. A solução pensada para esse desafio envolve duas etapas:

- no galpão, após finalizada a pré-montagem, será sempre necessário fazer uma leitura sequencial das *tags* das formas, por cômodo. O alcance de leitura do leitor será mantido com um curto alcance (cerca de 10 cm) para que seja lida uma *tag* por vez. A sequência é salva em lista no banco de dados. Esta sequência é exibida no aplicativo e é utilizada para ajustar as formas no modelo BIM nas dimensões corretas, antes de começar a obra. Na leitura, também são identificadas as formas que fazem parte do jogo que vai para a obra;
- na obra, a cada novo meio pavimento, quando as formas estiverem montadas, sempre será necessário fazer a leitura sequencial das *tags*, por cômodo, seguindo a mesma sequência de leitura adotada na etapa anterior. A sequência lida é salva como uma lista no banco de dados. Esta sequência é exibida no aplicativo e é utilizada para alimentar o Gêmeo Digital e correlacionar o ID da *tag*, na sequência real de campo, com o ID do elemento equivalente no modelo derivado BIM.

Considerando os módulos apresentados, observa-se que o aplicativo é capaz de envolver o processo de coleta, armazenamento, gerenciamento e visualização dos dados de maneira integrada, evitando que seja necessário controlar diferentes plataformas para realizar o rastreamento (por exemplo, banco de dados e modelo BIM). A interface do aplicativo considera os módulos, os aspectos funcionais da interação com o usuário e a identidade visual,

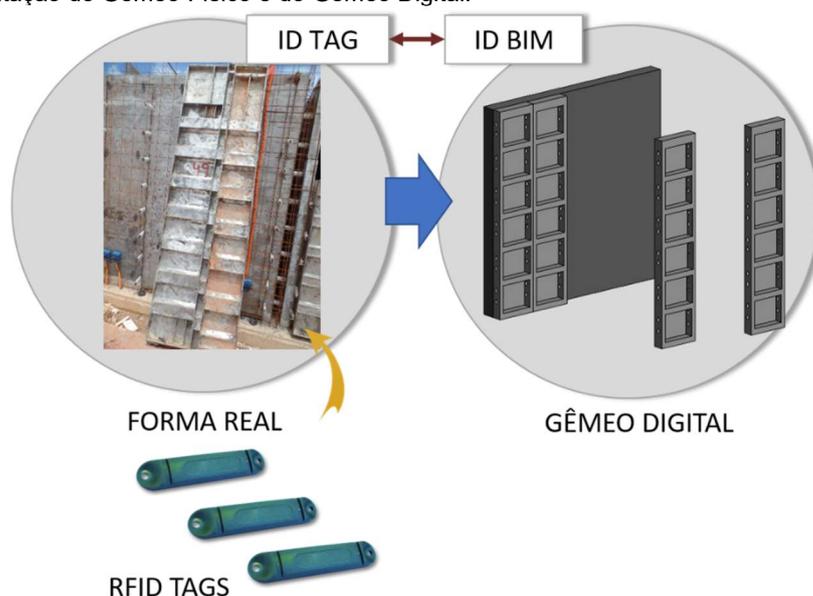
contendo todas as rotinas necessárias para compor a parte lógica em conformidade com as ferramentas utilizadas. Além dos três módulos principais, também foram desenvolvidos os seguintes módulos: Configuração de Usuário e Configuração de Leitor. Também foi desenvolvido um protocolo com os procedimentos necessários e boas práticas para utilizar o aplicativo em campo, que será apresentado no capítulo de resultados.

4.5.2 Testes e Implementação do Sistema Integrado em Campo

Esta etapa consistiu em testar e implementar o aplicativo de forma piloto na Obra C. Os requisitos do sistema integrado foram adequados aos procedimentos já adotados pela empresa para o gerenciamento das formas, tendo em vista realizar a implementação e avaliar os benefícios e desafios encontrados. Antes da implementação do sistema ocorreu a preparação da infraestrutura física, testes e coleta de dados para realizar ajustes no aplicativo e o acompanhamento de serviços para coletar dados complementares e averiguar, por exemplo, quanto tempo as equipes passam corrigindo problemas nas paredes que podem ser decorrentes das formas metálicas.

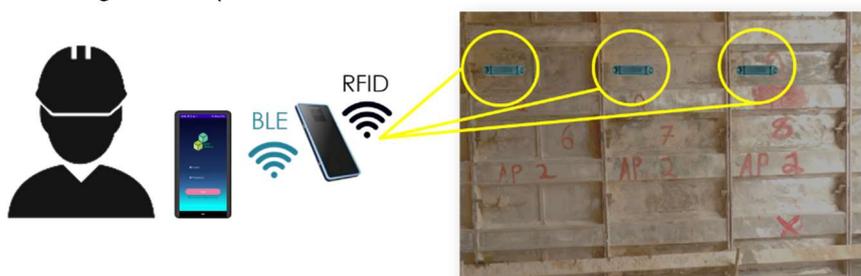
Preparação da infraestrutura: a preparação da infraestrutura física é uma parte fundamental para o estudo de campo. A associação entre elementos virtuais e reais neste estudo ocorre dentro do conceito de Gêmeos Digitais, considerando tanto o nível do ativo quanto o edifício como um todo. Por isso, o primeiro passo em campo é a colocação de *tags* em cada uma das placas da amostra. Desta forma, cada placa fica habilitada para que seja posteriormente criado o seu Gêmeo Digital no BIM, onde o UID da *tag* será associado ao ID BIM. A Figura 34 ilustra esse procedimento.

Figura 34 - Representação do Gêmeo Físico e do Gêmeo Digital.



Na obra, o usuário do sistema (operador) pode fazer a leitura do UID de cada *tag* para identificar as placas cadastradas ou cadastrar uma nova placa, desde que esteja de posse do leitor e do aplicativo. As funções relacionadas ao rastreamento das formas, controle de defeitos, controle de manutenção e captura de sequência dependem das leituras para serem executadas. A Figura 35 ilustra o processo de leitura das *tags*.

Figura 35 - Leitura das *tags* em campo.



Fonte: Autora (2021).

As visitas realizadas em campo para testes e implementação na Obra C incluíram a fixação das *tags*, no dia 01/12/2020, com auxílio de um soldador disponibilizado pela Empresa X. Após algumas tentativas de utilizar fita de adesivo acrílico transparente de alta adesão, ficou definido que a fixação seria mecânica e que as *tags* seriam parafusadas às formas. As 100 unidades de *tags* foram colocadas internamente em um jogo de formas, nas áreas referentes a um dos apartamentos do bloco e em parte do corredor. No dia 02/12/2020, antes da utilização do aplicativo, todas as formas da amostra foram cadastradas manualmente com suas respectivas dimensões e características. Também foi definida a ordem de leitura das sequências que deveria ser adotada em campo no módulo de Inserir Sequência. Esta ordem está indicada na Figura 36, considerando o meio pavimento com escada.

Figura 36 - Sequência de leitura definida no apartamento estudado.



Fonte: Autora (2021).

Testes com módulos do sistema: no período de 03/12/2020 a 15/12/2020 foram realizados os testes no Módulo de Manutenção, Módulo BIM e Módulo Inserir Sequência do aplicativo. Os testes envolveram principalmente o cadastro das formas, a captura de sequências de montagem, o cadastro de defeitos, a simulações de manutenções e a visualização dos dados no Gêmeo Digital. Também foi realizada uma captura de imagens das paredes geradas para comparar as não conformidades com os defeitos cadastrados das respectivas formas, considerando que o Módulo de Qualidade apresentou defeitos e não se encontrava finalizado.

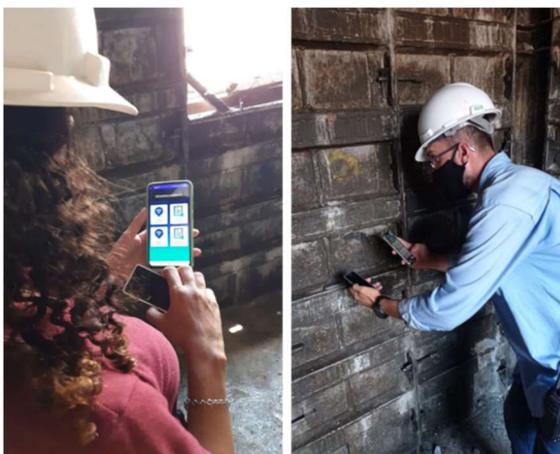
Dados complementares: no dia 09/12/2020 foi realizado um acompanhamento dos serviços de tratamento interno e chapisco, para mensurar quanto tempo era usado para corrigir problemas inerentes ao sistema construtivo (por exemplo, fechamento das aberturas deixadas pelas faquetas) e quanto tempo era usado com retrabalho em função de não conformidades nas paredes (por exemplo, nivelamento de barrigas). No dia 14/12/2020 foi realizado um acompanhamento do trabalho da equipe de manutenção do canteiro, composta por um soldador responsável e um soldador ajudante, para dar orientações sobre o sistema e para entender a frequência de manutenção e observar os procedimentos adotados na Obra C.

Implementação piloto: a implementação do sistema foi realizada em um bloco completo da obra, o Módulo 16. A implementação contemplou o uso do aplicativo (cadastro de usuário e de obra, configuração de leitor, Módulo de Manutenção, Módulo BIM e Módulo Inserir Sequência) e coletas diárias de dados nos dias úteis do período de 28/01/2021 a 10/02/2021, exceto no dia 02/02/2021, que equivale ao dia de execução do meio pavimento sem escada do segundo pavimento. Os dados foram coletados pela pesquisadora e pelos dois operadores que foram treinados. Os tipos de dados coletados foram dados de defeitos nas formas, dados de sequência de montagem e dados de imagem das paredes geradas. A função de procurar uma forma também foi utilizada e o histórico de registros foi consultado por diversas vezes.

Durante o período de implementação, não ocorreu nenhuma manutenção nas formas, embora quase todas as placas apresentassem pelo menos desgaste interno e externo. Por isso, não foi possível coletar os dados relacionados a manutenção. O Gêmeo Digital foi amplamente utilizado para visualização dos dados coletados, tanto em campo quanto no escritório da obra. Com relação ao Módulo de Qualidade, foram encontradas dificuldades para capturar as imagens de cada um dos trechos das paredes utilizando a câmera do dispositivo móvel. Por exemplo, no banheiro não havia espaço suficiente para tirar uma foto que pudesse capturar toda a parede de um determinado lado, ou mesmo um trecho que fosse no chão até o teto. Outro problema era a iluminação dos cômodos. Em função disso, foram realizadas capturas de imagem com uma câmera 360° no dia 05/02/2021.

Treinamentos e apresentação: os treinamentos para uso do aplicativo foram realizados com a Técnica em Edificações da obra, no dia 01/02/2021, e com um dos estagiários, no dia 04/02/2021, pois eles foram indicados pelos gestores da obra como os mais prováveis operadores do sistema. No dia 05/02/2021 foi realizada pela pesquisadora uma apresentação do sistema para toda a equipe de obra, durante a reunião de planejamento semanal. A apresentação incluiu a explicação do funcionamento de cada um dos módulos e a indicação de procedimentos de campo necessários para a implementação. No dia 08/02/2021, os dois operadores treinados fizeram a utilização não supervisionada do sistema e coletaram os dados previstos para o dia. A Figura 37 mostra o treinamento realizado com os dois prováveis operadores do sistema em campo.

Figura 37 - Treinamento dos dois prováveis operadores do sistema.



Fonte: Autora (2021).

A Figura 38 mostra a apresentação do sistema para a equipe de obra, durante a reunião de planejamento semanal.

Figura 38 - Apresentação do sistema para equipe da obra.



Fonte: Autora (2021).

O Quadro 13 resume as visitas realizadas na Obra C e as ações desenvolvidas.

Quadro 13 - Resumo de visitas técnicas realizadas na fase de Desenvolvimento na Obra C.

Visitas	Ambiente	Ações desenvolvidas	Fontes de Evidência
27/11/2020 (4h)	Canteiro	Participação da reunião de planejamento e apresentação da ideia à equipe da obra. Testes e discussão sobre fixação das <i>tags</i> .	Percepção da pesquisadora durante preparação e após checagem da infraestrutura física e feedback da equipe da obra.
01/12/2020 (8h)	Canteiro	Fixação mecânica (parafusada) das <i>tags</i> em 100 formas, com apoio de um soldador disponibilizado pela empresa.	
02/12/2020 (4h)	Canteiro	Cadastro manual das formas por cômodo e observação do estado das formas.	
03/12/2020 (4h)	Canteiro	Finalização do cadastro manual das formas e início do cadastro das formas no aplicativo.	Percepção da pesquisadora durante e após os testes em campo e <i>feedback</i> da equipe da obra.
04/12/2020 (4h)	Canteiro	Finalização do cadastro das formas no aplicativo e testes de captura de sequências de montagem com aplicativo.	
09/12/2020 (6h)	Canteiro	Testes de captura de sequências de montagem com aplicativo, com registro de tempo de leitura por cômodo. Acompanhamento dos serviços de tratamento interno e chapisco.	
14/12/2020 (4h)	Canteiro	Testes de cadastro de defeitos e manutenções na obra. Acompanhamento da equipe de manutenção.	
15/12/2020 (4h)	Canteiro	Cadastro das paredes geradas para comparação das não conformidades encontradas com os defeitos nas formas. Testes de visualização do Gêmeo Digital.	
22/01/2021 (4h)	Canteiro	Testes finais com cadastro de usuário e de obra, configuração de leitor, Módulo de Manutenção, Módulo BIM e Módulo Inserir Sequência.	
28/01/2021 (6h)	Canteiro	Implementação do sistema e coleta de dados.	Percepção da pesquisadora durante e após implementação e <i>feedback</i> da equipe da obra.
29/01/2021 (8h)	Canteiro	Implementação do sistema e coleta de dados.	
01/02/2021 (6h)	Canteiro	Implementação do sistema e coleta de dados. Treinamento da Técnica em Edificações da obra para operar o sistema.	
03/02/2021 (6h)	Canteiro	Implementação do sistema e coleta de dados. Utilização supervisionada do sistema pela Técnica em Edificações da obra.	

Visitas	Ambiente	Ações desenvolvidas	Fontes de Evidência
04/02/2021 (6h)	Canteiro	Implementação do sistema e coleta de dados. Treinamento do Estagiário da obra para operar o sistema. Utilização supervisionada do sistema pelo Estagiário.	Percepção da pesquisadora durante e após implementação e feedback da equipe da obra.
05/02/2021 (6h)	Canteiro	Implementação do sistema e coleta de dados. Apresentação do sistema na reunião de planejamento da equipe de obra. Utilização de câmera 360° para paredes.	
08/02/2021 (6h)	Canteiro	Implementação do sistema e coleta de dados. Utilização não supervisionada do sistema pelos operadores treinados.	
09/02/2021 (4h)	Canteiro	Implementação do sistema e coleta de dados.	
10/02/2021 (4h)	Escritório	Implementação do sistema e coleta de dados.	

Fonte: Autora (2021).

4.6 FASE DE AVALIAÇÃO

Nesta fase foi realizada a medição de desempenho do sistema integrado, considerando a sua implementação em canteiros de obras reais. O objetivo foi identificar o que funcionou conforme o previsto e se ajustes se fazem necessários, com eventual retorno às fases anteriores do ciclo da DSR. Posteriormente, foram realizadas análises dos principais resultados obtidos. Para esta avaliação, adotou-se os seguintes constructos:

- a) **Funcionalidade:** esse constructo refere-se às tarefas que o usuário poderá executar através do sistema. O constructo visou também avaliar a adequação do funcionamento do sistema ao seu contexto de uso. As variáveis analisadas foram adequação da infraestrutura física, interferências e riscos durante o funcionamento, nível de precisão das leituras, latência dos dados e confiabilidade dos dados, visualização dos dados e generalização.
- b) **Transparência:** o constructo de transparência está associado à capacidade de um processo de produção (ou de suas partes) em se comunicar com as pessoas, tornando os principais fluxos e informações visíveis e compreensíveis, por meios físicos e organizacionais, medições e exibição visual e clara de informações (FORMOSO; SANTOS; POWELL, 2002; KOSKELA, 1992). Está sendo considerado que o sistema está associado ao processo de produção das paredes de concreto. Nesse sentido, a avaliação do constructo transparência compreendeu a análise da qualidade no fornecimento de informações pelo sistema e simplicidade e rapidez no entendimento das informações do sistema.

- c) **Utilidade:** visa avaliar se a solução proposta funciona ou proporciona uma melhoria (MARCH; SMITH, 1995). Neste trabalho, a utilidade foi avaliada baseada nas variáveis benéficas e dificuldades, custo / benefício e adequação do sistema às necessidades da empresa.
- d) **Usabilidade:** está relacionada com a facilidade de aprendizado e uso da interface, bem como a satisfação do usuário em decorrência da experiência de uso (LEITE, 2014). Este trabalho avaliou a usabilidade a partir da variável acessibilidade, incluindo critérios como satisfação com layout e fontes de cores

No Quadro 14 estão indicados os constructos, as variáveis associadas e as fontes de evidência a serem utilizadas no processo de avaliação.

Quadro 14 - Constructos, variáveis e fontes de evidência para avaliação do artefato.

DESEMPENHO DO SISTEMA		
CONSTRUCTO	VARIÁVEIS	FONTES DE EVIDÊNCIA
Funcionalidade	• Adequação da infraestrutura física	<ul style="list-style-type: none"> • Testes do sistema em laboratório • Testes do sistema em campo • <i>Feedback</i> da equipe da obra • Entrevistas estruturadas
	• Interferências e riscos no funcionamento	
	• Nível de precisão alcançado nas leituras	
	• Latência dos dados	
	• Confiabilidade dos dados	
	• Visualização de dados	
Transparência	• Qualidade do fornecimento de informações sobre as formas metálicas e paredes de concreto pelo sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Testes do sistema em campo • <i>Feedback</i> da equipe da obra • Entrevistas estruturadas
	• Simplicidade e rapidez no entendimento das informações	
REQUISITOS DO CLIENTE		
CONSTRUCTO	VARIÁVEIS	FONTES DE EVIDÊNCIA
Utilidade	• Benefícios e dificuldades da implementação	<ul style="list-style-type: none"> • Testes do sistema em campo • <i>Feedback</i> da equipe da obra • Entrevistas estruturadas
	• Custo / Benefício	
	• Adequação do sistema às necessidades das organizações referentes ao controle dos recursos físicos	
Usabilidade e Experiência do Usuário	• Acessibilidade do sistema pela equipe operacional e gerencial da obra	

Fonte: Autora (2021).

Com base nas variáveis definidas, foram elaboradas questões para compor um roteiro de entrevistas. Foram estabelecidos dois grupos de entrevistados:

- **Grupo 1:** inclui os dois operadores treinados para utilizar o sistema, ou seja, a Técnica em Edificações e o Estagiário 1, que responderam perguntas relacionadas ao Desempenho do Sistema;
- **Grupo 2:** inclui os dois operadores e também as pessoas da Empresa X que tinham conhecimento do funcionamento do aplicativo e que tinham relação com a gestão das formas metálicas ou com o controle da qualidade das paredes. As perguntas nesse caso foram relacionadas aos Requisitos dos Cliente.

Foram entrevistados na obra: Coordenadora de Obras, Trainee Gerencial, Estagiário 1, Estagiário 2, Estagiário 3, Técnica em Edificações, Técnico em Edificações e Técnico em Segurança. Foram entrevistados no escritório: Gerente de Sistema de Gestão Integrado, Analista BIM e Coordenadora de Qualidade.

As perguntas foram organizadas em um Formulário da Google e enviadas aos entrevistados por meio digital, porém, as entrevistas foram conduzidas presencialmente pela pesquisadora. Na maioria das questões foi avaliada a percepção dos entrevistados em uma Escala Likert.

As entrevistas do Grupo 1 focaram na **Desempenho do Sistema**, incluindo questões relacionadas a adequação da Infraestrutura Física, Nível de Precisão das Leituras, Latência dos dados, Confiabilidade dos dados, Visualização, Escalabilidade, Qualidade do fornecimento de informações, Simplicidade e rapidez no entendimento das informações.

As entrevistas do Grupo 2 focaram nos **Requisitos do Cliente**, incluindo questões relacionadas a Benefícios e Dificuldades, Adequação do sistema às necessidades da empresa e Acessibilidade. O questionário completo encontra-se no **Apêndice 3**. O roteiro de entrevista, com base nas variáveis do estudo, está indicado a seguir no Quadro 15.

Quadro 15 - Roteiro de entrevistas.

GRUPO 1 - DESEMPENHO DO SISTEMA
Adequação da Infraestrutura Física
Percepção sobre fixação, resistência e capacidade das <i>tags</i> e do leitor; Percepção sobre a interferência na dinâmica normal do sistema construtivo; Percepção de risco da infraestrutura física para trabalhadores e operadores do aplicativo.
Nível de Precisão das Leituras
Percepção geral sobre distância e velocidade de leitura.
Latência dos dados
Percepção sobre tempo médio de leitura de sequências; Percepção sobre troca de dados em tempo hábil.
Confiabilidade dos dados
Percepção sobre procedimentos de leitura;

Percepção sobre falhas no aplicativo; Percepção sobre correspondência de dados.
Visualização
Percepção geral sobre visualização dos dados no aplicativo.
Escalabilidade
Percepção sobre capacidade do sistema de ser adaptado para outros contextos.
Qualidade do fornecimento de informações
Percepção da capacidade do sistema de fornecer informações para apoiar em tomadas de decisão.
Simplicidade e rapidez no entendimento das informações
Percepção da compreensão do sistema pelos trabalhadores e pelos gestores.
GRUPO 2 – REQUISITOS DO CLIEINTE
Benefícios e Dificuldades
Percepção sobre a capacidade do sistema de fazer o cadastro de formas, registrar defeitos, registrar manutenções, apoiar na sequência de montagem, melhorar a qualidade das paredes e reduzir retrabalho e perdas; Percepção sobre dificuldades de implementação; Percepção sobre custo/benefício.
Adequação do sistema às necessidades da empresa
Percepção sobre a capacidade do sistema de melhorar controle sobre as formas; Percepção sobre áreas impactadas na empresa.
Acessibilidade
Percepção sobre layout, identidade visual, cores e tamanhos de ícones e letras; Percepção sobre clareza no funcionamento dos módulos.

Fonte: Autora (2021).

4.7 FASE DE CONCLUSÃO

Nesta fase foram feitas as considerações finais sobre o estudo e a comunicação dos resultados e de todo o conhecimento produzido através desta dissertação de mestrado e através da publicação de trabalhos.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do presente estudo. O capítulo está dividido em duas partes. Na primeira parte estão os resultados das fases de Conscientização e Sugestão, com o mapeamento de processo do sistema construtivo de paredes de concreto e o diagnóstico para as formas metálicas. Na segunda parte estão os resultados da fase de Desenvolvimento, com o detalhamento do sistema integrado em formato de aplicativo (artefato) e do estudo de campo piloto, que contemplou testes e uma implementação piloto do sistema.

5.1 RESULTADOS DAS FASES DE CONSCIENTIZAÇÃO E SUGESTÃO

Esta seção apresenta o mapeamento do processo construtivo de paredes de concreto e o diagnóstico para as formas metálicas, o que aumentou a compreensão das especificidades, características e variáveis relacionadas ao recurso físico de interesse em seu meio, ou seja, dos **requisitos da obra** relacionados às formas metálicas no contexto do sistema construtivo de paredes de concreto.

5.1.1 Mapeamento de Processo do Sistema Construtivo de Paredes de Concreto

O mapeamento de processo ocorreu durante a observação sistemática na obra e resultou na categorização dos diferentes serviços em etapas numeradas, representadas com o respectivo registro fotográfico na Figura 39. Algumas dessas etapas podem ocorrer simultaneamente nos diferentes pavimentos e algumas podem variar um pouco a cada obra. Para fins de mapeamento, considerou-se como etapa inicial o momento em que as formas chegam ao galpão e como etapa final a conclusão do pavimento, com as instalações de segurança para execução do pavimento seguinte (Figura 39).

Todas as formas de alumínio da Empresa X ficam atualmente armazenadas no galpão, para onde retornam após a conclusão de cada obra. Quando são compradas, as formas chegam de fábrica com as dimensões (largura, altura, etc.) específicas para um determinado projeto, mas o longo da sua vida útil e a cada nova obra são necessários reajustes e manutenções.

Algumas das formas observadas na visita ao galpão foram fabricadas, segundo informado pelo soldador responsável, no ano de 2013. Elas já teriam sido utilizadas em aproximadamente 10 obras, até a data da visita. Não foi possível saber o número de vezes em que foram reutilizadas em cada obra, o que prejudica a estimativa e controle da vida útil. Quando retornam de cada obra para o galpão, as formas são inspecionadas pelos soldadores, que verificam a necessidade de limpeza ou de troca de componentes, ou seja, de costelas, abas laterais ou espelhos.

Figura 39 - Etapas mapeadas do processo construtivo de paredes de concreto.



(1) Chegada das formas ao galpão



(2) Armazenamento das formas



(3) Inspeção



(4) Limpeza



(5) Manutenção geral



(6) Adaptação ao projeto estrutural



(7) Cortes e ajustes para projeto



(8) Pré-montagem e numeração



(9) Aprovação para obra



(10) Transporte externo das formas



(11) Armazenamento das formas na obra



(12) Marcação de instalações



(13) Fixação das instalações



(14) Execução de fundação



(15) Marcação do piso



(16) Armação das paredes

(17) Instalações elétricas da parede

(18) Aplicação de desmoldante nas formas



(19) Montagem das formas da parede

(20) Montagem das formas da laje

(21) Armação e instalação das lajes



(22) Concretagem

(23) Retirada das formas

(24) Transporte interno manual



(25) Transporte interno com maquinário

(26) Instalações hidrossanitárias e acabamentos

(27) Colocação dos itens de segurança

Fonte: Autora (2020).

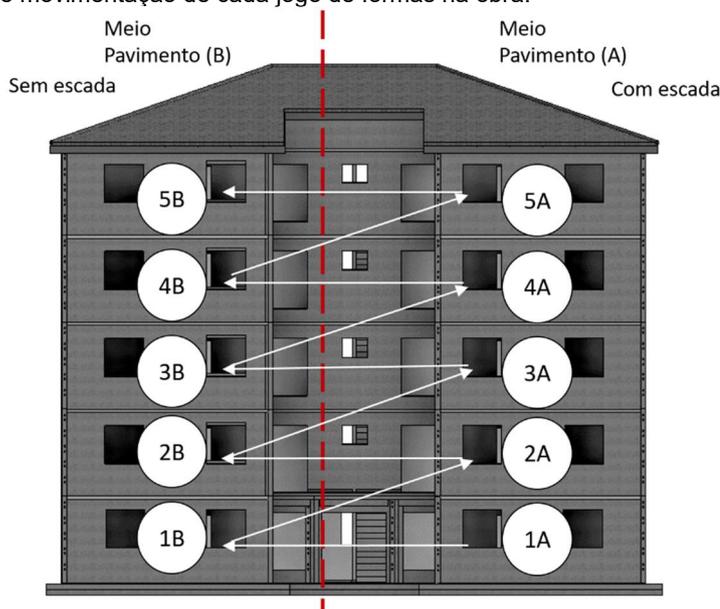
Geralmente, os funcionários tentam reaproveitar ao máximo as formas, mas quando há o desgaste excessivo de algum dos componentes da placa (costelas, espelhos e abas), torna-se necessária à sua substituição. Processos de soldagem são empregados na troca de componentes para reparar quebras no espelho, ou quando é necessário fazer algum tipo de adaptação na placa, conforme um novo projeto estrutural (aumentar dimensão, ajustar ou cortar, por exemplo). As peças de fixação, como os pinos, cunhas e faquetas, não são reformados ou adaptados, são sempre comprados novos quando necessário.

Antes de serem encaminhadas do galpão para uma nova obra, existe um processo de pré-montagem das formas no galpão que visa reproduzir previamente o processo de montagem que ocorrerá em campo. Esta pré-montagem serve como prototipagem para verificar erros e também para fazer as furações necessárias para conexões como as que ligam as formas das paredes as formas das lajes, por exemplo. Uma vez que a pré-montagem é definida, as formas recebem numerações com tinta para guiar a ordem de montagem no canteiro. Com a pré-montagem aprovada, as formas seguem para campo.

As formas metálicas são transportadas em caminhões abertos até a obra. Ao serem descarregadas, as formas ficam armazenadas no próprio canteiro. Enquanto isso, ocorrem em sequência os processos de marcação e fixação das instalações, execução da fundação e marcação do piso para fixação da armação e das instalações elétricas das paredes. Antes da etapa de montagem, deve sempre ser aplicado desmoldante na forma. Com relação à montagem, nesta obra as formas das paredes e das lajes eram montadas de forma quase intuitiva, com base na experiência dos montadores, pois não havia um projeto disponível para verificação da sequência.

Após a montagem das formas das paredes e das lajes é feita a armação e instalação das lajes, seguida do processo de concretagem. No dia seguinte, as formas que estavam montadas são retiradas e transportadas manualmente ou com o maquinário para o meio pavimento seguinte. A Figura 40 ilustra a movimentação de montagem das formas ao longo de cada meio pavimento, chamados de A ou B conforme o lado em que se encontram. O setor A contempla também a escada do bloco. Os setores também são chamados na obra de Meio Pavimento Com Escada (MPCE) e Meio Pavimento Sem Escada (MPSE).

Figura 40 - Sequência de movimentação de cada jogo de formas na obra.



Nesta obra, as instalações hidrossanitárias dos pavimentos eram alocadas após o processo de retirada das formas. Nessa dinâmica, deixa-se o espaço relativo à passagem das tubulações e, posteriormente, criam-se *shafts*. No caso de tubulações passando pela parede ou piso, faz-se muitas vezes necessário quebrá-los para instalação dos equipamentos. As últimas etapas são referentes aos acabamentos e colocação dos itens de segurança. No caso do último pavimento, após a retirada das formas, as mesmas devem ser transportadas de volta ao nível térreo com maquinário (manipulador telescópico).

Uma consideração importante a ser feita é que na obra o fluxo de trabalho para construir as paredes de concreto é bastante intenso, dinâmico e conturbado, pois existem metas de produtividade associadas à entrega de meio pavimento por dia. Os trabalhadores se movimentam continuamente em ambientes com áreas relativamente pequenas, principalmente em etapas de montagem, transporte interno e desmontagem. Nesta obra, o horário do almoço é o que contava com menor fluxo de pessoas dentro da construção.

5.1.2 Diagnóstico para as Formas Metálicas

O diagnóstico para as formas metálicas teve como resultado a identificação de uma série de problemas relacionados ao gerenciamento das formas, as possíveis consequências negativas para a obra e para a empresa e a identificação das oportunidades de solução.

Nas visitas ao galpão, o principal problema identificado com a observação sistemática e as entrevistas foi a **ausência de um sistema de controle formal das formas**. O controle é baseado na percepção e experiência dos soldadores e os dados não são registrados nem mesmo manualmente, o que dificulta a transparência no fluxo de informações. Não foi localizado nenhum documento onde fossem registradas as características físicas de cada forma, como dimensões, data de aquisição ou peso. A quantidade total de formas no galpão e a quantidade de formas que são encaminhadas para cada obra também não são valores conhecidos ou registrados. Embora exista um projeto de formas elaborado pelo escritório antes da construção, este não é utilizado pelos soldadores para adaptar as formas a um novo empreendimento. Eles se baseiam apenas no projeto estrutural do edifício. As adaptações e eventuais manutenções nas formas também não são registradas.

Outro problema está relacionado à **integridade das formas**. Uma possibilidade de dano que as placas podem sofrer é durante o transporte no caminhão e na descarga, embora na percepção dos funcionários esta atividade não seja a mais crítica para a integridade das formas. Após serem descarregadas e ficarem armazenadas no canteiro, as formas ficam exposta a intempéries e, conseqüentemente, a desgastes, conforme indicado na Figura 41.

Figura 41 - Problema da exposição às intempéries.



Fonte: Autora (2020).

Também ocorre desgaste externo e interno devido ao próprio uso das formas na obra e contato com o concreto, conforme indicado na Figura 42. No caso do desgaste interno, este pode ser agravado caso o desmoldante não seja aplicado devidamente antes da montagem.

Figura 42 - Problemas de desgaste devido ao uso.



Fonte: Autora (2020).

Com relação a etapa de montagem, em algumas formas havia números indicando a sequência e descrição do cômodo onde seriam instaladas, contudo, a **lógica da ordem nem sempre era obedecida pelos trabalhadores**, conforme indicado na Figura 43. Além disso, com o passar do tempo a tinta começa a se desgastar ou fica coberta por concreto, dificultando ou impossibilitando a leitura dos números. Uma consequência da montagem incorreta é que as furações na peça que encaixa as placas das paredes e das lajes, previamente definidas no galpão, são perdidas e precisam ser refeitas, o que consiste em retrabalho e atraso.

Figura 43 - Problemas com a montagem das formas em sequência incorreta.



Fonte: Autora (2020).

Um dos maiores potenciais de **danos à integridade das formas** está **na etapa da sua retirada**, principalmente das lajes. As formas sofrem pancadas durante a tentativa dos trabalhadores de remover os pinos, cunhas, faquetas e as próprias placas no espaço de tempo

mais curto possível. Já no caso das lajes, para retirar as formas é preciso primeiro remover os escoramentos. Mas a retirada nesta obra acontecia de modo inadequado, sem que fosse colocado um anteparo para evitar a queda livre das placas. A queda livre pode danificar as formas, causar prejuízo auditivo aos trabalhadores e gerar impactos à toda a estrutura da edificação. A Figura 44 indica exemplos de danos em componentes das formas e ilustra a situação de queda livre de uma placa.

Figura 44 - Problemas em componentes das placas e ilustração da retirada das placas das lajes.



Fonte: Autora (2020).

Por fim, observou-se ainda um problema referente aos desvios, ou **possíveis furtos de algumas formas**. Para tentar solucionar este problema, todas as formas desta obra iriam começar a ser pintadas de vermelho, em uma tentativa de identificar mais facilmente esses elementos como propriedade da Empresa A e inibir os desvios. Porém, com o passar do tempo, a tinta se desgasta. A Figura 45 indica algumas formas que já estavam pintadas.

Figura 45 - Problemas com desvios de formas.



Fonte: Autora (2020).

O Quadro 16 apresenta o resumo dos principais problemas encontrados e relaciona esses problemas às etapas do mapeamento de processo do sistema construtivo de paredes de concreto (Figura 39 apresentada), especificamente referente às formas metálicas.

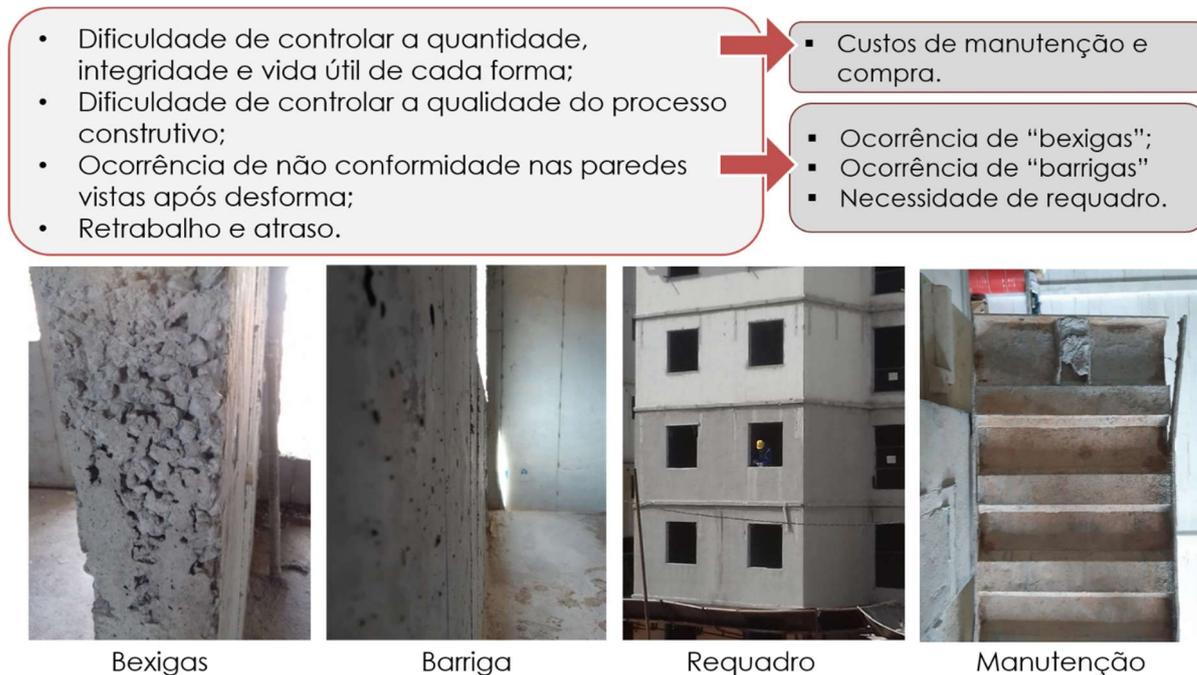
Quadro 16 - Problemas encontrados nas etapas do mapeamento do processo.

Itens relacionados às formas	Problemas Encontrados
(1) a (9) Etapas do galpão	<ul style="list-style-type: none"> • Não existe registro das formas que estão no galpão e suas dimensões; • Não existe controle das formas que vão para a obra; • A adaptação não é feita com base no projeto de formas, mas sim no projeto estrutural; • Não existe um registro de manutenções e ajustes realizados; • Não existe um procedimento formal de controle da qualidade da manutenção.
(10) Transporte externo das formas	<ul style="list-style-type: none"> • Formas sujeitas à danos durante transporte e descarga.
(11) Armazenamento das formas na obra	<ul style="list-style-type: none"> • Exposição a intempéries no armazenamento.
(18) Aplicação de desmoldante nas formas	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste externo e interno devido ao uso.
(19) Montagem das formas da parede	<ul style="list-style-type: none"> • Formas mal posicionadas ou em sequência incorreta.
(20) Montagem das formas da laje	<ul style="list-style-type: none"> • Formas mal posicionadas ou em sequência incorreta.
(22) Retirada das formas	<ul style="list-style-type: none"> • Formas sujeitas à danos por retirada inadequada, principalmente das lajes.
(24) e (25) Transporte interno manual ou com maquinário	<ul style="list-style-type: none"> • Formas sujeitas à danos durante transporte e descarga.

Fonte: Autora (2020).

A Figura 46 indica os principais impactos negativos que os problemas identificados podem gerar na obra e para a Empresa. Um deles é em termos de custos gerados pela manutenção das formas e pela compra de novos componentes ou de placas completas, já que existe um comprometimento da integridade e vida útil das formas. Além disso, a dificuldade de controlar a qualidade do processo pode gerar não conformidades nas paredes após a remoção das formas, como bicheiras, barrigas e necessidade de requadros nas aberturas.

Figura 46 - Possíveis consequências dos problemas identificados.



Fonte: Autora (2020).

A partir das observações e entrevistas feitas em campo e no galpão, foram listados os principais tipos de defeitos que as formas podem apresentar e os tipos de manutenção que podem ser realizadas. Segundo os soldadores, as peças danificadas precisam ser trocadas por causa da dificuldade de retificar o alumínio. Em seguida estão listados os principais defeitos identificados referentes às formas:

- Espelho amassado;
- Espelho quebrado;
- Espelho perfurado;
- Costela amassada;
- Costela quebrada;
- Costela perfurada;
- Aba amassada;
- Aba quebrada;
- Desgaste interno;
- Desgaste externo;
- Perfuração incorreta.

Em seguida estão listados os principais tipos de manutenções identificados sobre as formas:

- Limpeza comum;
- Limpeza mecânica;
- Troca de aba;
- Troca de espelho;
- Troca de costela;
- Nova perfuração;
- Pintura.

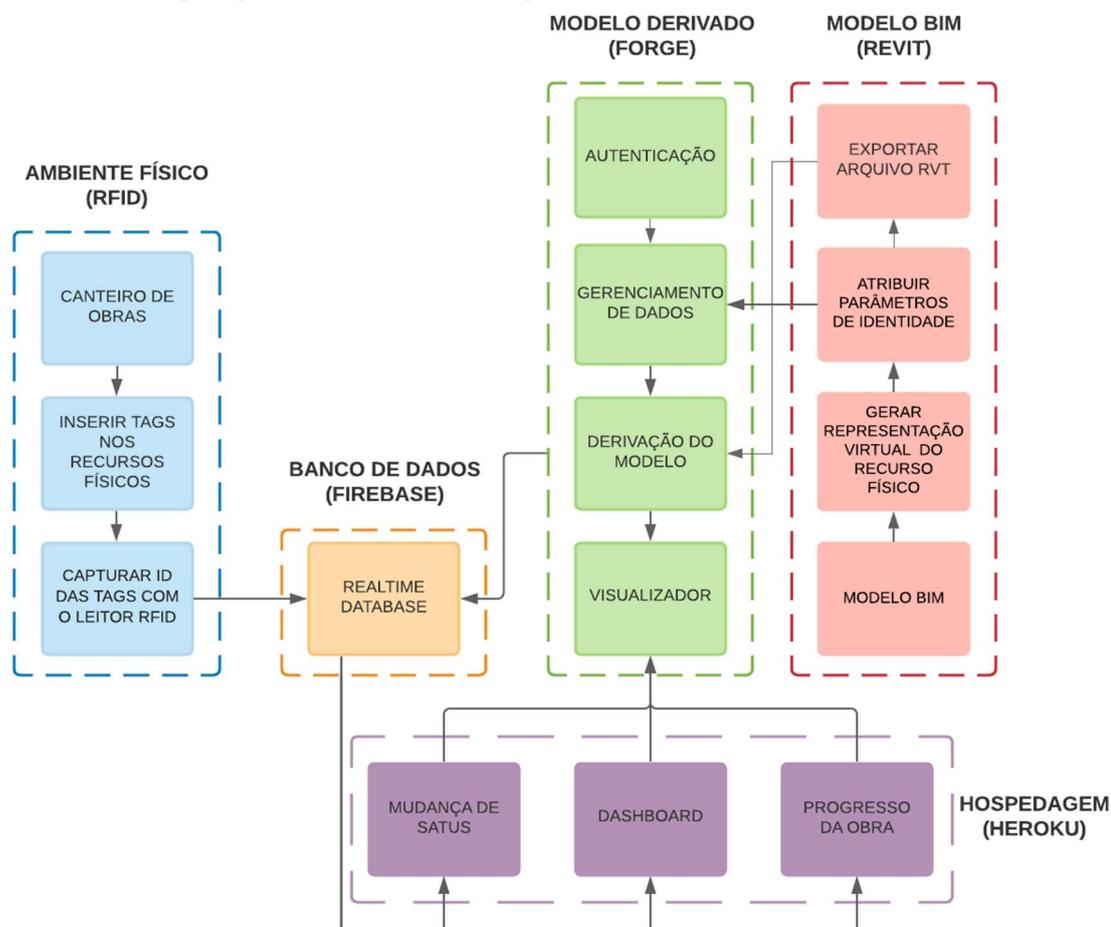
5.2 RESULTADOS DA FASE DE DESENVOLVIMENTO

O sistema integrado contempla o desenvolvimento do Gêmeo Digital, com a preparação do modelo BIM e do modelo derivado no Forge, a hospedagem na Web e a estruturação do banco de dados. O sistema integrado contempla também o desenvolvimento do aplicativo para dispositivos móveis que utilizam o sistema operacional Android. O aplicativo, que foi chamado de Smart Twins 4.0, inclui a interface de acesso para os usuários. Os estudos de campo realizados após o desenvolvimento do aplicativo tiveram como resultado os testes práticos dos equipamentos e do sistema, bem como a implementação piloto. Ressalta-se que todo o desenvolvimento foi realizado em nível de protótipo funcional e que uma versão final demandaria pequenos ajustes e inclusão de regras de segurança.

5.2.1 Estrutura do Gêmeo Digital

A Figura 47 indica a estrutura geral seguida para desenvolver o Gêmeo Digital do presente estudo. O ambiente físico do canteiro de obras foi caracterizado na Seção 5.1. Os demais campos serão discutidos em seguida.

Figura 47 - Estrutura geral para criação do Gêmeo Digital.

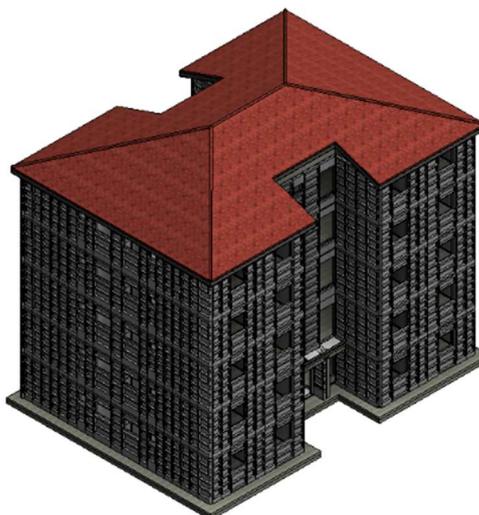


Fonte: Autora (2020).

5.2.2 Modelo BIM

O modelo BIM completo referente a um bloco da obra foi disponibilizado pela Empresa X. Este modelo foi desenvolvido no Revit e salvo em formato RVT. A partir do modelo original, foi realizado o seguinte processo: (a) gerar representação virtual do recurso físico, ou seja, criar e posicionar as formas virtuais no modelo e (b) atribuição dos parâmetros de identidade necessários ao projeto. O procedimento utilizado para criar a família de formas metálicas está descrito no **Apêndice 4**. O modelo BIM com as formas está indicado na Figura 48.

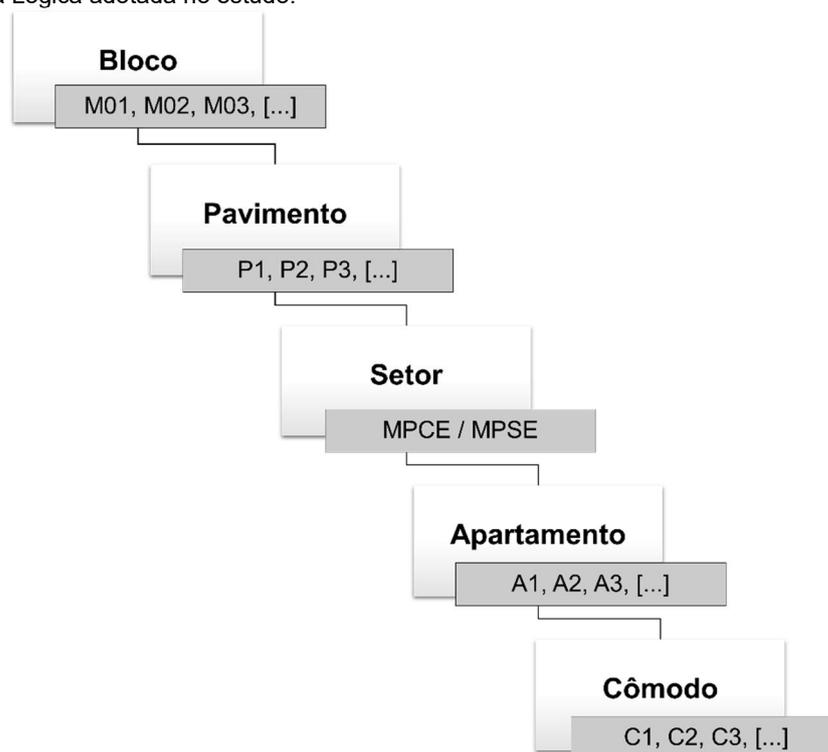
Figura 48 - Modelo BIM no Revit com as formas.



Fonte: Autora (2020).

O primeiro tipo de parâmetro de identidade inserido no projeto foi chamado de “Agrupamento” e teve como objetivo agrupar os elementos virtuais em seus respectivos pavimentos, setores e cômodos do bloco. Um código foi criado para este fim, com base na estrutura lógica utilizada pela Empresa X em sua FVS. A primeira parte do código indica o número do bloco, chamado também de módulo (por exemplo, M01 representa o primeiro bloco ou módulo da obra). A segunda parte do código indica o número do respectivo pavimento. A terceira parte do código indica a qual dos dois setores pertence o elemento, ou seja, se pertencem ao lado MPCE com escada ou ao lado MPSE sem escada do pavimento. A quarta parte do código indica o número do apartamento dentro do pavimento, sendo quatro por pavimento nesta obra. Por último, indica-se o número do cômodo dentro de cada pavimento. A estrutura lógica completa está indicada em seguida na Figura 49:

Figura 49 – Estrutura Lógica adotada no estudo.



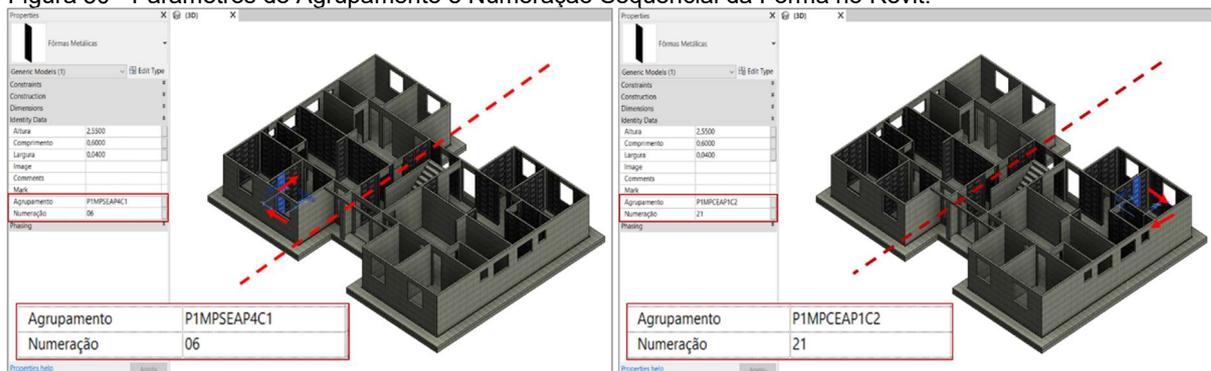
Fonte: Autora (2021).

Por exemplo, o código M01P1MPCEA1C1 indica o módulo 01, primeiro pavimento, meio pavimento com escada, primeiro apartamento e primeiro cômodo. Deverá ser definido previamente, na planta baixa de cada empreendimento, a ordem de numeração dos apartamentos e a ordem de numeração dos cômodos. As formas metálicas desenhadas no modelo recebem o código incluindo a nomenclatura de pavimento, setor, apartamento e cômodo (por exemplo, P1MPCEA1C1), sendo que a nomenclatura referente ao módulo é atribuída depois, no modelo derivado. Os demais elementos do modelo, que não são formas metálicas, recebem o código incluindo apenas a nomenclatura referente ao pavimento e ao setor em que se encontram (por exemplo, P1MPCE).

O segundo tipo de parâmetro de identidade criado foi chamado de “Numeração Sequencial da Forma” e teve como objetivo identificar cada forma no modelo com um número conforme a sua posição, respeitando a divisão por meio pavimento e considerando os cômodos. Deste modo, as formas receberam uma numeração sequencial (1, 2, 3 e etc.) seguindo o sentido anti-horário pré-determinado e indicado na Figura 36 da seção 4.5.2. A sequência é reiniciada em cada novo cômodo.

A Figura 50 indica os referidos parâmetros, enquanto que o procedimento seguido está detalhado no **Apêndice 4**. Por fim, o modelo BIM é exportado para o Forge gerando o modelo derivado, que será apresentado na próxima seção.

Figura 50 - Parâmetros de Agrupamento e Numeração Sequencial da Forma no Revit.



Fonte: Autora (2020).

5.2.3 Modelo Derivado

O desenvolvimento do modelo derivado envolveu a utilização das APIs e extensões nativas do Ecossistema Digital do Forge e o desenvolvimento de extensões adicionais baseadas nas demandas deste estudo. Para gerar a aplicação completa, foram seguidos tutoriais disponíveis no site da Autodesk. Toda a programação foi feita na linguagem JavaScript (Node.js), com algumas implementações em HTML para colocação do modelo na Web. As configurações iniciais para gerar uma aplicação no Forge estão descritas no **Apêndice 5**. Entre as APIs do Forge, apresentadas na Seção 2.4.6, quatro foram utilizadas no presente estudo, conforme será descrito em seguida:

Autenticação: o Forge utiliza o protocolo OAuth2. Esta API foi empregada nos processos de autenticação entre o cliente (aplicação) e o servidor. Nas primeiras aplicações desenvolvidas observou-se que o modelo desaparecia da visualização após algum tempo porque o prazo de autenticação da chave de acesso, chamada de *token*, expirava. Para solucionar esse problema, a variável “*persistent*” relacionada ao *token* foi configurada, conforme indicado no **Apêndice 5**.

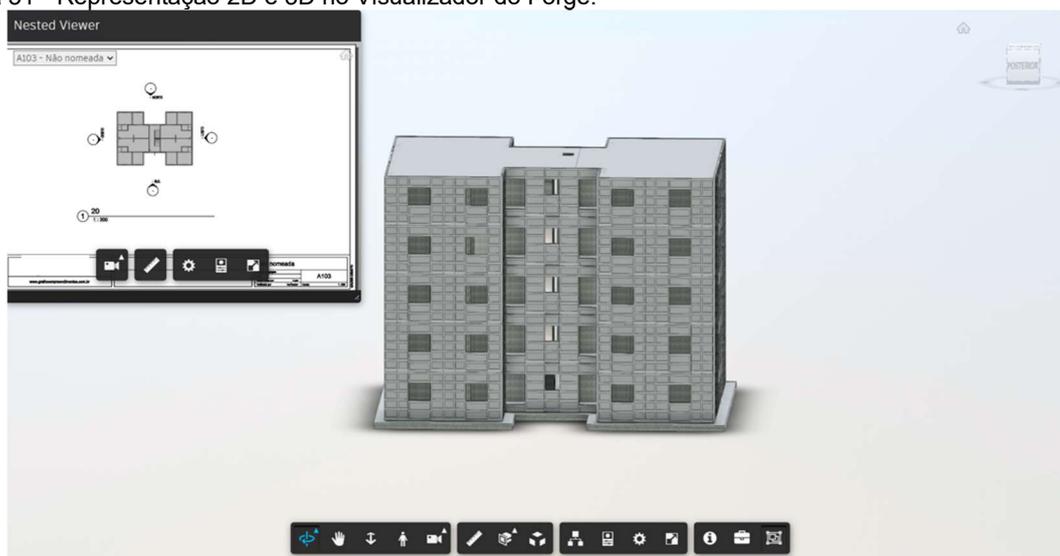
Gerenciamento de Dados: esta API foi responsável por armazenar e gerenciar os arquivos do aplicativo na plataforma Forge através de contêineres (arquivos recipientes que contém outros arquivos) denominados na plataforma como “*Buckets*”, que estão associados à Nuvem da Autodesk. A criação de um novo *Bucket* foi a primeira ação necessária para fazer o upload do arquivo com extensão RVT no Forge, conforme indicado no **Apêndice 5**.

Derivação do Modelo: esta API foi utilizada para traduzir o formato RVT para o formato SVF, que é o formato final do modelo derivado. O processo inclui a extração dos metadados originais e mantém a hierarquia de objetos e propriedades provenientes do Revit como, por exemplo, materiais, densidade, volume e os parâmetros de Agrupamento e Numeração Sequencial inseridos. Durante o desenvolvimento da aplicação foi observado que ocorriam atra-

tos e erros quando os arquivos RVT eram muito grandes. Por isso foi implementado um aumento do limite originalmente aceito do tamanho do modelo de 50 MB para 100 MB, conforme indicado no **Apêndice 5**, fazendo com que o modelo demorasse apenas alguns segundos para carregar.

Visualizador: esta API é uma biblioteca JavaScript baseada em WebGL para renderizar modelos 2D e 3D, conectada diretamente à API de Derivação do Modelo. Ela foi utilizada para a efetiva visualização gráfica do modelo derivado e de suas informações associadas. Ela também foi utilizada no desenvolvimento de extensões e funções para customizar a visualização conforme as demandas deste estudo. Para habilitar a Visualização é preciso utilizar o identificador único do modelo, que é denominado de *Uniform Resource Name* (URN), conforme indicado no **Apêndice 5**. A Figura 51 indica a visualização tridimensional local do modelo derivado, além de um exemplo de outras representações bidimensionais que podem ser configuradas para visualizar o projeto, essa em formato de planta-baixa.

Figura 51 - Representação 2D e 3D no Visualizador do Forge.



Fonte: Autora (2020).

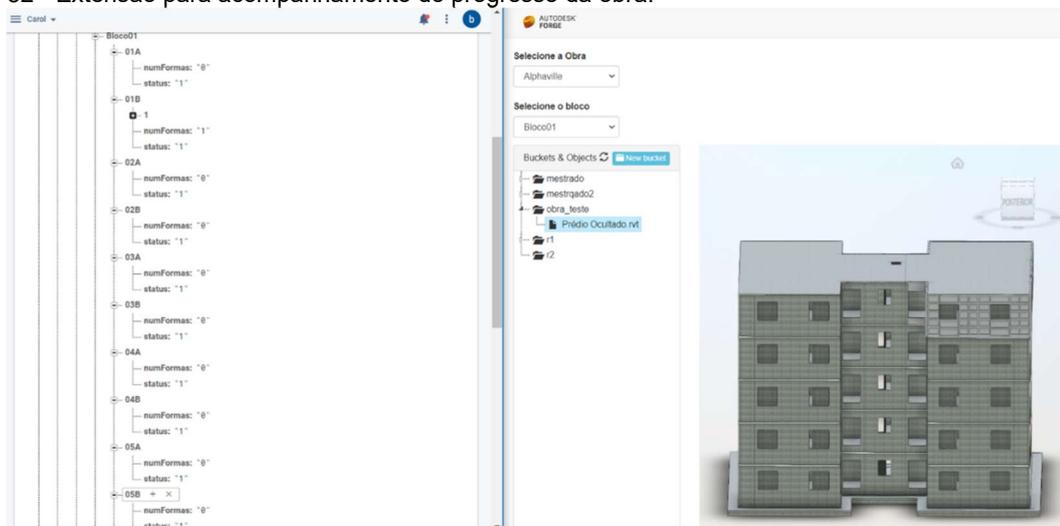
Desta forma, o modelo RVT foi carregado na Nuvem da Autodesk, onde passou a ser gerenciado pela API de Gerenciamento de Dados. Em seguida, através da API de Derivação do Modelo, foi feita a tradução do modelo para o formato SVF, considerando que o processo de renderização do Visualizador só aceita esse tipo de arquivo. O Visualizador é o produto final do Forge, através do qual é possível acessar a visualização em 2D e 3D localmente ou na Web, além das informações extraídas na API de Derivação do Modelo. Inicialmente, a aplicação só era executada localmente no navegador. Nas próximas seções serão apresentadas as três rotinas desenvolvidas no Forge para atender às demandas desse estudo.

5.2.3.1 Acompanhamento de Progresso da Obra

A primeira função desenvolvida foi a de visualização e acompanhamento do progresso da obra *online*, que tem como objetivo mostrar pavimentos finalizados e em construção, ocultando-se as demais partes da obra. Esta função só é possível devido ao cadastro de cada meio pavimento em campo, que acontece automaticamente mediante a leitura das tags com o leitor RFID. No banco de dados, o parâmetro de Agrupamento vinculado a cada setor representa a ocultação ou visualização dos elementos. Inicialmente, só a fundação é exibida no modelo derivado. À medida que novas unidades de meio pavimento são cadastradas, ou seja, à medida que se inicia a montagem de formas no setor, todos os elementos do setor em questão serão mostrados.

Na obra existe apenas um jogo de formas por edifício e cada elemento não pode estar em dois setores ao mesmo tempo. Ou seja, quando o próximo setor for lido e cadastrado, as formas do setor anterior são ocultadas, mostrando-se apenas as paredes acabadas. A Figura 52 indica o banco de dados e o modelo no Forge, com as formas do meio pavimento sem escada do último pavimento.

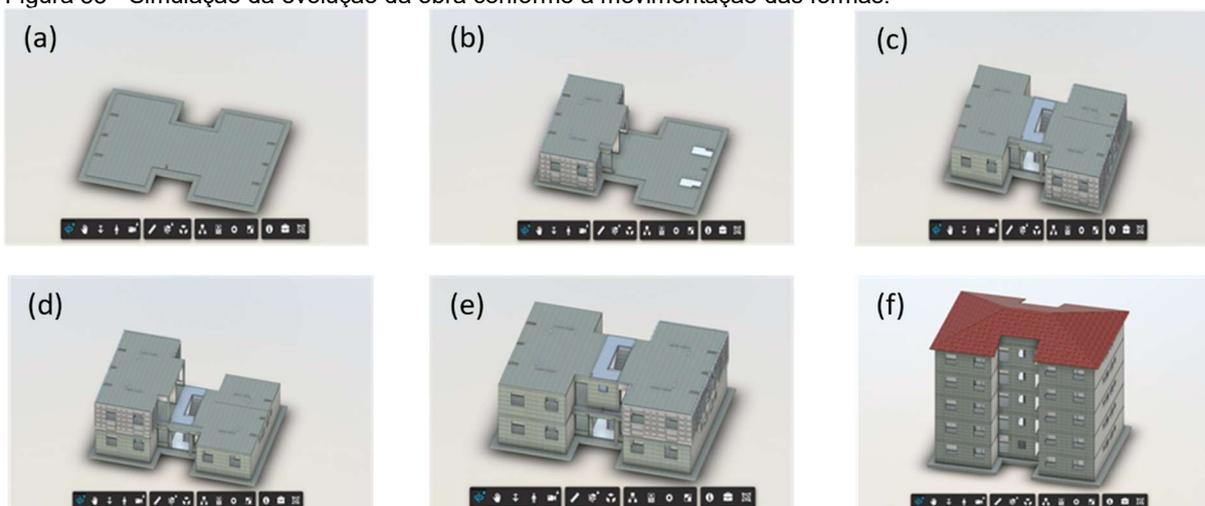
Figura 52 - Extensão para acompanhamento do progresso da obra.



Fonte: Autora (2020).

A Figura 53 a seguir representa a simulação da evolução da obra por meio da leitura das formas montadas no canteiro de obras. As imagens da sequência indicam: (a) a fase inicial da construção, com as fundações; (b) a fase de construção do meio pavimento sem escada; (c) a fase de construção do próximo meio pavimento com escada, e conclusão do anterior; (d) a fase de construção do meio pavimento sem escada do segundo pavimento e a conclusão do primeiro pavimento; (e) a fase de construção do meio pavimento com escada do terceiro pavimento e a conclusão do meio pavimento anterior; e (f) o bloco concluído, com todos os pavimentos.

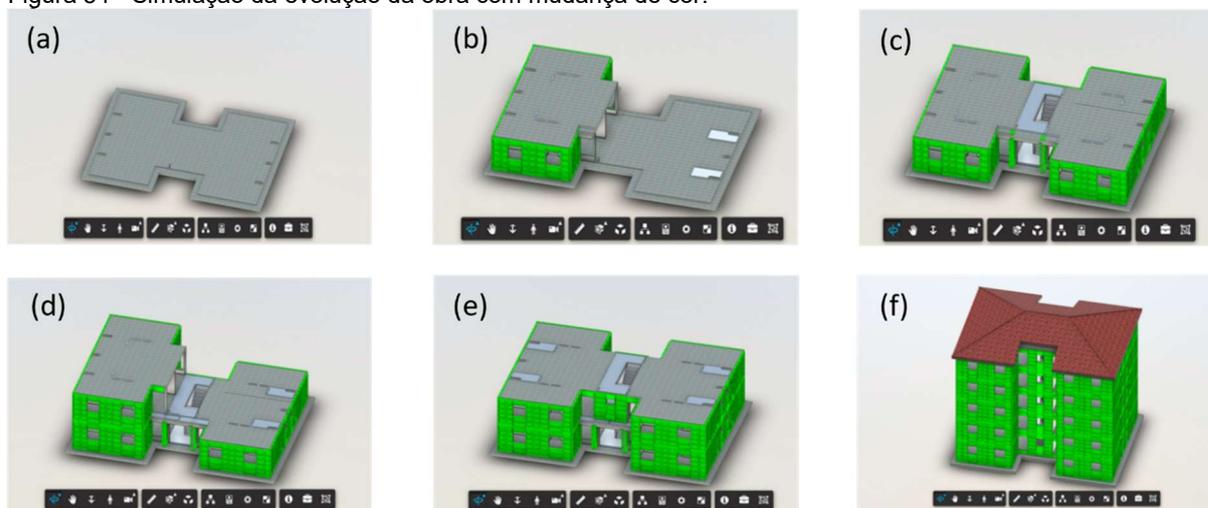
Figura 53 - Simulação da evolução da obra conforme a movimentação das formas.



Fonte: Autora (2020).

Uma outra possibilidade de visualizar a simulação que foi implementada nesta extensão é através de uma mudança de cor nos meio pavimentos construídos, conforme Figura 54. Essa opção foi preterida em relação à anterior, que consegue mostrar de maneira mais realista a movimentação das formas, mas está sendo mostrada porque pode ser utilizada em outros estudos.

Figura 54 - Simulação da evolução da obra com mudança de cor.



Fonte: Autora (2020).

A seguir, apresenta-se a lógica de programação utilizada para esta rotina de Acompanhamento do Progresso da Obra.

- Carregar o Visualizador;
- Obter o parâmetro Agrupamento, por varredura no banco de dados, de cada meio pavimento construído;
- Obter parâmetros de identidade (Agrupamento e Numeração Sequencial da Forma), por varredura, de cada elemento modelo;

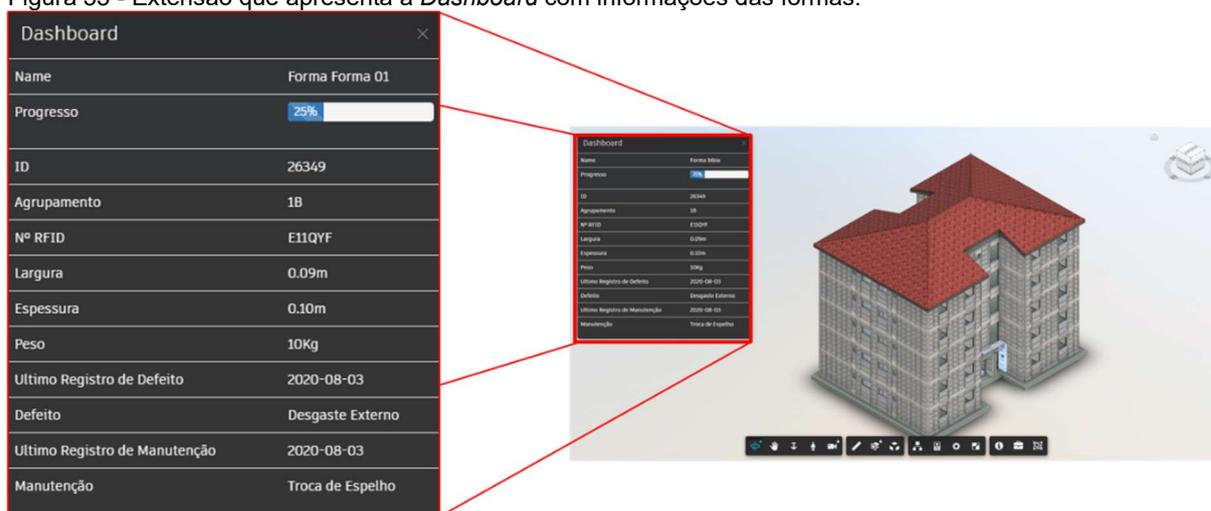
- Se houver Agrupamento e Numeração Sequencial da Forma, então o elemento é forma, logo:
 - Se o agrupamento da forma for igual ao último Agrupamento obtido no banco de dados, então exibir
 - Se não for igual, então ocultar
 - Se houver somente Agrupamento, então é piso e parede, logo:
 - Se o agrupamento do item for igual a qualquer Agrupamento obtido no banco de dados, então exibir
 - Se não for igual, então ocultar
- Exibir Fundação;
 - FIM.

Algoritmo textual (Dashboard das formas):

5.2.3.2 **Dashboard das Formas**

A segunda função desenvolvida é o *Dashboard* das formas, na Figura 55, onde informações de interesse da forma são exibidas mediante a seleção (clique) do elemento. Essas informações são extraídas do banco de dados, em conformidade com o que é cadastrado no aplicativo. As informações referem-se às características do item (número da *tag*, data de instalação, largura, espessura, peso, etc.), último defeito registrado (data de registro do defeito e descrição do defeito) e última manutenção registrada (data de conclusão do reparo e tipo de reparo). Ao selecionar o item, são extraídos e exibidos também os parâmetros de Agrupamento e Numeração Sequencial da Forma, além do progresso da construção do edifício.

Figura 55 - Extensão que apresenta a *Dashboard* com informações das formas.



Fonte: Autora (2020).

A seguir, apresenta-se a lógica de programação utilizada para esta rotina de Dashboard das Formas.

- Selecionar item (dbID);
- Obter as propriedades do elemento selecionado no modelo (Agrupamento e Numeração Sequencial da Forma);
- Obter o ID RFID referente ao Agrupamento e Numeração Sequencial da Forma no Firebase;
- Obter as características do ID RFID no Firebase;
- Obter o progresso da obra no Firebase;
- Exibir Dashboard;
- FIM.

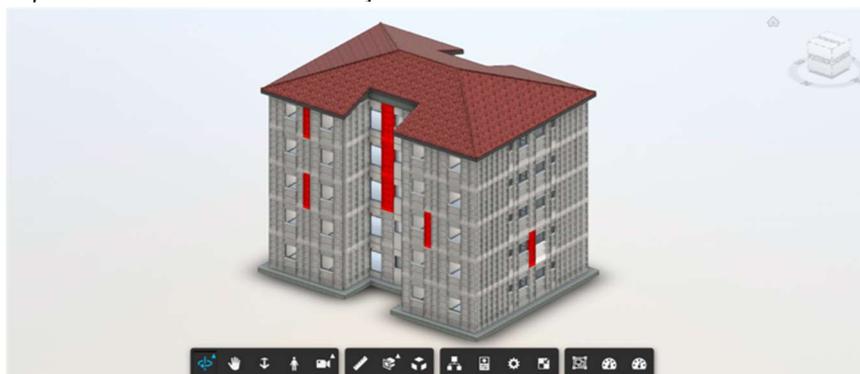
5.2.3.3 Visualização do Estado de Manutenção

A última função desenvolvida é uma opção de visualização, ilustrada na Figura 56, que mostra o estado da manutenção das formas no projeto completo. Ao carregar a ferramenta, verifica-se quais elementos do modelo são referentes às formas. Mediante solicitação, o banco de dados busca informações sobre pavimento, setor e numeração das formas.

Com estes dados é realizada uma pesquisa de *tag* correspondente e são verificados os seguintes itens: a) se a forma não possui registro de defeitos e manutenções no banco de dados, sua cor não muda, b) caso contrário, sua cor muda para vermelho ou verde. A cor vermelha representa que o elemento estava com defeito registrado e até a instalação da parede não houve manutenção. Se estiver verde, significa que a forma foi instalada após a realização de um reparo na manutenção. Essa análise ocorre comparando automaticamente o histórico mais recente de defeitos e a última manutenção registrada no banco de dados.

A função desenvolvida pode ajudar a equipe de manutenção a identificar remotamente quais são as formas que estão com defeitos cadastrados e que ainda precisam ser reparadas. Além disso, pode ajudar o responsável pela inspeção de qualidade a identificar quais são as paredes que foram geradas por formas que estavam danificadas.

Figura 56 - Extensão que exhibe o estado de manutenção das formas.



Fonte: Autora (2020).

A seguir, apresenta-se a lógica de programação utilizada para esta rotina de Visualização do Estado de Manutenção.

- Obter parâmetros de identidade (Agrupamento e Numeração Sequencial da Forma), por varredura, de cada elemento no modelo;
 - Se houver Agrupamento e Numeração Sequencial da Forma, então o elemento é forma, logo:
 - Pesquisar o ID RFID e a data de leitura referente ao Agrupamento e Numeração Sequencial da Forma no Firebase;
 - Se não houver ID RFID cadastrado, então não altera cor;
 - Se houver, então pesquisar defeito no Firebase, com data menor que a de leitura daquele Agrupamento;
 - Se não houver defeito, então não altera cor;
 - Se houver, então pesquisar manutenção no Firebase;
 - Se foi realizada manutenção, então altera cor para verde;
 - Se não, altera cor para vermelho.
- FIM.

5.2.4 Hospedagem

Para que a visualização do modelo derivado fosse incorporada à Web, foi utilizado o serviço de hospedagem do Heroku, que permitiu a publicação gratuita do que foi desenvolvido com o Forge. O modelo está atualmente disponível no endereço <smarttwins4.herokuapp>. A Figura 57 indica o modelo na Web e o layout que foi elaborado para a página para facilitar a seleção da obra e do módulo de interesse, entre as opções cadastradas no sistema.

Figura 57 - Modelo derivado hospedado na Web através do Heroku.

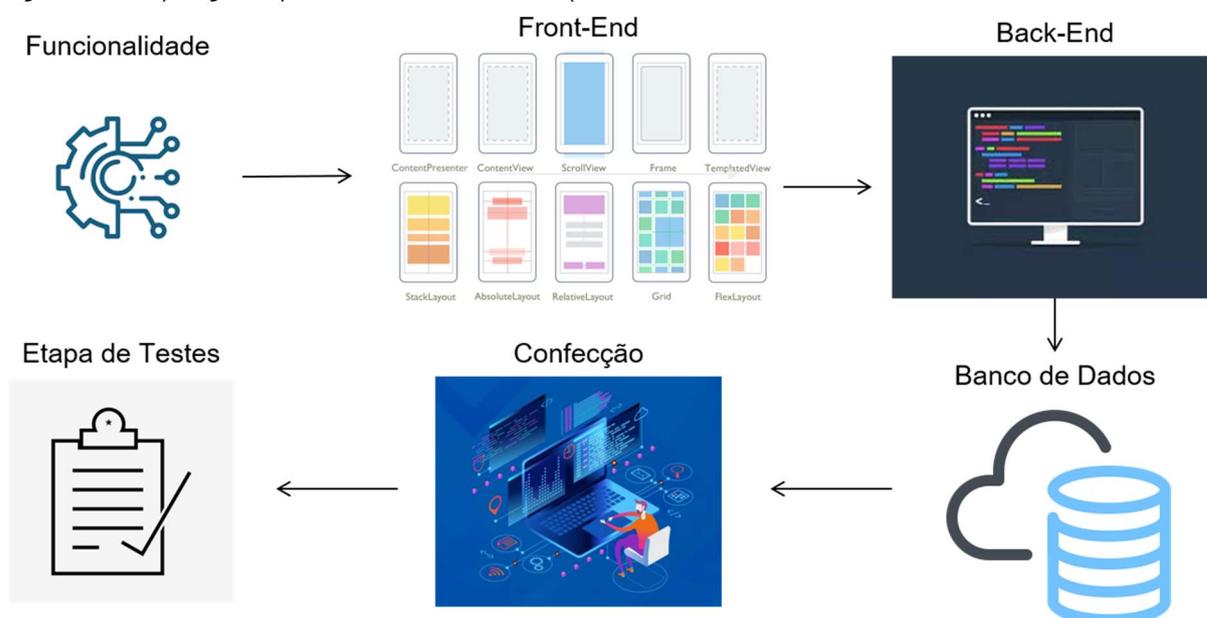


Fonte: Autora (2021).

5.2.5 Estrutura do Aplicativo

O aplicativo Smart Twins 4.0 foi desenvolvido para concentrar as funcionalidades de controle da quantidade de formas, controle dos defeitos das formas e controle de manutenções das formas, além de receber o Gêmeo Digital e de apoiar no controle da qualidade das paredes. Um módulo especial precisou ser desenvolvido para apoiar nas capturas de sequência de montagem no galpão e no campo. Os requisitos adotados para o desenvolvimento do aplicativo foram baseados no diagnóstico da fase de sugestão, tendo em vista atender aos critérios de funcionalidade, transparência, utilidade e usabilidade e experiência do usuário. A Figura 58 indica as etapas gerais que foram seguidas, partindo da definição das funcionalidades conforme as demandas do estudo.

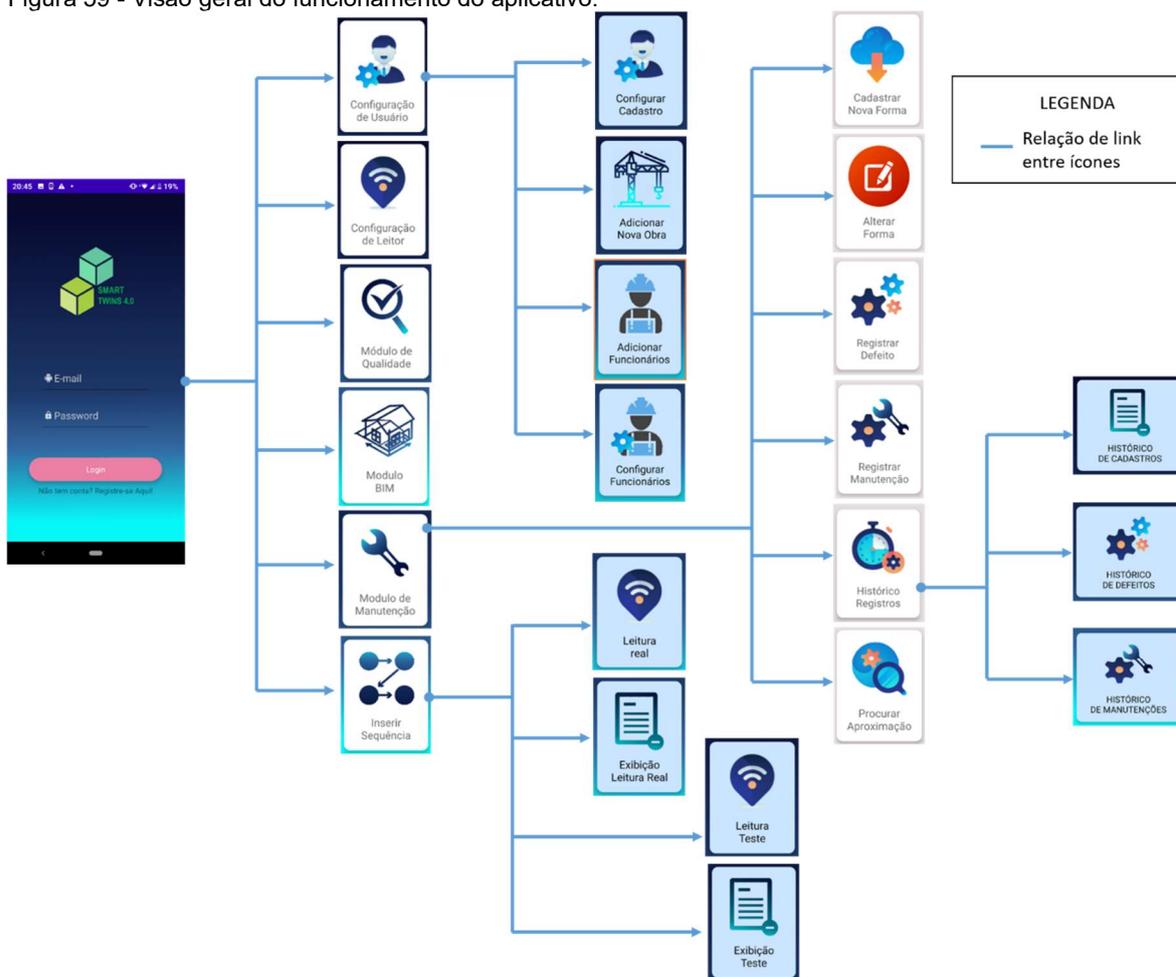
Figura 58 - Etapas gerais para desenvolvimento do aplicativo.



Fonte: GETEC (2021).

Na etapa de *Front-End* toda a interface com o usuário foi definida, incluindo a identidade visual do aplicativo, o desenvolvimento da logomarca e a distribuição gráfica de elementos como ícones e textos. As telas foram previamente desenhadas e discutidas antes de serem criadas no GIMP. Na etapa de *Back-End*, toda a programação necessária para o funcionamento do aplicativo foi desenvolvida no Android Studio, incluindo rotinas para habilitar as funcionalidades, *links* dos botões e conexão com o Banco de Dados Firebase Realtime. *Front-End* e *Back-End* juntos culminaram na confecção do aplicativo e na posterior etapa de testes para verificação e correção de falhas. Os testes foram feitos em laboratório e em campo. Na Figura 59, o aplicativo é apresentado do ponto de vista das relações de link entre os botões principais.

Figura 59 - Visão geral do funcionamento do aplicativo.



Fonte: Autora (2021).

A partir do *log-in*, feito na tela inicial, o usuário é capaz de acessar os seguintes botões: Configurações de Usuário, Configurações de Leitor, Módulo de Qualidade, Módulo BIM, Módulo de Manutenção e Módulo de Inserir Sequência.

- **Configuração de Usuário** é possível acessar os seguintes botões: Configurar Cadastro, Adicionar Nova Obra, Adicionar Funcionários e Configurar Funcionários.
- **Módulo de Manutenção** é possível acessar os seguintes botões: Cadastrar Nova Forma, Alterar Forma, Registrar Defeito, Registrar Manutenção, Histórico Registro e Procurar Aproximação.
- **Histórico de Registro**, por sua vez, é possível acessar o Histórico de Cadastros, Histórico de Defeitos e o Histórico de Manutenções.
- **Inserir Sequência** é possível fazer uma Leitura Teste e uma Exibição da Leitura Teste, que são as leituras de referência, ou uma Leitura Real e uma Exibição da Leitura Real, que são feitas a cada novo meio pavimento executado.

O sistema começou a ser construído a partir do Módulo de Manutenção e do Módulo BIM. Porém, logo surgiu a necessidade de desenvolver o módulo de Configuração do Usuário para lidar com os dados das pessoas que vão utilizar o sistema. Uma das opções habilitadas além cadastro e alteração de dados básicos, como nome e e-mail, é inserir uma imagem que esteja armazenada no dispositivo móvel. Também surgiu a necessidade de desenvolver um módulo específico para Configuração do Leitor, no qual é possível parear o dispositivo móvel com o leitor RFID, configurar a faixa de frequência, a distância de leitura e testar o funcionamento do leitor.

Para atender uma demanda observada em campo, foi criado o módulo de Inserir Sequência para capturar a sequência real de montagem das formas e compará-la com uma sequência de referência. O Gêmeo Digital está contido no Módulo BIM, a partir do qual é possível utilizar o modelo Web e as funções que foram desenvolvidas. No Módulo de Manutenção, em Cadastrar Nova Forma, Alterar Forma, Registrar Defeito e Registrar Manutenção, as informações necessárias precisam ser inseridas pelo usuário mediante o uso do aplicativo. A maioria dos módulos funciona de maneira *off-line*, com armazenamento local provisório dos dados no dispositivo móvel, ou *online*, mediante disponibilidade de Internet e sincronização com o bando de dados principal no Firebase.

Por último, foi desenvolvido o Módulo de Qualidade, que auxilia na captura de imagens das paredes e a sua associação às imagens de defeitos das respectivas formas geradoras, quando existem defeitos cadastrados. Todos os módulos possuem integração entre si e compartilhamento dos dados coletados. O aplicativo passou por diversos ciclos de testes e ajustes em laboratório antes de ser levado para a obra. Uma vez apresentada essa visão geral, no **Apêndice 7** o aplicativo é apresentado do ponto de vista da descrição do seu Front-End (interface), com descrição tela a tela das suas funções, em formato de manual do usuário.

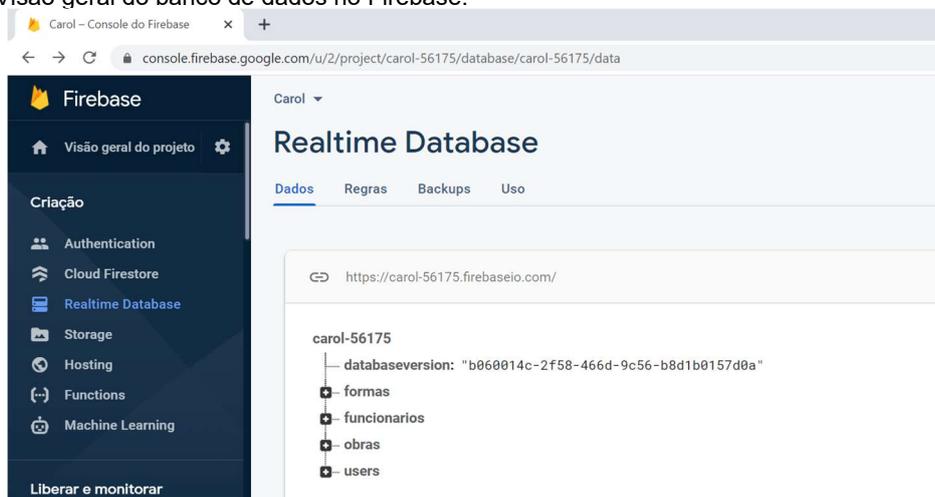
5.2.6 Banco de Dados

Para determinar a melhor estrutura a ser utilizada no projeto para o banco de dados principal, foram realizados testes preliminares com o Firebase e o SQL Server 2017. O SQL Server é um banco de dados relacional. Conforme percepção da pesquisadora durante os testes preliminares de uso, que não tiveram critérios pré-determinados, o Firebase apresentou um melhor desempenho em termos de velocidade de busca das informações e interoperabilidade com o modelo BIM.

Por isso, o Firebase foi escolhido como banco de dados principal do presente estudo, em detrimento a um banco não relacional. O mesmo banco de dados foi utilizado de maneira compartilhada pelas rotinas do Gêmeo Digital e pelo aplicativo Smart Twins 4.0. A Figura 60

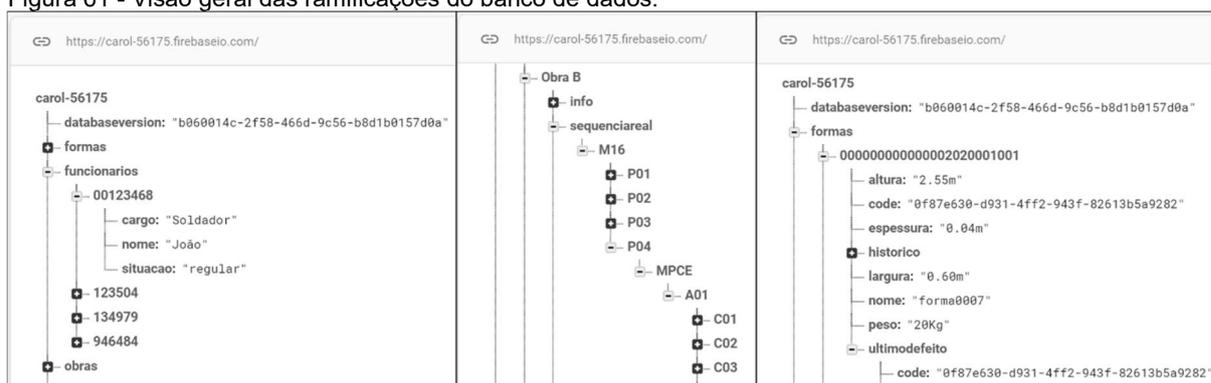
indica uma visão geral da árvore da estrutura dos dados e a Figura 61 indica a exibição de algumas das ramificações.

Figura 60 - Visão geral do banco de dados no Firebase.



Fonte: Autora (2020).

Figura 61 - Visão geral das ramificações do banco de dados.



Fonte: Autora (2020).

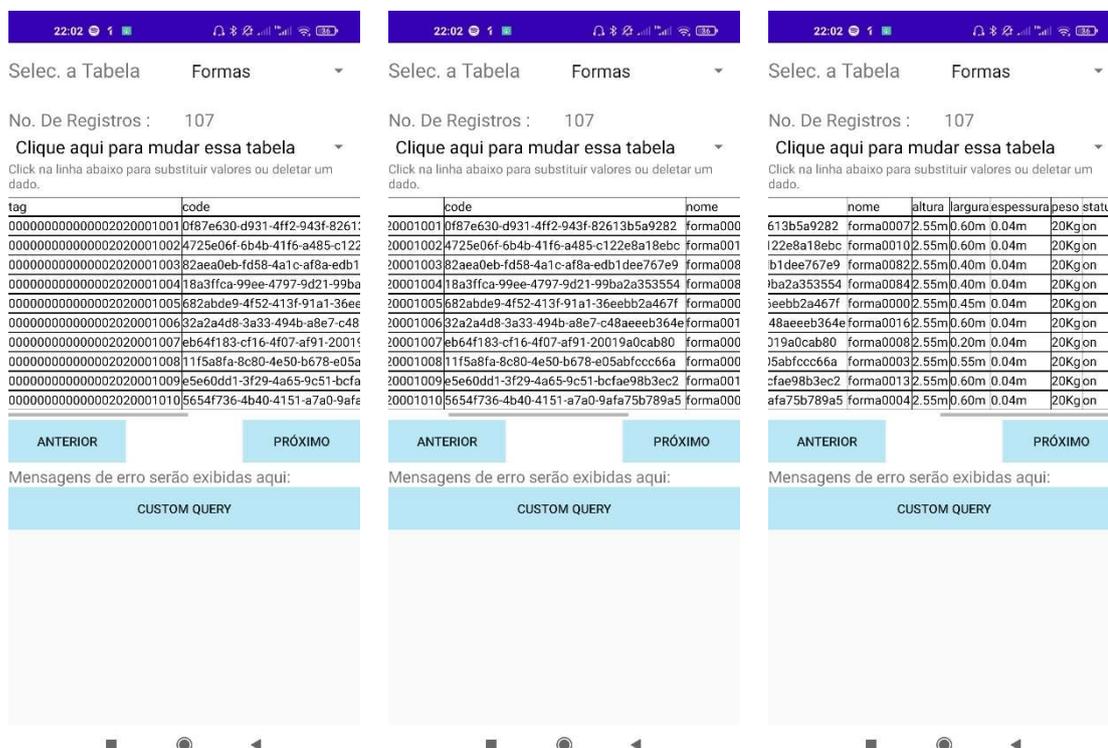
Ainda na etapa de testes do aplicativo em laboratório, antes dos testes em campo, a pesquisadora foi informada de que na Obra C havia muita dificuldade de sinal de Internet. Para não comprometer o estudo, as funções relacionadas à Configuração de Leitor, Módulo de Manutenção, Módulo de Inserir Sequência e Módulo de Qualidade foram adaptados para serem utilizados *off-line*, com o dispositivo móvel sendo utilizado com a mesma lógica de um gateway inteligente. O Módulo BIM foi mantido com funcionamento apenas online, assim como a função de *log-in* no aplicativo.

A adaptação das funções para serem utilizadas *off-line* ocorreu da seguinte maneira: um banco de dados local estruturado foi desenvolvido a partir de uma biblioteca do próprio Android Studio. As solicitações diretas do Firebase foram removidas no aplicativo, de modo que qualquer mudança de dados fica salva primeiro no banco de dados local. Uma função verifica se houve alguma mudança de dados nesse banco. Em caso positivo, os dados que foram alterados ou adicionados são enviados para o Firebase.

Desta forma, o sistema garante a sua funcionalidade mesmo sem conexão ou com conexão fraca. Porém, uma dificuldade era a possibilidade de perda da capacidade do sistema de ser utilizado por mais de um usuário ao mesmo tempo, já que um segundo usuário não conseguiria obter os dados produzidos pelo primeiro usuário no banco local. Para corrigir este problema, há uma dupla verificação, na qual primeiro verifica-se se Firebase teve alguma alteração e, caso haja, o próprio sistema se encarrega de sincronizar esses novos dados no banco de dados local. Do ponto de vista dos dados, o banco local é uma réplica do Firebase em qualquer dispositivo em que seja utilizado. Caso dois usuários diferentes utilizem o sistema *offline* para alterar o mesmo dado, pode haver inconsistência na sincronização.

Uma das consequências da escolha de utilizar um banco de dados local é a limitação na capacidade de armazenamento de volumes maiores de dados. Por esse motivo, as imagens não são sincronizadas no banco local, elas são disponibilizadas através de uma requisição direta ao Firebase na forma de URL, no formato de um arquivo temporário, ocupando espaço na memória apenas no momento em que são utilizadas. Por isso, no caso específico de visualização das imagens no aplicativo (por exemplo, na função Histórico Registro), o usuário precisa necessariamente ter conexão com a Internet ou ter as imagens armazenadas localmente na memória do dispositivo. A Figura 62 indica um exemplo de dados do cadastro de formas no banco de dados local do aplicativo.

Figura 62 - Banco de dados local do dispositivo móvel.



Fonte: Autora (2021).

5.2.7 Estudo de Campo Piloto

A seguir são apresentados os resultados obtidos com o estudo de campo piloto.

Preparação da Infraestrutura

A Figura 63 indica a fixação mecânica, por meio de parafusos, das *tags* em cada uma das 100 formas da amostra. O local de fixação selecionado no estudo foi no plano horizontal externo, na região central das costelas intermediárias das formas, em uma altura considerada confortável para realização das coletas de dados pelos operadores do leitor. Considerou-se que nesse local as *tags* ficariam menos expostas à impactos de quedas e golpes do martelo durante a retirada dos pinos, cunhas e faquetas. No futuro, recomenda-se que seja testada a possibilidade de colocar as *tags* no interior das costelas.

Figura 63 - Fixação mecânica das *tags* nas formas metálicas.



Fonte: Autora (2021).

A Figura 64 indica as *tags* fixadas em uma das paredes e indica a captura de dados das *tags* com o leitor em campo. Todas as *tags* emitiram o seu respectivo ID e foram lidas corretamente. A velocidade de leitura de cada *tag* na superfície metálica era quase instantânea quando o leitor era aproximado.

Figura 64 - *Tags* fixadas (esquerda) e captura de dado com leitor (direita).

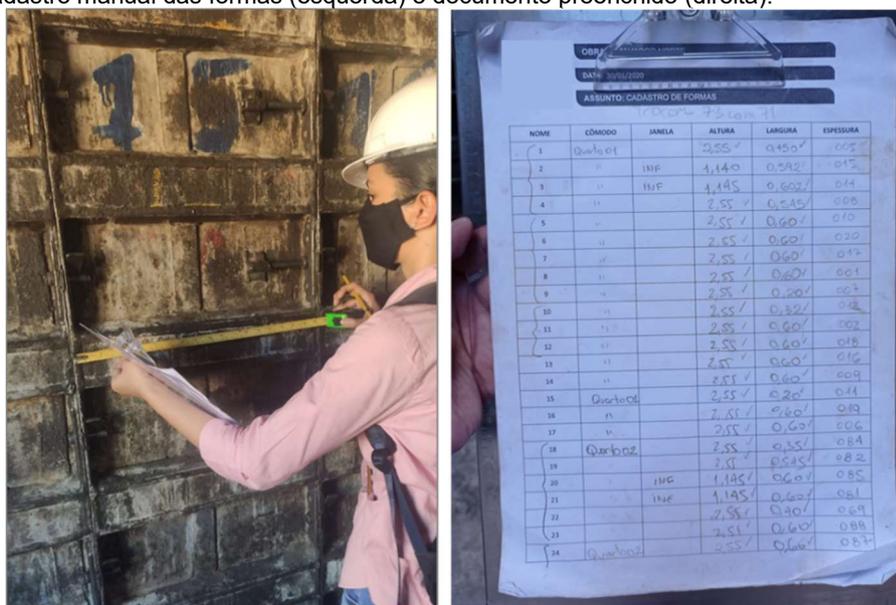


Fonte: Autora (2021).

O cadastro manual das formas foi necessário para coletar os dados que serviram como referência para a posterior verificação da performance do aplicativo, principalmente das funções de Cadastrar Nova Forma e de Inserir Sequência. A empresa não possuía nenhum registro desse tipo de dado. As formas foram medidas por cômodo e por parede, seguindo a sequência pré-definida na Figura 36 da seção 4.5.2. Foram registradas altura, largura e espessura de cada placa. Após as medidas iniciais, considerou-se que todas as formas possuíam 4 mm de espessura. Como não foi possível verificar o peso das formas em campo, ficou definido que todas as placas tinham 20kg, apenas como dado de referência para alimentar o aplicativo.

Recomenda-se que, no futuro, as placas sejam devidamente pesadas ainda no galpão, antes de serem encaminhadas para a obras. O **Apêndice 6** indica a transcrição dos dados coletados, considerando as 100 *tags* do estudo. A Figura 65 mostra a realização do cadastro.

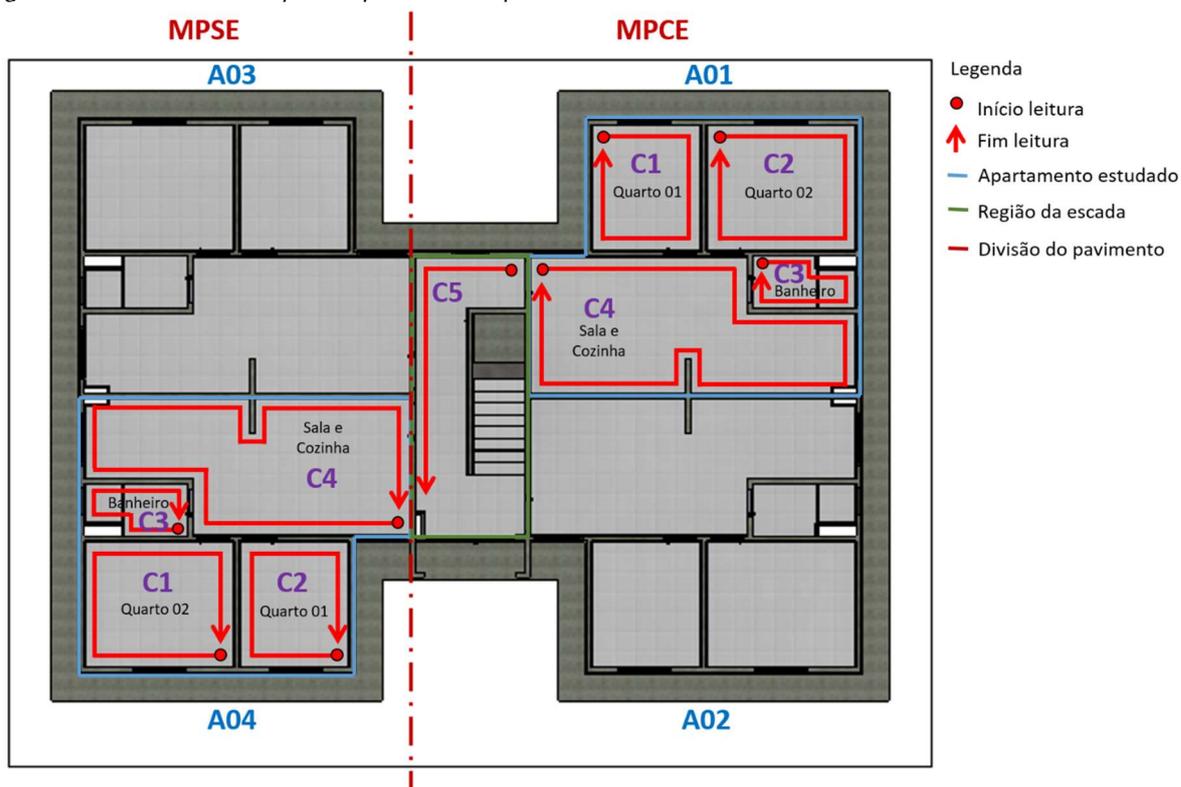
Figura 65 - Cadastro manual das formas (esquerda) e documento preenchido (direita).



Fonte: Autora (2021).

Ao final dessa etapa foi estabelecido um plano de leitura para a Obra C, com a definição da nomenclatura de cada apartamento e de cada cômodo do pavimento, conforme a estrutura lógica apresentada na seção 5.2.2. Esse plano define o **procedimento prático de coleta de dados**. Nesta obra, a transferência do jogo de forma do MPCE para o MPSE ocorria de maneira espelhada. Ou seja, conforme a Figura 66, as peças que haviam sido montadas no apartamento A01 no MPCE passam a ser montadas no apartamento A04 quando são transportadas para o MPSE. As *tags* que foram colocadas na região da escada foram consideradas como pertencentes ao MPCE. O plano de leitura também foi utilizado para atualizar os parâmetros de identidade no Modelo BIM.

Figura 66 - Plano de leitura para captura das sequências no Obra C.



Fonte: Autora (2021).

Testes dos módulos do sistema

Os procedimentos iniciais realizados para utilizar o aplicativo foram testados em campo e não apresentaram problemas ou erros. Ao abrir o aplicativo, algumas permissões podem ser solicitadas, como o acesso à câmera ou ao *bluetooth* do dispositivo. O usuário deve conceder as permissões clicando em Aceitar. Os referidos procedimentos iniciais estão descritos no **Apêndice 7**.

Após os procedimentos iniciais, é necessário habilitar o uso do leitor no sistema. Sempre que o aplicativo é aberto, recomenda-se acessar a Configuração do Leitor. O leitor precisa estar ligado. Caso o *bluetooth* do dispositivo não esteja ligado, aparecerá uma notificação e o usuário deverá clicar em Permitir para autorizar o acesso. O leitor é reconhecido pelo aplicativo e o usuário deve clicar em seu nome para ser direcionado, caso queira, à tela de Testar Leitor. Recomenda-se que o leitor seja sempre testado antes do uso, embora tenha sido verificado que a última configuração feita fica salva no aplicativo. Os testes indicaram que o leitor tem alcance mínimo de leitura de 1 cm e alcance máximo de até 3 m, ultrapassando os 2 metros indicados pelo fabricante. Porém, com o aumento da distância, perde-se precisão na leitura.

Após uma série de testes, ficou definido que o campo da tela que define a distância de leitura deve ser configurado com o valor de 10, que equivale à cerca de 10 cm de aproximação

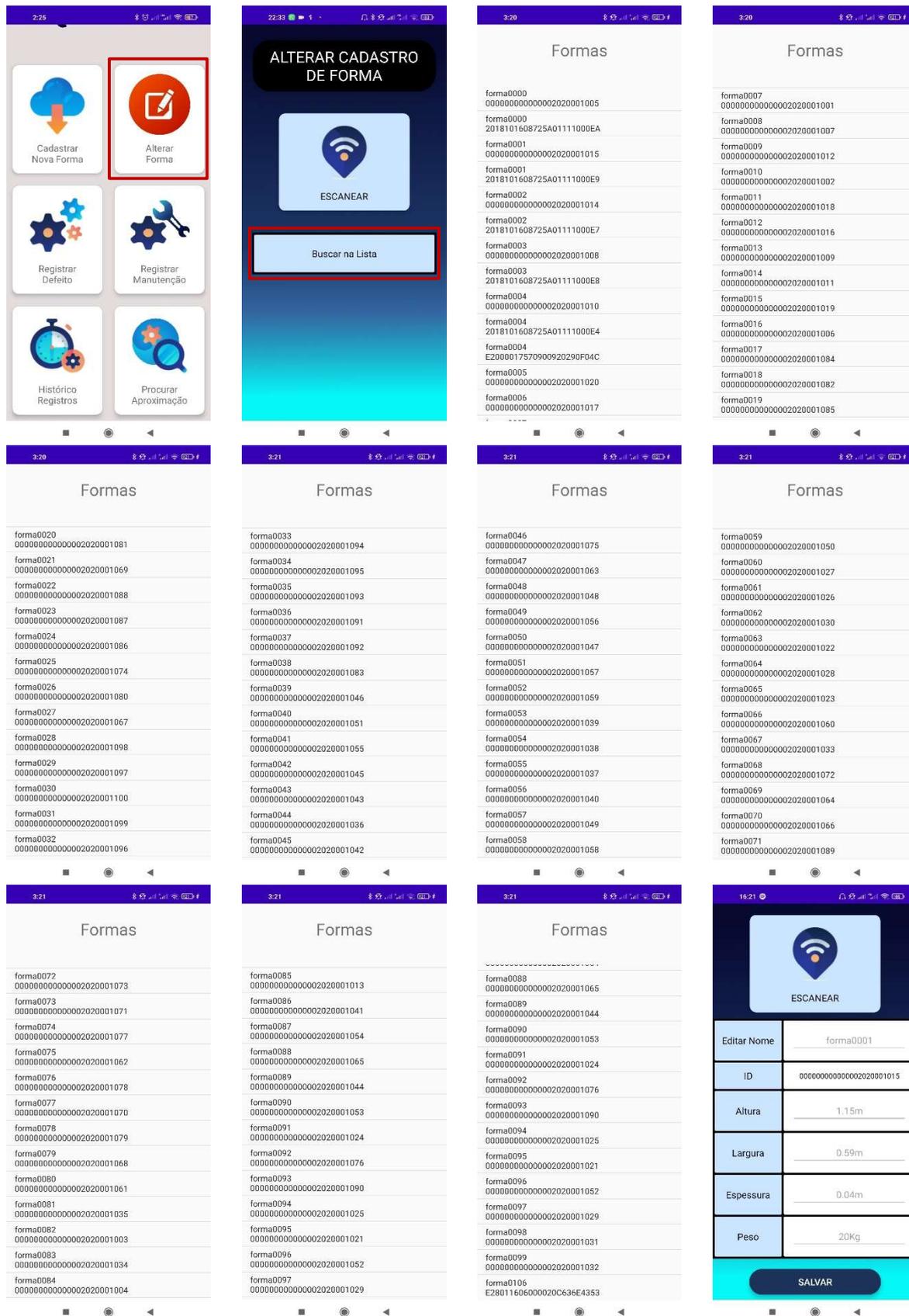
entre o leitor e uma *tag*. Essa distância permitiu a leitura individualizada e evita a interferência de sinais entre *tags* próximas. Um problema observado em campo com relação à função de Configuração do Leitor é que, quando o aplicativo permanece aberto por muito tempo sem que seja utilizado (cerca de 10 min), o leitor pode se desconectar, sendo necessário refazer o procedimento de habilitação. Nessa mesma situação, também aconteceu algumas vezes o fechamento repentino do aplicativo, mas isso foi resolvido com ajustes no código.

Uma das primeiras ações realizadas foi o cadastro das formas no aplicativo. Para isso, a *tag* de cada placa era lida com o sistema. O campo “Nome” era preenchido automaticamente e o campo ID aparecia automaticamente mediante leitura, conforme previsto. Os demais campos eram preenchidos e salvos pela pesquisadora. As 100 *tags* do estudo foram 100% cadastradas no aplicativo e os dados foram armazenados com sucesso no Banco de Dados, sem perdas quando comparado ao cadastro manual de referência. Além das pertencentes ao estudo, foram cadastradas outras 7 *tags* extras de teste que não estavam fixadas nas placas e que não seguem uma nomenclatura padronizada do ID. O cadastro completo durou cerca de 3 horas. Na prática, fora do âmbito do estudo, todas as formas da empresa deveriam ser cadastradas no sistema ainda no Galpão, e não na obra.

Quando acontecia algum erro de preenchimento durante o cadastro, era possível acessar a função de Alterar Forma e fazer a correção. Isso aconteceu na *tag* forma cujos três últimos dígitos do ID eram 015, que foi cadastrada com a altura errada. Na função de Alterar Forma também é possível consultar a lista de todas as formas que já foram cadastradas, para fins de conferência. Outra opção é fazer a consulta dessa lista a partir da função Histórico Registros.

A Figura 67, a ser lida da esquerda para a direita e de cima para baixo, indica a consulta de formas cadastradas a partir da função de Alterar Cadastro, além da lista de todas as formas cadastradas no estudo e, na última tela, a alteração de cadastro após a seleção na lista da forma cujos três últimos dígitos do ID eram 015. O cadastro apresentou potencial como primeiro passo para **melhorar o controle formal das formas** na Empresa X.

Figura 67 - Lista de formas, consultada a partir da função Alterar Cadastro, e exemplo de alteração.

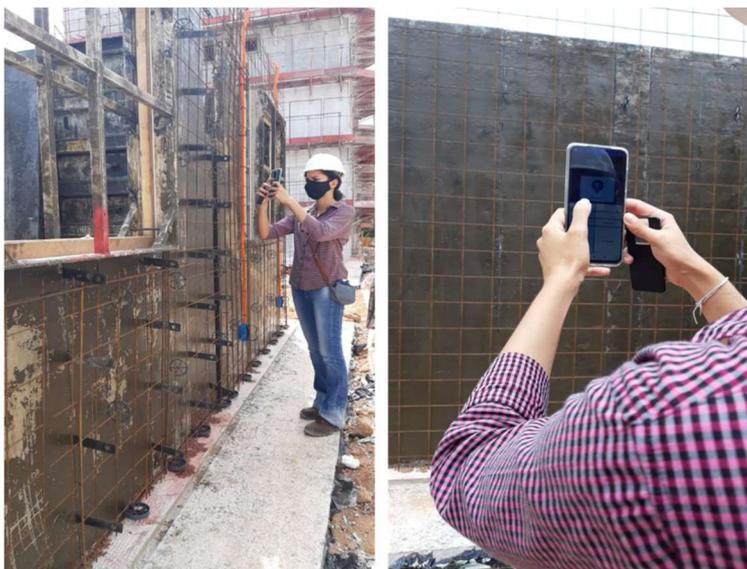


Fonte: Autora (2021).

Com relação à função de Registrar Manutenção, não foi possível observar nenhuma manutenção formal durante o período do estudo. A equipe de manutenção da obra foi acompanhada, porém, durante o período de permanência da pesquisadora na Obra C o soldador encarregado só havia recebido solicitação de manutenção de placas da laje e de algumas placas muito danificadas que estavam fora da amostra do estudo. As manutenções nessa etapa foram apenas simuladas com as *tags* extras. O funcionamento do Registrar Manutenção, do ponto de vista de uso e armazenamento dos dados, se assemelha à função de Registrar Defeitos. Para esta última função foi possível coletar defeitos reais referentes à 60 placas, entre as 100 estudadas.

O registro de defeitos pode ser feito sempre que necessário, porém, como resultado da experiência obtida durante os testes, ficou definido que o melhor momento para inspeção é quando ocorre a descida das formas do último pavimento de um módulo finalizado para o primeiro pavimento de um novo módulo. Isso porque o transporte e a montagem ocorrem de maneira mais lenta, com apoio de maquinário, e torna-se mais fácil e seguro transitar no bloco e ver as formas desmontadas. Além disso, nos pavimentos superiores existe o risco associado a transitar pela bandeja de proteção externa para capturar as imagens dos defeitos. A Figura 68 indica a inspeção e o registro de defeitos no primeiro pavimento.

Figura 68 - Inspeção e registro de defeitos.



Fonte: Autora (2021).

Ainda que a inspeção seja feita no primeiro pavimento, observou-se que não era possível coletar dados de todas as formas. Isso porque o processo de montagem é muito dinâmico e o ambiente interno apresenta muitas interferências, principalmente pela movimentação dos trabalhadores e das placas. Muitas vezes as placas eram apoiadas umas nas outras antes da

montagem, de maneira sobreposta, dificultando a visualização dos defeitos e o acesso às *tags*. Um exemplo de interferência por sobreposição de placas está indicado na Figura 69.

Figura 69 - Exemplo de interferências na coleta de dados.



Fonte: Autora (2021).

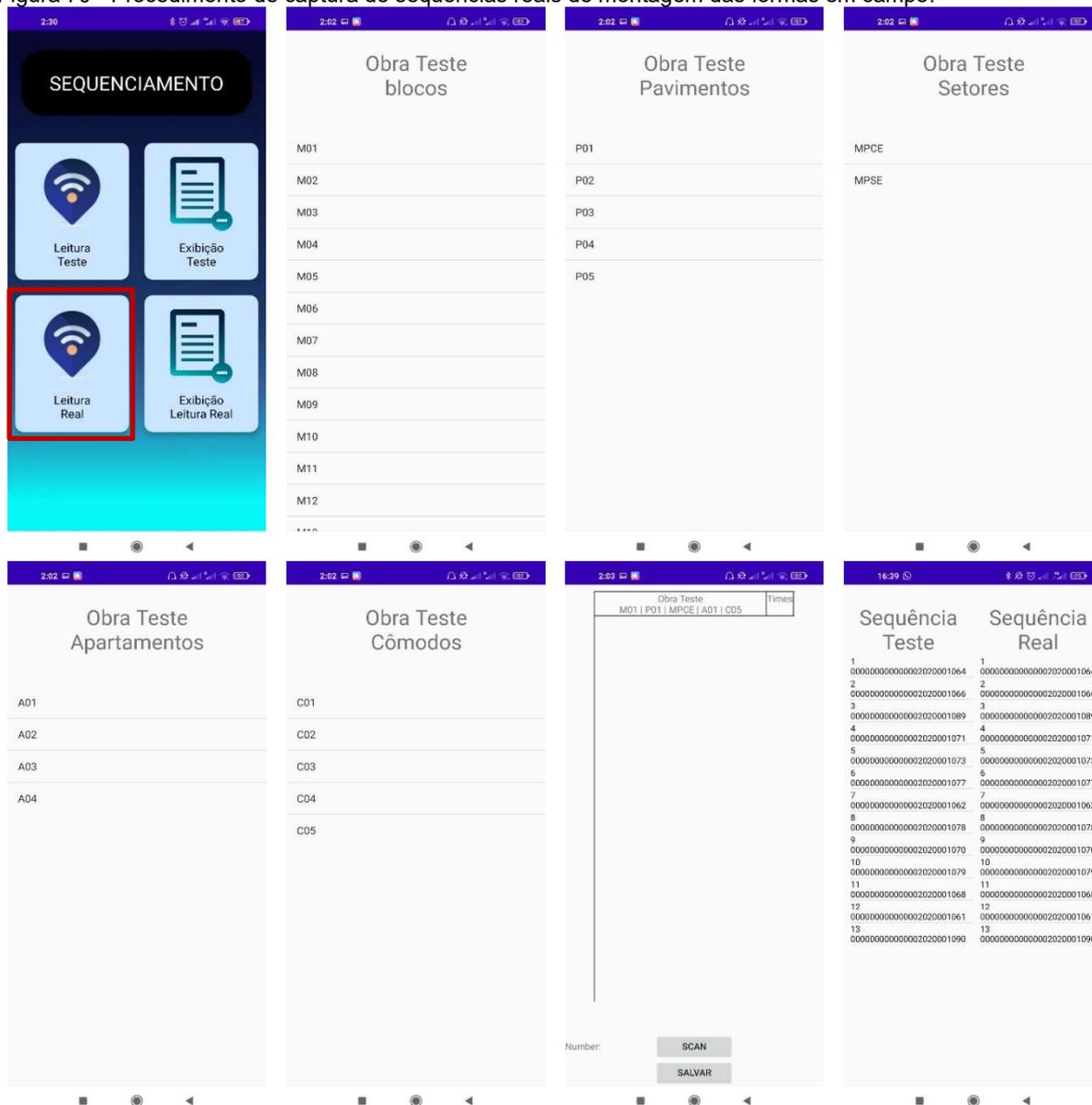
Embora não tenha sido possível registrar, todas as placas apresentavam, no mínimo, desgaste externo ou desgaste interno. O único processo de conservação observado nas placas da amostra durante o período do estudo, além da correta aplicação do desmoldante, era a remoção superficial, com ferramentas manuais, de resíduos de concreto do espelho das placas pela própria equipe de montagem. Este tipo de limpeza não foi registrado no aplicativo.

Com relação à coleta de dados, durante a etapa de testes, o sistema não tinha a função de tirar uma foto diretamente pelo aplicativo. Era preciso abrir a câmera do dispositivo, tirar a foto e depois resgatá-la na galeria, o que gerava uma grande dificuldade e tornava o processo suscetível à erros. Por exemplo, as formas 100, 099, 096 ficaram representadas por uma mesma foto, assim como as formas 042 e 075. Embora nesse caso não esteja incorreto, porque as formas de fato estão nas imagens, isso poderia gerar confusão. Este problema foi resolvido e atualmente o usuário pode escolher entre tirar imediatamente a foto pelo aplicativo ou buscá-la na galeria. A forma 065 acabou ficando sem imagem por uma falha da pesquisadora. As funções de cadastrar defeito e cadastrar manutenção apresentaram potencial para fornecer informações que ajudam a **preservar a integridade das formas**.

Com relação ao módulo Inserir Sequência, ficou estabelecido que a leitura de referência (Leitura Teste) seria o primeiro pavimento de cada bloco, já que não seria mais possível acompanhar a pré-montagem no galpão, uma vez que as formas já estavam na obra. Com relação às leituras reais, estas devem necessariamente ser realizadas uma vez por dia, a cada novo meio pavimento construído. Durante o período de testes observou-se que o melhor momento para coletar esses dados seria após a montagem completa das formas e antes da concretagem, o que nesta obra ocorre no período da tarde, em média entre 15h e 16h.

Em cada uma das leituras era necessário ao operador indicar a sua localização, selecionando no aplicativo o respectivo bloco, pavimento, setor, apartamento e cômodo no sistema, conforme o plano de leitura apresentado anteriormente na Figura 66. A Figura 70, a ser lida da esquerda para a direita e de cima para baixo, indica esse procedimento que foi testado diversas vezes em campo. A última tela mostra a comparação entre sequência de referência e sequência lida.

Figura 70 - Procedimento de captura de sequências reais de montagem das formas em campo.



Fonte: Autora (2021).

O módulo funcionou conforme esperado, comparando corretamente 100% das sequências de referência com as respectivas sequências lida, indicando erros de montagem e armazenando corretamente os dados para alimentação do Gêmeo Digital. As funções de exibir

posteriormente as leituras salvas também funcionaram conforme o previsto. Foram feitos apenas alguns ajustes de *layout* e de exibição dos dados ao longo dos testes nesse módulo.

Desta forma, o módulo Inserir Sequência apresentou potencial para fornecer informações que contribuem para que a **lógica da ordem de montagem seja obedecida pelos trabalhadores**. O Quadro 17 indica o tempo médio de leitura da sequência de montagem para cada cômodo nessa etapa de testes. A região da escada, que seria o C5, não foi considerada para aferição do tempo porque não foram colocadas tags em todo o seu perímetro.

Quadro 17 - Tempo médio de leitura na etapa de testes.

Nomenclatura	Cômodo	Tempo de Leitura (min)
C1	Quarto 01	00:50.49
C2	Quarto 02	00:55.14
C3	Banheiro	00:34.78
C4	Sala / Cozinha	01:13.84

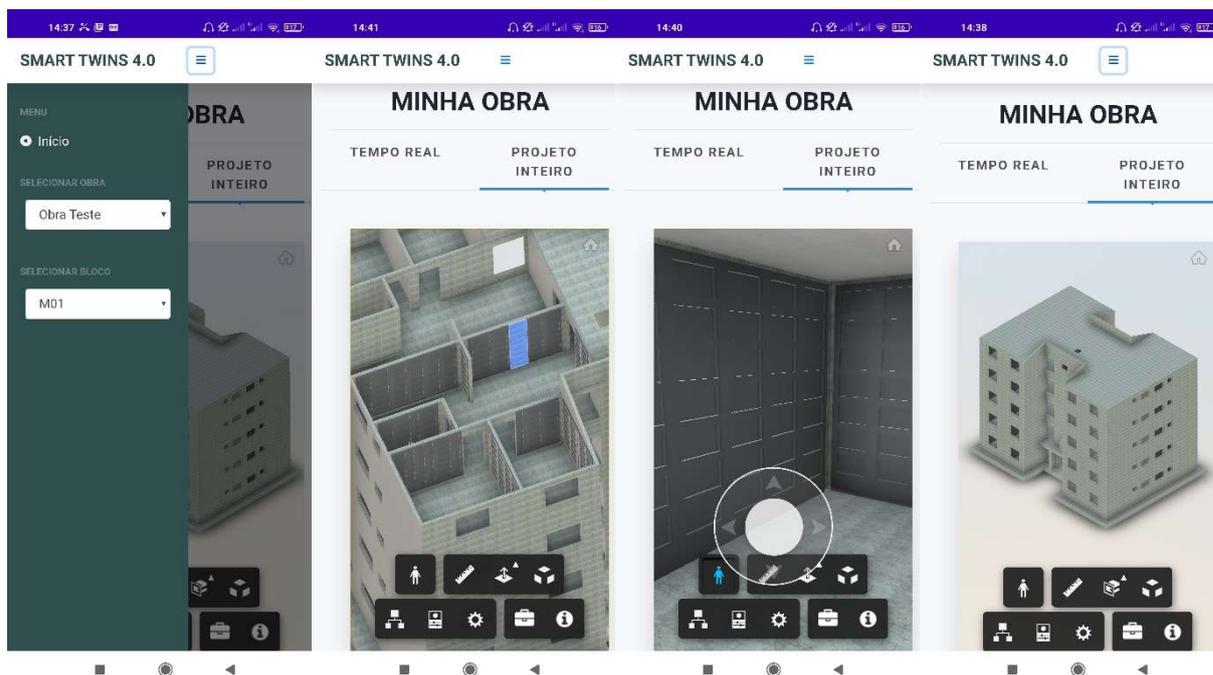
Fonte: Autora (2021).

Com relação ao Gêmeo Digital, o desempenho foi conforme o esperado. As formas digitais apresentaram 100% de correspondência com dados das formas reais, pois o modelo foi alimentado corretamente com os dados de sequência real. Este módulo só funciona *online*, o que é uma das suas limitações. Quando há instabilidade na conexão, o carregamento torna-se lento. Na tela inicial, o usuário sempre deve selecionar a obra para carregar o respectivo modelo. Foram feitos ajustes no *layout* geral desta tela no decorrer dos testes para melhorar a experiência do usuário. Com relação aos testes das rotinas desenvolvidas:

- **Acompanhamento de Progresso da Obra:** apresentou correspondência total com o progresso real dos blocos, desde que fosse feita a leitura correta das *tags* em campo com o módulo Inserir Sequência;
- **Dashboard:** os dados exibidos na *dashboard* corresponderam com sucesso aos dados cadastrados no Firebase, equivalente às respectivas formas reais;
- **Visualização do Estado de Manutenção:** embora esta função tenha apresentado atrasos de 1 a 5 minutos no carregamento, também havia correspondência do seu comportamento com a realidade. A função apresentou potencial para alertar a equipe de manutenção sobre as formas que estão apresentando defeitos e também para indicar possíveis paredes defeituosas. Uma melhoria futura é identificar e corrigir a causa atraso.

Na Figura 71 é apresentado o ambiente do Módulo BIM no aplicativo, com indicação das formas alocadas no apartamento estudado e, também, de algumas telas de visualização do Modelo Derivado.

Figura 71 - Gêmeo Digital na etapa de testes.



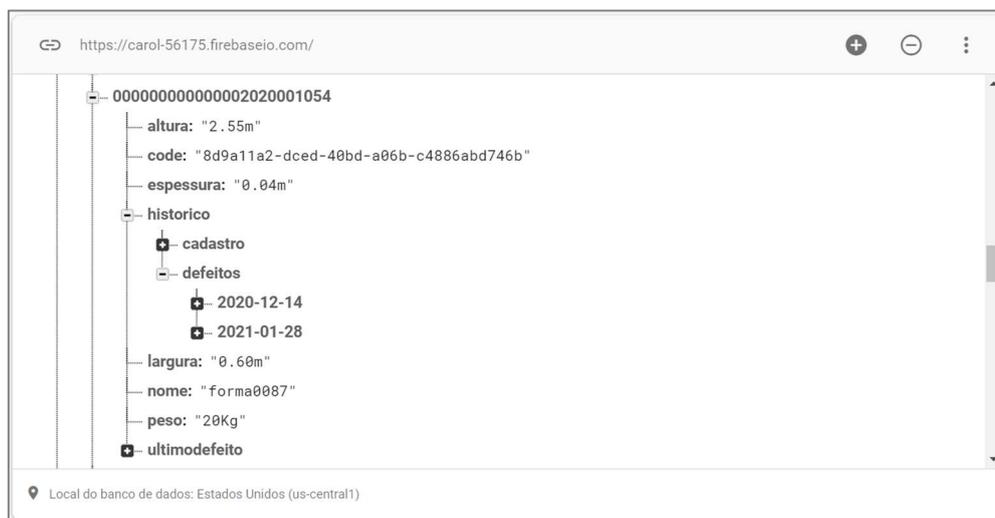
Fonte: Autora (2021).

De maneira geral, a configuração de leitor e as demais funções do Módulo de Manutenção, Módulo BIM e Módulo Inserir Sequência funcionaram conforme esperado. A função de Procurar Aproximação foi testada diversas vezes em campo e tem potencial para **identificar possíveis desvios** de alguma das formas, embora de maneira limitada. A limitação ocorre devido ao alcance máximo de leitura do tipo de leitor que está sendo utilizado, que não ultrapassa 3m. A associação futura de um leitor fixo ao sistema, a ser colocado, por exemplo, na entrada da obra, poderia tornar a identificação de desvios mais efetiva.

O Histórico Registro também foi acessado e testado diversas vezes em campo. Um dos problemas observados com relação a essa função foi a velocidade de exibição das imagens dos defeitos e das manutenções. Como essa exibição é *online*, nos casos em que as imagens não estão armazenadas no próprio dispositivo, o carregamento torna-se um pouco lento quando há instabilidade na conexão. Isso prejudica o acesso imediato à informação. Um ponto positivo é a possibilidade de filtrar e analisar posteriormente todos os dados coletados.

Uma das etapas de teste em campo foi o cadastro de imagens das paredes geradas para posterior comparação das não conformidades encontradas com os defeitos nas formas geradoras. Como o Módulo de Qualidade não havia sido concluído até o final dessa etapa de testes, as imagens das paredes foram capturadas com o dispositivo móvel e armazenadas para posterior alimentação do módulo. Com relação ao banco de dados, a Figura 72 indica um exemplo de como os dados das formas cadastradas estavam sendo corretamente armazenados no Firebase, para as formas cujos três últimos dígitos do ID eram 054.

Figura 72 - Exemplo de forma cadastrada no Firebase.



Fonte: Autora (2021).

O Quadro 18 resume os principais pontos positivos e oportunidades de melhorias referentes ao desempenho da infraestrutura física e dos módulos do sistema, conforme discutido.

Quadro 18 - Resumo com pontos positivos e oportunidades de melhoria.

ITEM	PONTOS POSITIVOS	OPORTUNIDADES DE MELHORIA
Infraestrutura	<ul style="list-style-type: none"> As <i>tags</i> emitiram o ID com eficácia; O leitor capturou o ID com eficácia; O sistema apresentou boa velocidade de leitura na superfície metálica; O plano de leitura foi eficaz como procedimento prático de leitura e como referência para atualizar os parâmetros de identidade. 	<ul style="list-style-type: none"> Colocar as <i>tags</i> no interior da costela para evitar exposição à impactos; Corrigir perda de precisão na leitura com aumento da distância; Cadastrar todas as formas da empresa no sistema ainda no Galpão; O peso das placas deve ser aferido e a espessura não se mostrou um dado relevante.
Configuração de Leitor	<ul style="list-style-type: none"> Leitor permite a configuração para leitura individualizada, evitando interferência de sinais entre <i>tags</i> próximas. 	<ul style="list-style-type: none"> Corrigir código do fabricante para leitor não se desconectar; Prever assistência técnica para avaliar falhas e fechamento repentino do aplicativo.
Módulo de Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> As 100 <i>tags</i> do estudo foram cadastradas com sucesso no aplicativo; Defeitos em 60 placas foram coletadas com sucesso no aplicativo; É possível filtrar os dados análises posteriores às coletas; Potencial para melhorar o controle formal das formas; Potencial para ajudar a preservar a integridade das formas. Capacidade de indicar possíveis desvios de alguma das formas. 	<ul style="list-style-type: none"> Reduzir possibilidade de erro de preenchimento de dados; Alertar a empresa para rever os critérios de manutenção corretiva e frequência de manutenção preventiva; Corrigir lentidão na velocidade de exibição das imagens dos defeitos e das manutenções; Reduzir interferências e riscos associados a transitar no bloco; Possibilidade de associação futura de um leitor fixo ao sistema para evitar desvios.

ITEM	PONTOS POSITIVOS	OPORTUNIDADES DE MELHORIA
Módulo Inserir Sequência	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de comparar sequências de referência com as respectivas sequências lida; • Capacidade de alimentar o modelo derivado; • Capacidade de indicar erros de montagem; • Potencial para apoiar que a lógica da ordem de montagem seja obedecida pelos trabalhadores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar estratégias para automatizar a coleta diária de dados; • Investigar estratégias para automatizar a identificação da localização do operador; • Corrigir a lentidão no carregamento em função da instabilidade na conexão; • Verificar possibilidade de associação futura de um leitor fixo ao sistema.
Módulo BIM	<ul style="list-style-type: none"> • As formas digitais apresentaram 100% de correspondência com os dados das formas reais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrigir a lentidão no carregamento em função da instabilidade na conexão.

Fonte: Autora (2021).

Ao final da etapa de testes nos módulos do sistema foi elaborado um pequeno *checklist* para ser verificado antes do uso do aplicativo em campo. Algumas boas práticas também foram destacadas, conforme indicado em seguida.

Checklist para uso do Smart Twins 4.0:

- O dispositivo móvel está carregado?
- O leitor está carregado?
- O leitor foi conectado ao dispositivo móvel?
- A distância de leitura foi configurada para 10 cm?
- O plano de leitura foi consultado?
- Cada placa possui uma *tag* devidamente fixada?
- É possível transitar no cômodo em segurança neste momento?

Boas práticas de leitura para capturar as sequências reais:

- Ter atenção na seleção do módulo, pavimento, setor, apartamento e cômodo;
- Verificar se cada *tag* está sendo registradas no momento da leitura (observar mudança no número total de tags lidas ou no número de leituras por segundo);
- Verificar se o número de tags lidas é condizente com o número de formas do cômodo;
- Checar sequência real com sequência teste de referência antes de salvar.

Dados complementares

A coleta de dados complementares teve como objetivo mensurar de forma qualitativa e quantitativa o custo do retrabalho das paredes de concreto na Obra C. O serviço de tratamento interno é realizado depois da remoção das formas metálicas e antes da aplicação do chapisco, contemplando a regularização das paredes e correção de não conformidades. A equipe de

tratamento interno possui uma produtividade média, segundo dados da Empresa X, de 1 apartamento a cada 2 dias. De acordo com o acompanhamento feito em campo, foi identificado que as atividades de lixar a superfície e fechar as aberturas das faquetas no serviço de tratamento interno eram inerentes ao sistema construtivo, conforme Figura 73.

Figura 73 - Serviço de tratamento interno, com fechamento das aberturas deixadas pelas faquetas e lixamento.



Fonte: Autora (2021).

As durações dessas atividades foram mensurada e estão indicadas no Quadro 19.

Quadro 19 - Duração de atividades do serviço de tratamento interno.

Serviço	Horário de Início	Horário de Fim	Duração
Lixar superfície	08:25	09:26	1h e 1 min
Fechar aberturas	09:29	10:38	1h e 9 min

Fonte: Autora (2021).

Todo o resto do tempo de execução do serviço de tratamento interno era empregado em retrabalho, principalmente na correção de barrigas, bexigas e problemas com requadro. Parte desse retrabalho era consequência de problemas nas formas e parte era consequência de falhas de concretagem. Em estudos futuros será mensurado que porcentagem é de fato referente apenas às formas.

A Figura 74 indica o trabalhador realizando retrabalho, quebrando a parede e corrigindo irregularidades na região próxima à abertura da janela.

Figura 74 - Serviço de tratamento interno, retrabalho para regularização.



Fonte: Autora (2021).

A equipe total do serviço de tratamento interno é composta por três profissionais e três ajudantes, sendo que trabalham uma dupla (profissional mais ajudante) por apartamento. A seguir estão mais alguns dados sobre a equipe:

- Profissional: R\$17,92/h
- Servente: R\$10,58/h
- Jornada de trabalho: 8,8h/dia

Segundo calculado, o custo médio do serviço para um bloco, que possui 4 apartamentos e 5 pavimentos, é de cerca de R\$10.032,00. Conforme os dados, quase 90% desse valor é empregado, portanto, em retrabalho geral.

Implementação piloto

A implementação piloto do sistema foi realizada no módulo M16, com 9 dias de coleta de dados. Com relação à infraestrutura, dois meses se passaram desde a instalação das *tags* até a implementação piloto. Nesse período, as formas continuaram a ser utilizadas diariamente, sem interferência da pesquisadora, enquanto que o leitor permaneceu fora de uso. No início da implementação, a inspeção visual indicou que uma das *tags* do cômodo C1 havia sido perdida, conforme indicado na Figura 75.

Figura 75 - *Tag* perdida.

Fonte: Autora (2021).

Ela foi substituída por uma das *tags* de teste para que as leituras das sequências não fossem comprometidas. Além disso, outras formas estavam com o invólucro danificado, mas continuavam emitindo o ID normalmente. A Figura 76 indica duas *tags* que foram danificadas. A causa mais provável do dano é que tenham sido atingidas pelo martelo na retirada de pinos e cunhas. O leitor seguiu funcionando normalmente.

Figura 76 - *Tags* comprometidas.

Fonte: Autora (2021).

O Quadro 20 indica a quantidade de *tags* danificadas por cômodo.

Quadro 20 - Quantidade de *tags* danificadas por cômodo.

Símbolo	Cômodo	Tags. Danificadas
C1	Quarto 01	2
C2	Quarto 02	3
C3	Banheiro	1
C4	Sala / Cozinha	1
Total		7

Fonte: Autora (2021).

Com relação ao contato com o concreto, que era uma das preocupações do estudo, verificou-se que as *tags* parcialmente ou completamente cobertas de concreto continuavam emitindo o seu ID, como no exemplo da Figura 77. Em alguns desses casos, porém, a velocidade de transmissão de dados da *tag* para o leitor foi reduzida.

Figura 77 - *Tag* parcialmente coberta de concreto.



Fonte: Autora (2021).

Com relação ao Módulo de Manutenção, as formas não precisaram ser cadastradas novamente, uma vez que 100% delas já haviam sido cadastradas na etapa de testes. Apenas o cadastro da *tag* de substituição foi alterado para corresponder às dimensões da forma cuja *tag* original foi perdida. Não foi possível observar nenhuma manutenção durante o período da implementação piloto. Já os critérios de identificação de defeitos foram refinados com relação à etapa de teste. Por exemplo, apenas costelas muito danificadas foram cadastradas, porque observou-se que esse componente tem pouca influência na qualidade das paredes geradas.

Durante a implementação piloto foram registrados defeitos em 57 placas, entre as 100 da amostra. Cada forma pode apresentar múltiplos defeitos, por isso, foram registrados 124 defeitos no total. Um filtro foi aplicado nos dados do Histórico Registro para identificar a frequência de cada defeito e a porcentagem de cada defeito com relação à quantidade total, conforme indicado no Quadro 21.

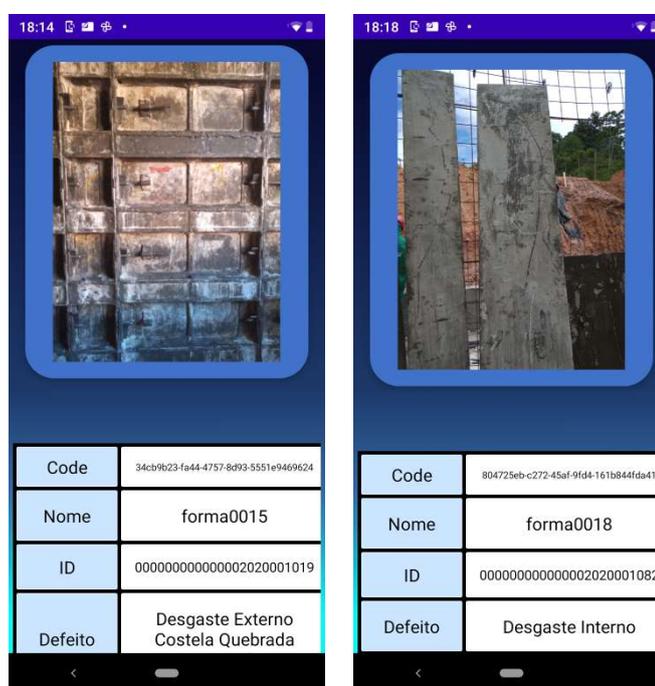
Quadro 21 - Defeitos registrados.

Tipo de Defeito Registrado	Frequência	% em relação ao total defeitos registrados
Desgaste interno	55	44%
Desgaste externo	55	44%
Espelho amassado	10	8%
Costela amassada / perfurada / quebrada	2	2%
Perfuração incorreta	2	2%
Outros defeitos	0	0
Total	124	100%

Fonte: Autora (2021).

Desgaste externo e desgaste interno foram os tipos de defeitos mais recorrentes. A causa mais provável, conforme investigação em campo, era a falta de uma rotina de manutenção com limpeza diária comum e adequada do concreto nas formas. Uma solução, portanto, é orientar os trabalhadores a estabelecer essa rotina e indicar a forma correta de limpeza, além de determinar manutenções corretivas para as formas mais desgastadas. Também foram observadas a ocorrência de espelho amassado e de costela danificada, cuja causa mais provável era o impacto do martelo e impactos durante o transporte. Uma solução seria investir no treinamento dos trabalhadores e melhorar o acompanhamento do serviço. A Figura 78 indica uma situação de desgaste externo e desgaste interno, respectivamente.

Figura 78 - Desgaste externo (esquerda) e desgaste interno (direita).



Fonte: Autora (2021).

Os filtros nos dados podem ser personalizados conforme interesse da empresa. Por exemplo, é possível filtrar a ocorrência de defeitos por forma, por data, por período ou por obra. O filtro por forma ajuda a compreender aspectos da vida útil da forma. O filtro por data ou período ajuda a visualizar os defeitos mais recorrentes em uma inspeção. O filtro por obra ajuda a identificar que equipes estão gerando mais defeitos nas formas e auxilia na programação de treinamentos. Os filtros também são aplicáveis às funções de cadastro de formas e de manutenções. A geração automática de relatórios a partir desses filtros é uma função a ser implementada futuramente.

No Quadro 21, as duas ocorrências do defeito Perfuração Incorreta representam um erro de registro pelo operador. Uma das principais limitações do Módulo de Manutenção é a

dependência da assertividade do operador na identificação e registro dos defeitos. Futuramente, é interessante investigar o uso de Inteligência Artificial para identificação automática de defeitos.

Com relação ao Módulo Inserir Sequência, foram capturadas 86 sequências referentes a 5 MPCE (cada um com 5 cômodos) e 4 MPSE (cada um com 4 cômodos), considerando que não houve coleta no MPSE do segundo pavimento. As coletas ocorreram ao longo de 9 dias e os resultados confirmaram a correspondência dos dados coletados com a realidade. O Quadro 22 indica o tempo médio de leitura da sequência de montagem para cada cômodo nessa etapa.

Quadro 22 - Tempo médio de leitura na etapa de implementação.

Nomenclatura	Cômodo	Tempo de Leitura (min)
C1	Quarto 01	00:25.22
C2	Quarto 02	00:21.30
C3	Banheiro	00:15.12
C4	Sala / Cozinha	00:46.97

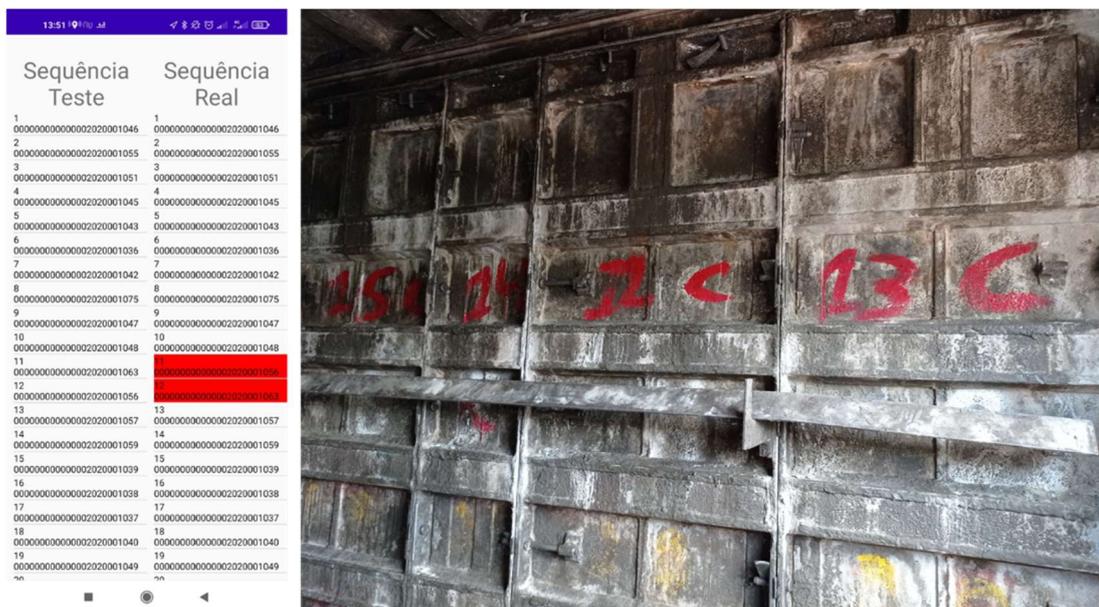
Fonte: Autora (2021).

Com o aumento da experiência, as leituras tornaram-se mais rápidas com relação à etapa de testes, durando menos de um minuto por cômodo. Mensurar essa variável ajuda a estimar quanto tempo um operador do leitor dedicaria à coleta de dados para rodar o sistema na empresa. Outras variáveis, que não foram determinadas, são o tempo de deslocamento do escritório da obra até o módulo e o tempo médio de registro de defeitos e manutenções.

Com relação à identificação de erros de montagem, foi identificado nesse bloco apenas uma situação em que a sequência real não estava correspondendo à sequência teste de referência do primeiro pavimento. Ressalta-se que a presença da pesquisadora e o conhecimento do sistema provavelmente tem influência no processo de montagem, deixando os trabalhadores mais atentos ao serviço. O encarregado das formas foi informado do erro, que foi corrigido.

A identificação do erro de montagem pelo sistema é imediata e está indicada à esquerda da Figura 79. A numeração do aplicativo não tem relação com a numeração física em tinta, mas no lado direito da Figura 79 é possível ver pela sequência que as formas realmente estão fora da ordem, trocadas entre si.

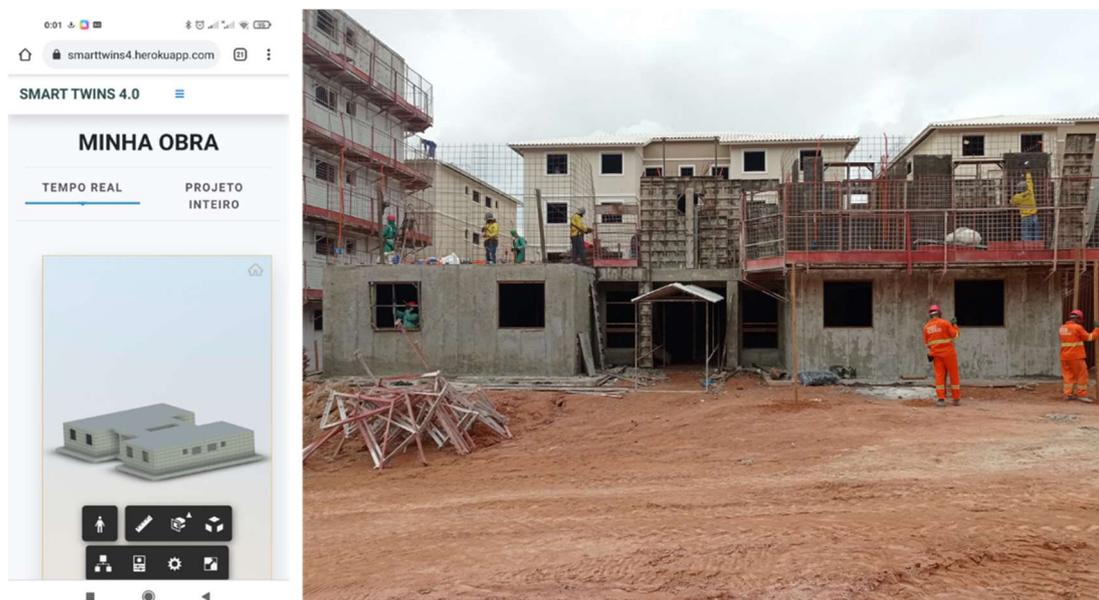
Figura 79 - Sequência de montagem incorreta vista no aplicativo (esquerda) e no campo (direita).



Fonte: Autora (2021).

Com relação ao Módulo BIM, a Figura 80 indica a função de Acompanhamento de Progresso da Obra. Considerando as 9 rodadas em que essa função foi solicitada, todas apresentaram 100% de correspondência com o progresso real do bloco, tendo como unidade o meio pavimento. O progresso pode ser acompanhado remotamente do escritório pelos gestores.

Figura 80 - Gêmeo Digital (esquerda) e gêmeo físico (direita).

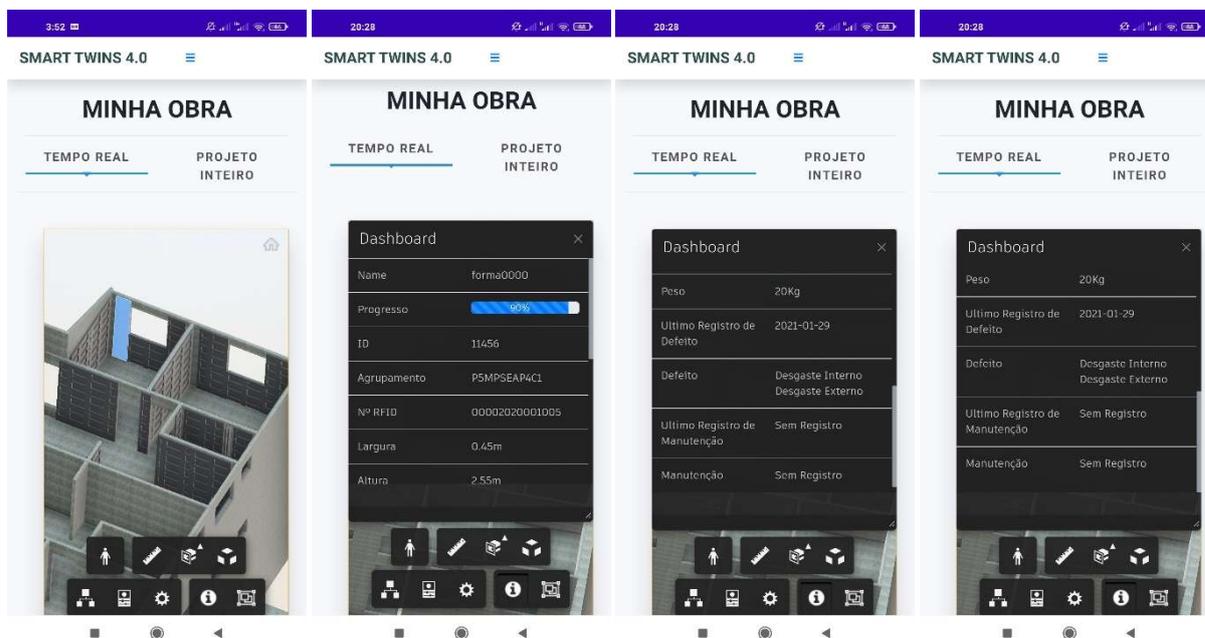


Fonte: Autora (2021).

A Figura 81 indica um exemplo da função de *Dashboard* sendo solicitada. Na implementação piloto, os dados exibidos corresponderam com sucesso aos dados cadastrados em 100% das vezes em que a função foi solicitada. O modelo derivado BIM foi alimentando em

tempo hábil com as sequências reais de montagem em todas as 86 sequências capturadas, inclusive no caso em que houve o erro de montagem. As condições das formas podem ser monitoradas remotamente pelos gestores com esta função, em termos de características físicas, defeitos cadastrados, manutenções realizadas e sequência real de montagem.

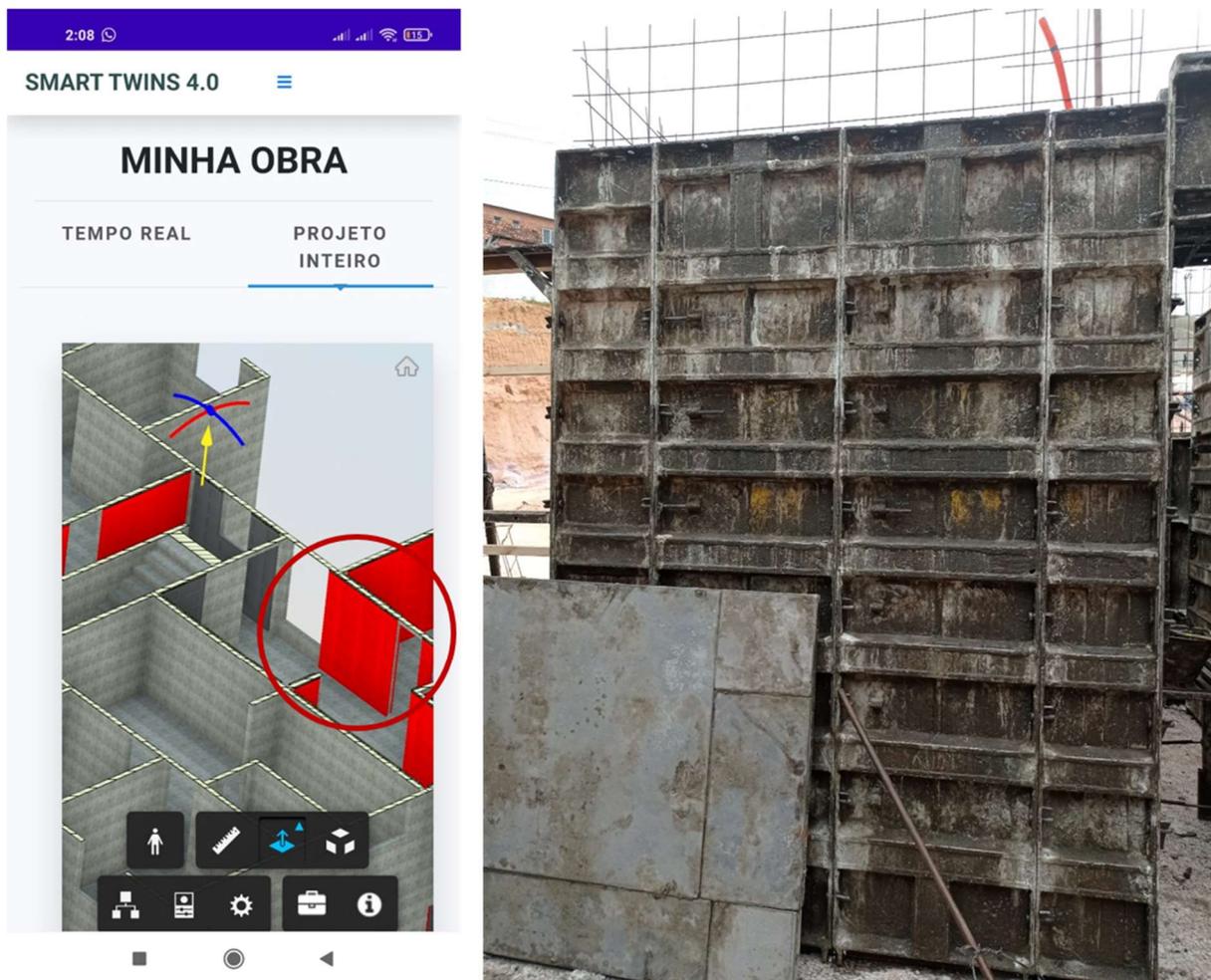
Figura 81 - *Dashboard* para forma no aplicativo.



Fonte: Autora (2021).

A Figura 82 indica a função de Visualização do Estado de Manutenção funcionando para o módulo M16 da Obra C. Essa função continuou apresentando como maior dificuldade o tempo de carregamento. Como maior benefício, tem a capacidade de fornecer informações que apoiam a tomada de decisão remota sobre manutenções corretivas. As formas com defeitos cadastrados mudaram de cor para vermelho ao longo da implementação piloto, indicando correspondência com a realidade. Como não houve registro de manutenção, não foi possível testar a mudança de cor para verde.

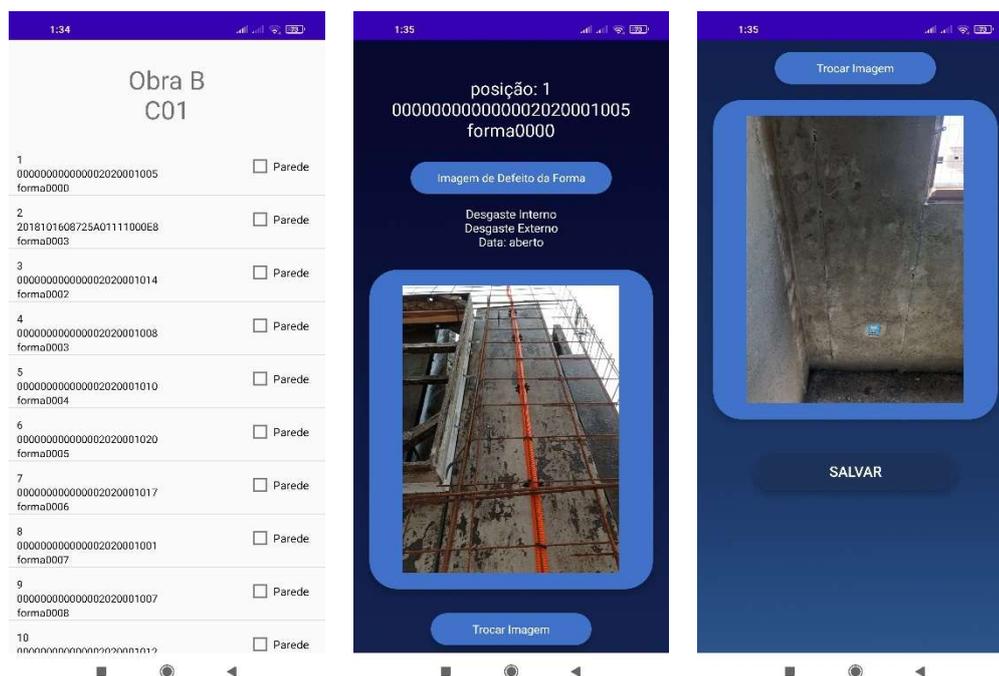
Figura 82 - Visualização da extensão do estado de manutenção das formas no aplicativo.



Fonte: Autora (2021).

O Módulo de Qualidade foi desenvolvido, mas não foi testado em campo porque a sua finalização só ocorreu após a etapa de implementação piloto. Espera-se que análises futuras das comparações entre as imagens de defeitos nas formas e imagens das respectivas paredes geradas possam gerar indicadores para mensurar o tempo de retrabalho que esses defeitos geram. Por enquanto, essa comparação é manual, mas posteriormente pode ser testado o uso de inteligência artificial nessa comparação. A Figura 83 indica o Módulo de Qualidade.

Figura 83 - Módulo de Qualidade.



Fonte: Autora (2021).

Com relação ao gerenciamento das formas e da obra, o Quadro 23 resume o potencial de tomada de decisão por módulo, com base nas reflexões geradas ao longo da implementação piloto.

Quadro 23 - Potencial de tomada de decisão por módulo do sistema.

Módulo do Sistema	Potencial de Tomadas de Decisão
Módulo de Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> Planejar compras de placas e componentes Selecionar formas cujas dimensões se adaptam melhor a cada projeto, evitando cortes nas placas Interromper processo para evitar propagação de erros Investigar as causas dos defeitos mais recorrentes Realizar treinamentos após identificar equipes que mais geram defeitos nas formas Determinar manutenções corretivas Planejar manutenções preventivas Dimensionar equipes de manutenção da obra Investigar as ocorrências e causas de desvios
Módulo Inserir Sequência	<ul style="list-style-type: none"> Interromper processo para evitar propagação de erros Realizar treinamentos
Módulo BIM	<ul style="list-style-type: none"> Interromper processo para evitar propagação de erros Investigar atrasos no progresso Determinar manutenções corretivas
Módulo de Qualidade	<ul style="list-style-type: none"> Interromper processo para evitar propagação de erros Investigar as causas de não conformidades mais recorrentes Dimensionar equipe de tratamento interno

Fonte: Autora (2021).

5.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO SISTEMA

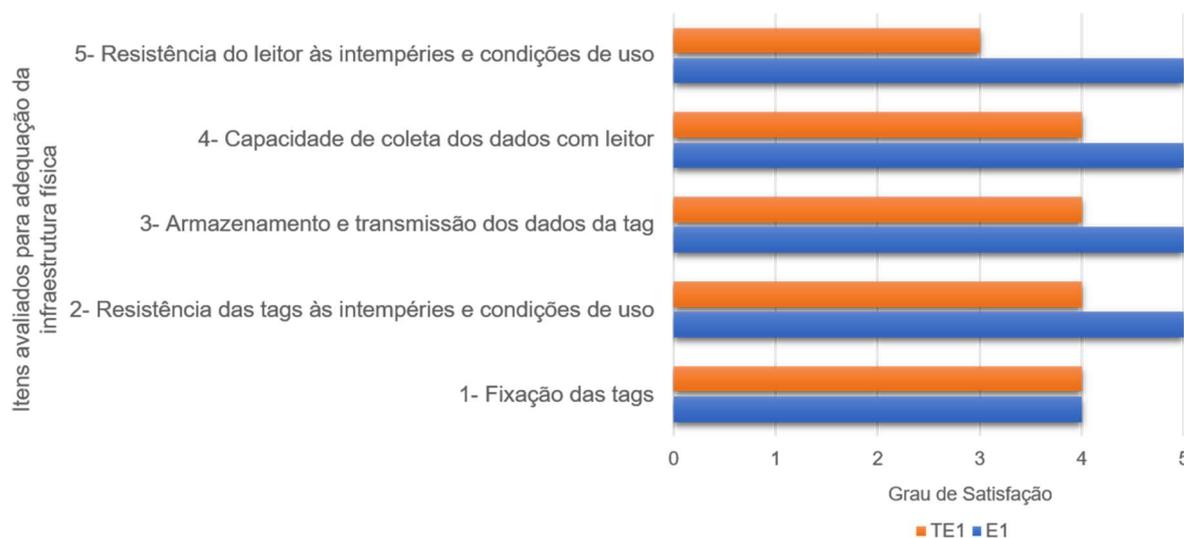
Essa seção apresenta a avaliação do desempenho do sistema, considerando os constructo e variáveis definidas. A referência da numeração nos itens avaliados corresponde ao número das respectivas questões feitas aos entrevistados do Grupo 1, que podem ser consultadas no **Apêndice 3**. Os entrevistados foram: Estagiário 1 (E1) e Técnica em Edificações 1 (TE1). As demais fontes de evidência foram os testes do sistema, a implementação piloto e os *feedbacks* da equipe de campo.

5.3.1 Constructo Funcionalidade

A avaliação do constructo funcionalidade contempla a análise das variáveis adequação da infraestrutura física, interferências e riscos durante o funcionamento, nível de precisão das leituras, latência dos dados e confiabilidade dos dados, visualização dos dados e generalização, conforme será apresentado a seguir.

Adequação da Infraestrutura física: o gráfico da Figura 84 indica o grau de satisfação dos entrevistados E1 e TE1 com os itens indicados. O valor 5 indica o grau máximo de satisfação e o valor 1 indica o grau mínimo de satisfação.

Figura 84 - Avaliação da adequação da infraestrutura física.



Fonte: Autora (2021).

Quase todos os valores do gráfico foram iguais ou superiores a 4, o que indica que a infraestrutura física foi considerada, de modo geral, satisfatória por E1 e TE1. Foi perguntado aos entrevistados (questão 6), tendo como opções sim ou não, se a duração da bateria do leitor foi suficiente para fazer a coleta dos dados. E1 e TE1 consideraram que sim. Nas etapas de testes dos módulos do sistema e de implementação do sistema na Obra C foi observado que a fixação mecânica das *tags* foi eficaz durante todo o estudo, ao contrário do uso de

adesivo acrílico. Com relação à resistência das *tags*, embora a percepção dos dois entrevistados tenha sido positiva, 7 *tags* sofreram danos e 1 foi perdida, entre as 100 da amostra. Avaliou-se que colocar futuramente as *tags* no interior da costela é uma oportunidade de melhoria.

Os resultados dos estudos de campo mostraram uma boa capacidade do sistema de transmitir e coletar os dados, o que corrobora com a percepção positiva de E1 e TE1. Com relação à resistência ao leitor, E1 considerou satisfatória e TE1 considerou intermediária. De acordo com a percepção da pesquisadora nos testes, o leitor aparenta fragilidade com relação a outros modelos mais robustos, mas funcionou normalmente durante todo o estudo de campo. Ressalta-se, porém, que ele não sofreu nenhum tipo de quedas ou impacto. Com relação à bateria, o seu desempenho ao longo do estudo de campo foi satisfatório, superando as 3 horas de duração previstas pelo fabricante.

Interferências e riscos durante o funcionamento: o gráfico da Figura 85 indica em que grau os entrevistados avaliam os itens indicados. O valor 5 indica o grau máximo e o valor 1 indica o grau mínimo.

Figura 85 - Avaliação de interferências e riscos.



Fonte: Autora (2021).

As respostas de TE1 indicam um grau baixo de percepção de interferências e risco da infraestrutura em campo, o que representa uma avaliação positiva. As respostas de E1 indicam uma preocupação maior com a interferência do sistema nos procedimentos normais da obra e com o risco do uso do sistema para o operador. As duas questões estão associadas, na percepção da pesquisadora. Os trabalhadores na forma precisam ficar atentos para não atingirem o operador durante o transporte das placas, o que pode gerar uma interferência no fluxo de trabalho e, ao mesmo tempo, colocar o operador em risco. Por isso, é importante que sejam observados os horários de coletas de dados recomendados no capítulo de resultados. As *tags* instaladas, em si, não representaram risco ou interferência significativas.

Nível de precisão das leituras, latência dos dados e confiabilidade dos dados:

Quadro 24 indica a percepção dos entrevistados E1 e TE2 com relação às variáveis indicadas.

Quadro 24 - Avaliação do nível de precisão das leituras, de latência e de confiabilidade dos dados.

Variáveis	Questões	Resposta	
		Sim	Não
Nível de Precisão	10-O ajuste da distância de leitura (Power 10) nas configurações do leitor possibilitou coletar os ID das formas de forma individualizada, obedecendo a sequência definida?	E1, TE1	
	11- A velocidade de leitura de cada <i>tag</i> em campo foi considerada satisfatória?	E1, TE1	
Latência dos dados	13-Pode-se considerar que os dados estavam sendo coletados e visualizados no aplicativo em tempo hábil (tempo real) durante a utilização online do sistema?	E1, TE1	
	14-Pode-se considerar que os dados estavam sendo coletados e visualizados no aplicativo em tempo hábil (tempo real) durante a utilização <i>off-line</i> do sistema?	E1, TE1	
	15-Pode-se considerar que os dados estavam sendo exibidos em tempo hábil (tempo real) no Gêmeo Digital, quando online?	E1, TE1	
Confiabilidade dos dados	17-O aplicativo apresentou erros ou encerramento repentino durante a sua utilização?		E1, TE1
	18-Algumas das funções apresentou comportamento inesperado durante a utilização?		E1, TE1
	19-Os dados indicados nos elementos virtuais do Gêmeo Digital correspondem aos elementos reais?	E1, TE1	
E1 – Estagiário 1, TE1 – Técnica em Edificações.			

Fonte: Autora (2021).

O nível de precisão após o ajuste do leitor para a distância definida no estudo foi considerado eficaz pelos entrevistados, assim como a velocidade de leitura de cada *tag*. O estudo de campo também indicou essa eficácia, conforme apresentado no capítulo de resultados.

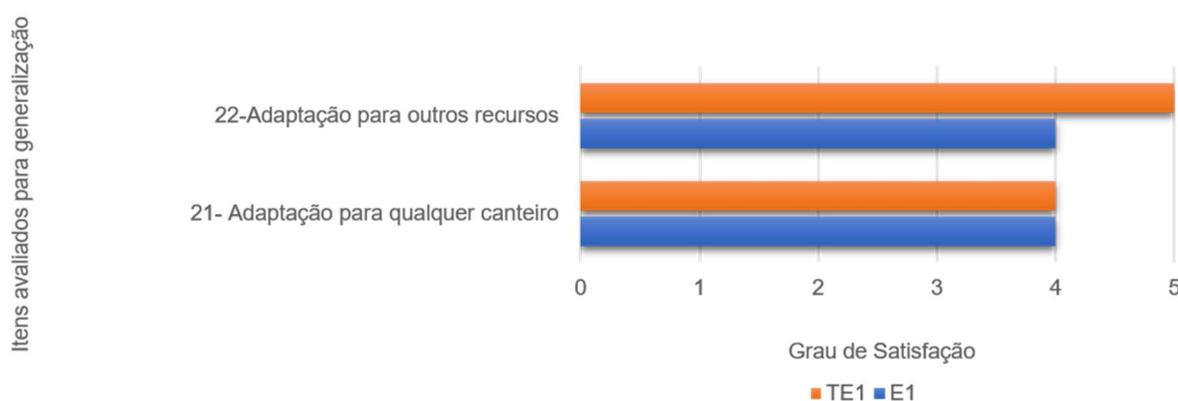
Sobre a latência de dados, os entrevistados consideraram satisfatória. E1 e TE1 considera que os dados estavam sendo coletados e visualizados em tempo hábil no sistema e no Gêmeo Digital. Tendo como fonte de evidência a observação participante no estudo de campo, uma ressalva é que as funções do aplicativo que só funcionam *online* apresentam instabilidade ou lentidão quando há problemas de conexão. Ainda sobre a latência dos dados, foi perguntado também aos entrevistados (questão 12) em que grau o tempo médio de leitura de sequência para cada cômodo foi considerado satisfatório. E1 escolheu o valor 4 (satisfatório) e TE2 escolheu o valor 5 (muito satisfatório). As leituras de cada cômodo são feitas em apenas alguns segundos, conforme verificado no estudo de campo.

Sobre a confiabilidade dos dados, os entrevistados não perceberam erros ou encerramentos repentinos. Eles utilizaram uma versão do aplicativo baixada após ajustes no código feitos para evitar esses problemas. Assim como mostrado no estudo de campo, os entrevistados perceberem correspondência entre os elementos reais e os elementos virtuais do Gêmeo Digital. Foi perguntado também aos entrevistados (questão 16) em que grau os procedimentos utilizados para coletar os dados (sequência de leitura pré-definida, por exemplo) garantem a confiabilidade da leitura. E1 e TE2 escolheram o valor 4 (satisfatório). De acordo com o estudo de campo, os procedimentos adotados funcionam de maneira eficaz, desde que sejam devidamente cumpridos pelo operador. Caso não sejam devidamente cumpridos, porém, podem se tornar uma fonte de erro para o sistema.

Visualização dos dados: em relação a forma de apresentação e visualização de dados no aplicativo, os entrevistados E1 e TE2 E1 consideraram satisfatório e muito satisfatório, respectivamente.

Generalização: com relação a possibilidade de generalização, os resultados das entrevistas mostraram boa capacidade do sistema de ser generalizado para outros contextos (Figura 86). Os entrevistados (TE1 e E1) consideram de muito satisfatória a satisfatória a adaptação do sistema para outros recursos, e como satisfatória a adaptação do sistema para quaisquer tipos de canteiro.

Figura 86 - Avaliação da generalização.



Fonte: Autora (2021).

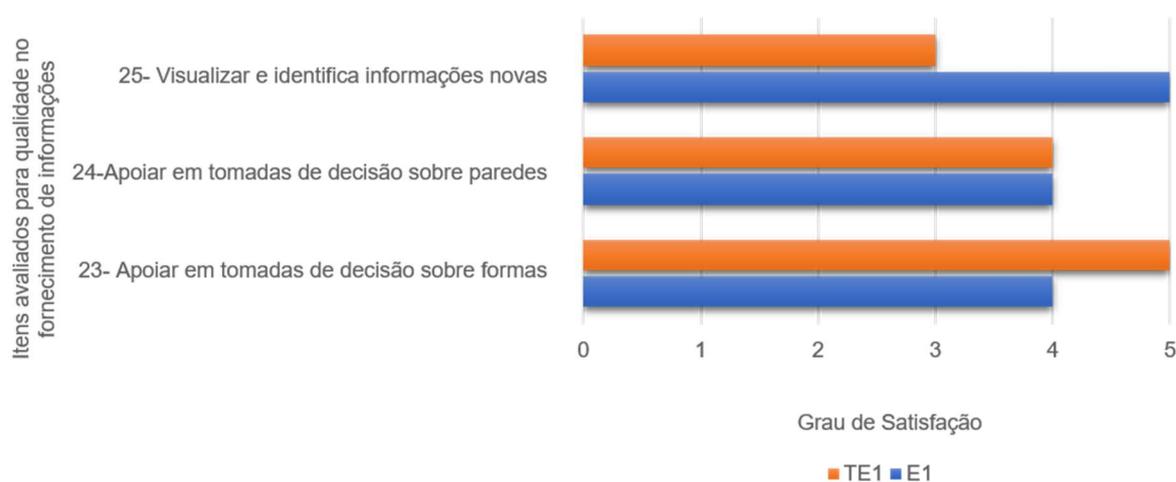
5.3.2 Constructo Transparência

A avaliação do constructo transparência compreendeu a análise da qualidade no fornecimento de informações pelo sistema e simplicidade e rapidez no entendimento das informações do sistema, conforme será apresentado a seguir.

Qualidade no fornecimento de informações: os entrevistados consideram que a qualidade das informações foi satisfatória para apoiar tomadas e decisão sobre formas e paredes,

com valores iguais ou superiores a 4 (Figura 87). De acordo com os estudos de campo, a maneira como as informações são exibidas no Gêmeo Digital tem potencial para apoiar decisões tanto na obra quanto no escritório. Sobre a capacidade intermediária de permitir visualizar e identificar intercorrências e padrões (ou seja, informações novas) que não poderiam ser observados sem o uso do aplicativo, TE1 considerou que o sistema tem capacidade intermediária. No estudo de campo observou-se que na obra não havia nenhuma informação sobre as formas. Destaca-se como informações novas o registro de características físicas, defeitos e manutenções em um ambiente integrado que possibilita posteriores análises dos dados e geração de relatórios.

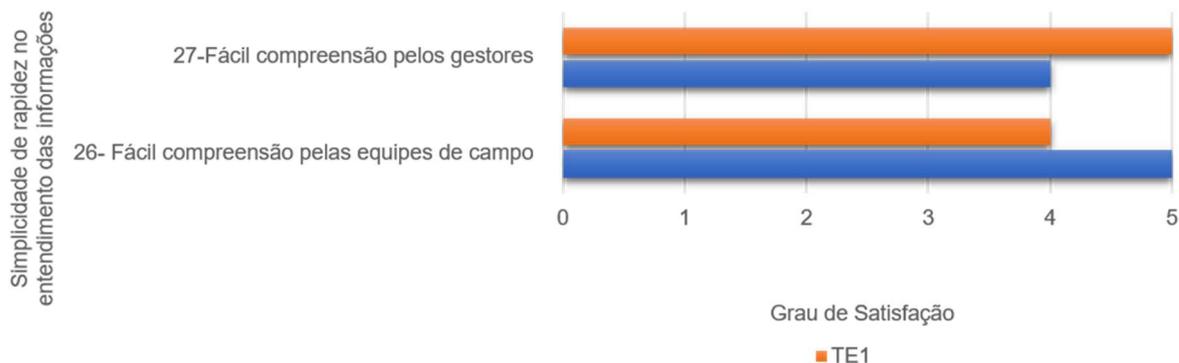
Figura 87 - Avaliação da qualidade no fornecimento de informações.



Fonte: Autora (2021).

Simplicidade e rapidez no entendimento das informações: para os entrevistados E1 e TE1 foi considerada satisfatória a variável simplicidade e rapidez no entendimento das informações (Figura 88). Além disso, com base no *feedback* de trabalhadores da obra e de funcionários do escritório ao longo do estudo, considera-se que o aplicativo fornece informações de maneira simples e rápida.

Figura 88 - Avaliação da simplicidade e rapidez no entendimento das informações.



Fonte: Autora (2021).

5.4 AVALIAÇÃO DE REQUISITOS DO CLIENTE

Essa seção apresenta a avaliação de requisitos do cliente, considerando os constructo e variáveis definidas. A referência da numeração nos itens avaliados corresponde ao número das respectivas questões feitas aos entrevistados do Grupo 2, que podem ser consultadas no **Apêndice 3**.

Os entrevistados foram: Coordenadora de Obras (CO), Trainee Gerencial (TG), Estagiário 1 (E1), Estagiário 2 (E2), Estagiário 3 (E3), Técnica em Edificações (TE1), Técnico em Edificações (TE2), Técnico em Segurança (TS), Gerente de Sistema de Gestão Integrado (GS), Analista BIM (AB) e Coordenadora de Qualidade (CQ). A amostra total é de 11 pessoas.

5.4.1 Constructo Utilidade

A avaliação do constructo utilidade contempla a análise das variáveis benefícios e dificuldades, custo / benefício e adequação do sistema às necessidades da empresa, conforme será apresentado a seguir.

Benefícios e Dificuldades: o gráfico da Figura 89 indica o grau de satisfação dos entrevistados com a capacidade do sistema de atuar nos itens indicados, gerando benefícios. O valor 5 indica o grau máximo de satisfação e o valor 1 indica o grau mínimo de satisfação.

Figura 89 - Avaliação de benefícios.



Fonte: Autora (2021).

Todos os valores no gráfico foram iguais ou superiores a 4, o que indica que os benefícios foram considerados, de modo geral, satisfatórios pelos 11 entrevistados. A média aritmética dos valores médios do gráfico é 4,57. Os resultados da etapa de testes dos módulos do sistema e de implementação do sistema na Obra C também são fontes de evidência de que o aplicativo foi eficaz em: (a) registrar e exibir as características físicas na função de Cadastrar Nova Forma (100 formas cadastradas), (b) registrar e exibir defeitos e manutenções nas funções Registrar Defeito e Registrar Manutenção (mais de 100 defeitos cadastrados), e (c) apoiar a sequência de montagem das formas no módulo de Inserir Sequência (mais de 100 sequências cadastradas).

A redução de não conformidades nas paredes, retrabalho, perdas de formas e melhoria na preservação e integridade das formas foram percebidas pelos 11 entrevistados como uma consequência da eficácia do sistema, principalmente, considerando os itens anteriores. Por conta disso, os entrevistados também consideram que o sistema gera impactos na redução de custos. De acordo com a percepção da pesquisadora no estudo de campo e com os *feedbacks* das equipes de obra, esse potencial de redução de custos é tanto com equipes para retrabalho a ser realizado no serviço de tratamento interno, quanto com a compra componentes das placas.

Foi perguntado aos entrevistados (questão 10) quais seriam as principais dificuldades de implementação do sistema na empresa. Os principais aspectos mencionados estão apresentados no Quadro 25.

Quadro 25 - Dificuldades Identificadas pelos entrevistados para implementação do sistema na empresa.

Entrevistado	Dificuldade Identificada
CO	A dificuldade se dá no tempo que deve ser dedicado à utilização do aplicativo, pois teria que ficar um estagiário/técnico " <i>full-time</i> " neste serviço, fazendo o acompanhamento em tempo real da desmontagem/montagem das formas.
TG	Mão de obra para alimentar e gerenciar as informações corretamente.
E1	Haverá resistência na prática pelo fato do tempo que seria doado para fazer rodar esse sistema, pelo menos no início.
E2	Falta de pessoal para executar o sistema diariamente.
E3	A empresa acreditar na eficácia real, porque são estudos. Disponibilidade da empresa em apostar em algo novo e único. A empresa pode ter relutância sobre o mesmo. A empresa enxergar custos e lucros.
TE1	Que o aplicativo seja apto a rodar em todos os sistemas operacionais.
TE2	Não encontrou dificuldades na implementação do sistema na empresa.
TS	Necessidade de pessoal treinado para operação do sistema. Preservação dos <i>tags</i> de identificação dentro da forma. Assertividade no apontamento dos defeitos e disponibilidade de peças de substituição para quando a peça identificada com defeito seja reparada.
GS	Distância do Leitor, manutenção da tag e disciplina do usuário do sistema.
AB	Ter alguém que estará em campo sempre realizando a coleta dos dados. A depender de como será disponibilizada a ferramenta para a empresa, talvez uma dificuldade seja o suporte para resolução de bugs. Limitações devido à internet da obra não ser confiável (existem obras que passam alguns dias sem internet) e não ser tão veloz.
CQ	Mão de obra qualificada para operar o sistema

Fonte: Autora (2021).

A principal dificuldade apontada pelos entrevistados é com relação à mão de obra necessária para operar o sistema, em termos de custo e de tempo. Tendo como fonte de evidência o estudo de campo piloto, a captura de sequência em um apartamento dura apenas alguns minutos, porém, alguns entrevistados apontaram que existe um custo associado ao deslocamento do operador do escritório da obra até o bloco. Além disso, existe o tempo necessário para inspecionar e registrar informações sobre as formas e paredes, que é variável. Os gestores também precisariam de um tempo para analisar as informações obtidas com o sistema e tomar decisões. Também foi apontada como dificuldade a possível resistência da empresa de absorver uma nova tecnologia e da necessidade de compreender melhor os custos associados. Algumas dificuldades também foram levantadas com relação à infraestrutura, que já foi discutida anteriormente. De modo geral, de acordo com a percepção da pesquisadora, essas dificuldades devem ser observadas, mas não superam os benefícios.

Custo / Benefício: foi perguntado aos entrevistados (questão 11) em que grau o custo / benefício da infraestrutura física do sistema é considerada satisfatório, considerando que o

custo final da parte física na implementação do sistema, seguindo os mesmos parâmetros atuais, corresponderia a cerca de 1% do preço de um jogo de formas. A média de satisfação dos 11 entrevistados para esse item foi **4,73**.

Adequação do sistema às necessidades da empresa: a Figura 90 mostra que todos os valores no gráfico foram iguais ou superiores a 4, o que indica que a adequação do sistema às necessidades da empresa foi considerada satisfatória pelos 11 entrevistados. Os resultados da etapa de testes dos módulos do sistema e de implementação do sistema na Obra C também são fontes de evidência de que o sistema tem potencial para melhorar o controle formal das formas à medida que fornece informações que apoiam em tomadas de decisão, sejam elas na obra ou no escritório, já que o sistema pode ser acessado de qualquer local. A média aritmética dos valores médios do gráfico é 4,45. Foi perguntado aos entrevistados (questão 13) que áreas na empresa podem sofrer maior impacto após a implementação do sistema e as áreas apontadas foram: Qualidade, Produção, Planejamento e Alta Gerência.

Figura 90 - Avaliação de adequação às necessidades da empresa.



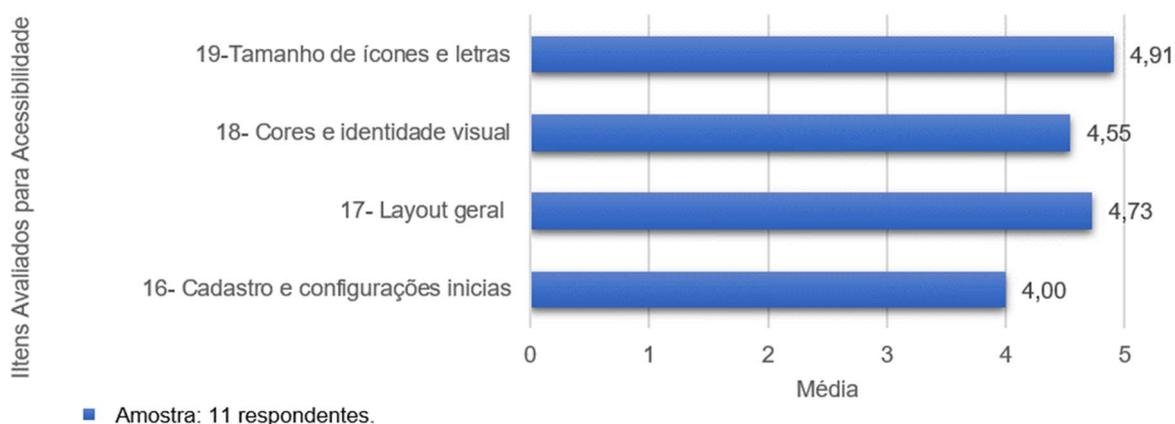
Fonte: Autora (2021).

5.4.2 Constructo Usabilidade

A avaliação do constructo usabilidade contempla a análise da variável acessibilidade, conforme será apresentado a seguir.

Acessibilidade: a Figura 91 aponta que todos os valores no gráfico foram iguais ou superiores a 4, o que indica que a acessibilidade foi considerada, de modo geral, satisfatória pelos 11 entrevistados. Os *feedbacks* das equipes de obra nas etapas de testes dos módulos do sistema e de implementação do sistema na Obra C também são fontes de evidência de que o sistema possui uma interface agradável e acessível, com ícones e fontes bem visíveis.

Figura 91 - Avaliação de acessibilidade.



Fonte: Autora (2021).

Foi ainda perguntado aos entrevistados (questão 20) se o uso do aplicativo é intuitivo e 100% dos entrevistados responderam que sim. Também foi perguntado aos entrevistados (questão 21) se o funcionamento de cada um dos módulos está claro e 100% dos entrevistados responderam que sim.

Os 11 entrevistados foram convidados a fazer, caso quisessem, comentários gerais sobre o sistema. No Quadro 26 estão apresentadas as transcrições.

Quadro 26 - Comentários finais dos entrevistados.

Entrevistado	Comentários Finais
CO	“Aplicativo bem interessante, principalmente para o acompanhamento da necessidade de manutenção das formas de forma individual, ficando evidente os desgastes/defeitos mais frequentes e acredito que consigamos com isso identificar também os colaboradores que tendem a danificar mais o material”.
TG	Sobre as questões 2 e 3: “Em ambas as perguntas 2 e 3 a o bom funcionamento o sistema está vinculado ao preenchimento adequado das informações no momento da inspeção”. Sobre a questão 7: “Potencial muito bom. Incluiria neste item a viabilidade de uso de rastreadores para localizar as placas se estas sumirem do local de montagem”.
E1	“Gostei do sistema, espero que em breve possamos estar utilizando para obtermos os resultados esperados”.
E2	“Com treinamento de pessoal e uso correto do sistema, a tendência dos processos de construção com a forma é ficarem ainda mais velozes, impactando diretamente na parte financeira, produtiva e de planejamento”.
E3	“Em tudo que me foi apresentado, só fiquei preocupado com a preservação do equipamento que fica diretamente fico forma. Um ponto a ser levado em consideração é buscar a melhor forma de protegê-lo. Assim, diminuindo o custo do sistema”.
TE1	“O sistema, se for usado apenas pela equipe de gestão, terá resultados muito positivos”.
TE2	“Possíveis melhorias seria adaptar a um rastreamento devido a possíveis roubos e nomenclatura mais claras”.

Fonte: Autora (2021).

5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Considerando as lacunas identificadas no problema de pesquisa, no presente estudo houve um esforço para atender as recomendações de Fang *et al.* (2016) no estabelecimento de critérios práticos e técnicos visando à implementação do sistema. Os referidos autores ressaltaram a importância de observar aspectos como boa capacidade de rastreamento, infraestrutura mínima, precisão aceitável, facilidade de uso, latência, visualização de dados e compartilhamento remoto das informações para assegurar a validade técnica e científica de sistemas de rastreamento. Todos esses aspectos foram observados, atendidos e avaliados positivamente ao longo do desenvolvimento, dos testes e da implementação piloto do sistema.

O presente estudo contribui no avanço sobre estudos de “sistemas robustos de localização interna de recursos da construção”, conforme apontado por Fang *et al.* (2016). O Gêmeo Digital atendeu ao desafio apontado pelos referidos autores, de contemplar o rastreamento progressivo do *status* da construção e de recursos do canteiro de forma associada ao progresso da construção. Por exemplo, as informações sobre as sequências de montagem das formas metálicas foram automaticamente atribuídas ao BIM “conforme construído” e não apenas “conforme planejado”. Isso foi possível a partir da associação da solução tecnológica com os procedimentos práticos definidos para a coleta de dados. No futuro, é importante buscar formas de automatizar esses procedimentos práticos para reduzir a possibilidade de falhas e manter contínua a frequência de coleta de dados em campo.

Um outro esforço feito neste estudo foi o de verificação e validação das diretrizes propostas por Xue *et al.* (2018) para conexão de RFID e BIM. Conforme essas diretrizes, no presente foi (1) selecionado o sistema RFID com *tags* passivas e leitor móvel, o padrão de visualização do BIM em 3D e o plano de armazenamento dos dados em um banco de dados não relacional; (2) definido o esquema de codificação de dados no RFID e compatibilizado com esquema de dados do BIM através do uso de parâmetros de identidade e de uma estrutural lógica; (3) instalado o sistema RFID em campo; (4) desenvolvido o *gateway* para comunicação entre RFID e BIM, que foi depois incorporado ao dispositivo móvel; e (5) feito o processamento e armazenamento as informações. Os resultados positivos validam a generalização das diretrizes de Xue *et al.* (2018) para o sistema construtivo de paredes de concreto, o que indica que também podem ser aplicadas em outros contextos.

Com relação à integração de IoT e BIM, considerando as reflexões de Dave *et al.* (2018), o presente estudo avança no conhecimento à medida que apresentou uma aplicação prática, testada em um projeto real da integração. A escolha de desenvolver um aplicativo que integra todos os módulos do sistema foi uma tentativa de contemplar a reflexão feita por Tang *et al.* (2019), que destacou a necessidade de estudos que apresentassem soluções para integração

de BIM e IoT em estruturas unificadas, e não dispersas, para integrar os dispositivos e ao mesmo tempo compartilhar as informações pela Internet. Nesse sentido, todas as funções do sistema são acessadas no ambiente unificado do aplicativo.

Tang *et al.* (2019) destacaram ainda a necessidade de investigação da Computação em Nuvem na integração de BIM e IoT. A principal contribuição do presente estudo nesse sentido foi o uso de um banco de dados não relacional em Nuvem, que é o Firebase. Na revisão da literatura, os autores que exploraram a Computação em Nuvem utilizavam apenas bancos de dados relacionais. Os testes e estudos de campo apresentados demonstraram a viabilidade técnica da utilização de um banco de dados não relacionais na integração de BIM e IoT, contemplando boa velocidade de operação e interoperabilidade com o modelo BIM. Recomenda-se que esta solução seja testada em outros contextos e comparada com bancos relacionais.

Com relação à verificação de qualidade, baseado nas reflexões de MA *et al.* (2018), buscou-se com o aplicativo apoiar a inspeção das formas e paredes para evitar que estes procedimentos fossem feitos com métodos manuais ou com tecnologias dispersas e sem integração. O sistema coletou, armazenou e exibiu os dados de qualidade das formas e paredes de maneira integrada, visando tornar o processo mais eficiente e menos suscetível a falhas que comprometem o gerenciamento da qualidade.

No que se refere ao problema de comunicação dos resultados da inspeção pontuado por Ma *et al.* (2018), o Gêmeo Digital desenvolvido comunicou de maneira clara e visual esses resultados para todos os usuários do sistema. Apesar do avanço, o sistema teve como limitação a dependência da assertividade do operador no apontamento dos defeitos, manutenções e não conformidades. Uma oportunidade de melhoria é o uso de Inteligência Artificial para reconhecer problemas automaticamente. O presente estudo atendeu também a um dos desafios indicados por Ma *et al.* 2018, de estabelecer com eficácia uma correspondência entre os elementos no BIM e os objetos no local.

Com relação à contribuição prática na unidade de análise adotada (sistema construtivo de paredes de concreto), o estudo de campo piloto mostrou o potencial de controlar a integridade, vida útil e sequência de montagem das formas metálicas, contribuir indiretamente na redução de não conformidade e na redução de retrabalho e atraso em função de problemas de variabilidade nas paredes e de melhorar a qualidade do processo construtivo. A seguir, são discutidos aspectos mais gerais do sistema desenvolvido.

Generalização para outros canteiros: de acordo com os estudos desenvolvidos por Fang *et al.* (2016), um dos desafios do rastreamento de recursos móveis em obras com RFID é garantir escalabilidade suficiente para permitir a implementação em larga escala para qualquer canteiro genérico. De uma maneira geral, a estrutura conceitual e os critérios técnicos

adotados para a especificação das ferramentas neste estudo, com separação por camadas de uso, servem como referência para integração de BIM e IoT em outros contextos.

Com relação à escalabilidade do sistema integrado, os resultados e análises mostraram que ele é escalável para outros tipos de canteiro. Para a infraestrutura física seria necessário a compra de *tags* em quantidade suficiente para cada elemento de interesse e de, no mínimo, um leitor e um dispositivo móvel por obra. O aplicativo já foi desenvolvido para lidar com diferentes obras e volumes de dados, porém, podem ser necessários ajustes na estrutura lógica para se adequar a tipologias diferentes de edifícios. Uma melhoria técnica importante no sistema seria o uso de leitores mais robustos, como o TSL 1128 da fabricante Technology Solutions (TSL) e o RFD8500 da fabricante Zebra, que preveem maior durabilidade, precisão e alcance de leitura. Também seria possível adaptar o sistema para incluir outras tecnologias, como o GPS (localização de elementos externos) e a Inteligência Artificial (reconhecimento automático de padrões de defeitos nas imagens cadastradas).

Generalização para outros recursos físicos: uma lacuna observada na literatura na RSL é que a maioria dos autores, como o de Costin, Teizen e Schoner (2015), Fang et al. (2016) e Iacovidou, Purnell e Lim (2018), não deram indicações claras sobre como ampliar os seus estudos para o rastreamento de outros recursos físicos. No presente estudo, os resultados e a análises mostraram que os módulos do sistema integrado podem ser utilizados no rastreamento de outros tipos de recursos físicos, considerando-se os devidos ajustes.

De uma maneira geral, o sistema foi construído para aplicar a lógica do gerenciamento e controle de obras descrita por Navon (2007) e Del Pico (2013) ao rastreamento de recursos físicos. Assim, foram gerados ciclos de *feedback* da obra, com dados de qualidade coletados em tempo hábil, para o processo de identificação de desvios, análise de causas e tomada de decisão sobre as formas. O fornecimento de informações mais rápidas e precisas no Gêmeo Digital reduz o potencial de dano e apoia ações corretivas, enquanto que o armazenamento das informações coletadas gera um histórico a ser analisado para apoiar ações preventivas. Esta mesma lógica pode ser generalizada para o rastreamento de qualquer recurso físico.

Com relação aos aspectos técnicos, os módulos Configuração de Usuário e Configuração de Leitor são generalizáveis para qualquer aplicação. No Módulo de Manutenção, as funções de Cadastrar Forma, Alterar Forma, Histórico Registros e Procurar Aproximação podem ser adaptadas para diferentes recursos físicos sem alteração na lógica geral de funcionamento. Cadastrar Forma e Alterar Forma, por exemplo, funcionam de maneira semelhante a um controle de estoque. A adaptação incluiria apenas uma variação, se necessário, nos tipos de dados de entrada (altura, largura, espessura e peso) e no tipo de *tag* passiva utilizada, que

deve ser adequada às características do recurso e às condições de uso. Exemplos de recursos que poderiam ser cadastrados são equipamentos, ferramentas, materiais do almoxarifado, equipamentos de proteção individual e coletiva, pallets, kits hidráulicos e elétricos, pré-moldados de concreto e peças de estruturas de madeira ou aço.

A função de Procurar Aproximação poderia ser melhor aproveitada para evitar furtos na obra se fosse associada também à leitores fixos do tipo portal, que ficariam posicionados para controlar a entrada e a saída do recurso no canteiro. As funções de Registrar Defeitos e Registrar Manutenções podem ser utilizadas na fase de construção principalmente em recursos físicos como equipamentos e estruturas temporárias, como andaimes e containers, que são reutilizadas em diferentes obras. Na fase de operação do edifício, elas podem ser utilizadas principalmente em pré-moldados de concreto e peças de estruturas de madeira ou aço para apoiar manutenções corretivas. Desta forma, o cadastro do defeito indica a demanda por ações corretivas, enquanto que o registro da manutenção gera um histórico e dados para planejamento de ações preventivas.

O módulo de Inserir Sequência pode ser aplicado também para evitar instalações incorretas de kits hidráulicos e elétricos, peças pré-moldadas de concreto e peças de estruturas de madeira ou aço, uma vez que compara uma sequência de referência com uma sequência real de montagem e aponta erros. O módulo pode ser agregado às soluções propostas por Feng et al. (2015), Li X. et al. (2018), Li C. et al. (2018), Li et al. (2017), Xue et al. (2018), Zhong et al. (2017), Zhong et al. (2015), Ikonen et al. (2013) e Ma, Jiang e Shang (2019), que lidaram com elementos de construção pré-fabricados / pré-montados. Ajustes podem ser necessários na nomenclatura e nos níveis da estrutura lógica apresentada na seção 5.2.2, o que também vale para o Módulo BIM.

Com relação ao Módulo BIM, o Gêmeo Digital também pode ser adaptado para representar outros recursos como pré-fabricados / pré-montados e peças de estruturas de madeira ou aço, sendo necessário redefinir o esquema de dados e estrutura lógica, fazer a representação virtual do recurso físico (criar e posicionar os elementos virtuais no modelo) e atribuir os parâmetros de identidade necessários ao projeto. O uso e avaliação positiva do Forge representa uma contribuição importante para outros estudos, como alternativa ao uso de um *Game Engine*, como foi proposto por Tang et al. (2019). É possível representar materiais, equipamentos e pessoas no modelo derivado, conforme necessário.

Sobre a integração tecnológica de IoT e BIM, os resultados corroboram com as discussões feitas por Tang et al. (2019), ou seja, no estudo de campo o BIM foi eficaz como repositório de dados para informações contextuais e a IoT foi eficaz ao fornecer status da fase de construção. A lógica de associar ambientes físicos e virtuais representa um grande potencial

de uso em sistemas para rastrear qualquer tipo de recurso físico em qualquer fase da obra. Com relação ao método de integração proposto por Tang et al. (2019) que foi utilizado no presente estudo (APIs de ferramentas BIM em conjunto com banco de dados relacional), algumas adaptações e considerações foram feitas: (i) o banco de dados foi não relacional; (ii) os dados foram exportados com uma API do Forge; (iii) o esquema de dados foi feito com base em parâmetros de identidade, (iv) as importação e exportações bidirecionais foram com o banco de dados não relacional; e (v) o processo de consultas foi centralizado no Forge.

Viabilidade técnica e financeira: Fang et al. (2016) afirmaram que RFID chama a atenção de pesquisadores e profissionais da construção devido ao seu nível de maturidade tecnológica e infraestrutura relativamente econômica. A avaliação da infraestrutura física e do desempenho das funções dos módulos indicaram que o sistema é viável tecnicamente. Com relação à viabilidade financeira, seguindo os mesmos parâmetros atuais, o custo final da parte física na implementação do sistema em uma obra corresponderia a menos de 1% do preço da compra de um jogo de formas. Custos complementares não avaliados incluiriam assinatura do Forge e do Firebase, que variam com o volume de dados, assistência técnica do sistema e o custo de mão de obra, considerando o tempo a ser dedicado diariamente pelo operador para rodar o sistema. Ainda assim, o sistema atual indica viabilidade financeira.

Papel das empresas de construção e indústria da construção: apesar dos benefícios, um desafio para o uso de sistemas como esse nas empresas de construção continua sendo o desconhecimento do potencial das tecnologias e da sua capacidade de integração, como foi pontuado por Oliveira e Serra (2017). Além disso, ainda existe uma significativa resistência e conservadorismo quanto a mudar processos tradicionais de produção e de gestão. Conforme apontado por Sawhney; Riley; Irizarry (2020), espera-se que a Construção 4.0 forneça o contexto estratégico, tático e operacional para impulsionar as empresas a cumprirem seu papel de protagonistas na transformação digital da construção civil. Espera-se também o BIM, com todos os benefícios apontados na revisão da literatura, seja uma porta de entrada para que pequenas, médias e grandes empresas possam conhecer, absorver e utilizar também outras novas tecnologias. Cabe também às empresas reconhecer o potencial de soluções, equipes e ecossistemas digitais multidisciplinares para resolver problemas.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O presente estudo teve como principal objetivo propor um sistema para rastrear recursos físicos no canteiro de obras por meio da integração da IoT com o BIM, visando facilitar o gerenciamento das formas metálicas do sistema construtivo de paredes de concreto moldadas *in loco*.

Foram ainda definidos os seguintes objetivos secundários, que foram convertidos em subprodutos do estudo: (a) Identificar *in loco* as características físicas, funcionais e de movimentação de recursos físicos no canteiro de obras, tendo como foco as formas metálicas; (b) Identificar requisitos para o desenvolvimento de um sistema com IoT e RFID associados ao BIM para rastrear recursos físicos ao longo da obra; (c) Desenvolver um protótipo de sistema para facilitar o processo de coleta, armazenamento e gerenciamento dos dados necessários para rastrear formas metálicas visando melhorias na qualidade das paredes de concreto moldadas *in loco*; (d) Avaliar o desempenho, o fluxo de informações e os requisitos dos clientes do protótipo do sistema proposto a partir de implementação piloto na obra.

Diante do que foi apresentado e discutido ao longo deste trabalho, considera-se que todos os objetivos traçados foram atendidos, tendo culminado nas contribuições teóricas e práticas da pesquisa. As considerações são apresentadas a seguir.

Ainda nos capítulos conceituais, a RSL realizada cumpriu o propósito de identificar quais são os principais requisitos técnicos para o desenvolvimento de um sistema RFID / IoT / BIM para rastrear formas metálicas do sistema construtivo de paredes de concreto moldadas *in loco*, que foi objeto de estudo deste trabalho, tendo como base estudos da literatura que utilizaram tecnologias e métodos de rastreamento para outros tipos de recursos físicos da construção civil. Como contribuições teóricas, os resultados, discussões e conclusões obtidos a partir da RSL e ao longo da revisão da literatura foram sintetizados na estrutura conceitual apresentada na seção 3.4.

Neste trabalho também foram discutidos o mapeamento do processo construtivo de paredes de concreto e o diagnóstico para as formas metálicas, resultando na identificação de características físicas, funcionais e de movimentação das formas e de recursos físicos relacionados. Desta forma, foram identificados os principais requisitos de obra relacionados às formas em seu contexto de uso. O diagnóstico realizado a partir do mapeamento do processo teve como resultado a identificação de uma série de problemas relacionados ao gerenciamento das formas, tais como desgaste excessivo, montagem em sequência incorreta, desvios e ausência de registros de informações. Foram identificadas ainda as possíveis consequências negativas para a obra e para a empresa, tais como dificuldade de controlar a qualidade,

dificuldade de controlar o processo, não conformidade e retrabalho. As reflexões geradas serviram como base para a elaboração do sistema integrado desenvolvido.

O artefato do estudo foi o sistema para rastreamento e gestão de recursos físicos integrando IoT e BIM, aplicado às formas metálicas. Esse sistema foi desenvolvido com sucesso no presente estudo, em nível de protótipo funcional, sendo capaz de envolver o processo de coleta, armazenamento, gerenciamento e visualização de dados de maneira integrada. A partir das evidências apontadas pelos testes, implementação piloto e percepção da equipe da obra, entende-se que o sistema tem potencial para melhorar o fluxo de informações nos canteiros de obras que utilizam o sistema de parede de concreto moldado *in loco*, com a disponibilização de dados coletados de maneira clara e visual, além de auxiliar na tomada de decisão dos gestores e promover melhorias em termos de gestão e controle da qualidade de recursos físicos, representando uma solução relevante para o setor da construção civil.

Uma das principais contribuições teóricas e práticas relacionadas ao sistema foi a criação do Gêmeo Digital das paredes e formas, que foi desenvolvido a partir de uma estrutura geral elaborada com base na literatura e nos testes realizados. Essa estrutura incluiu o a preparação do modelo BIM e do modelo derivado no Forge, o desenvolvimento de rotinas baseadas nos requisitos de obra, a hospedagem do modelo derivado na Web e a organização do banco de dados. Em geral, observou-se um grande potencial de uso dos Gêmeo Digital para aplicações na construção civil.

Com relação aos aspectos técnicos, o banco de dados não relacional (Firebase) teve um bom desempenho como banco de dados principal, garantindo a correspondência das informações do mundo físico com as informações do BIM. As informações inseridas no banco de dados através da leitura das formas foram representadas com sucesso no Forge, considerando as três rotinas desenvolvidas e apresentadas. O Acompanhamento de Progresso da Obra representou com eficiência as simulações de progresso da construção dos pavimentos, a Dashboard das Formas exibiu as informações mais atualizadas do canteiro e a Visualização do Estado de Manutenção possibilitou a visualização da integridade física das formas e sua localização no modelo. Porém, nesta última rotina, embora os dados solicitados no banco de dados retornem ao modelo de forma efetiva, sem perdas de informações, ocorreram atrasos na mudança de status.

O Forge, por sua vez, atendeu aos requisitos de integração com o banco de dados, possibilidade de programação dos status, boa qualidade das imagens e possibilidade de desenvolvimento de novas ferramentas. Os testes realizados demonstraram uma boa comuni-

cação da plataforma com o Firebase, consistência nas informações e facilidade de desenvolvimento de novas aplicações. Portanto, foi possível integrar as informações do mundo físico com as do modelo virtual e atualizar as informações.

Uma outra contribuição prática importante deste estudo relacionada ao sistema foi o desenvolvimento do aplicativo Smart Twins 4.0, acessível por dispositivos móveis que utilizam o sistema operacional Android. O aplicativo teve sucesso como interface de acesso (*Front-End*) para os usuários e concentrou as funcionalidades (*Back-End*) de controle da quantidade de formas, controle dos defeitos das formas e controle de manutenções das formas, além de receber o Gêmeo Digital e de apoiar no controle da qualidade das paredes.

Um das principais dificuldades enfrentadas em campo foi o alcance e a estabilidade da rede sem fio utilizada no dispositivo móvel (4G). Por causa desta dificuldade, algumas funções do aplicativo foram adaptadas para funcionar também *off-line*, mas as que permaneceram *online* apresentaram atrasos na exibição dos dados. De modo geral, os resultados alcançados com o protótipo funcional foram considerados positivos, mas para tornar o sistema adequado à uma implementação real, seria importante no futuro otimizar as funções e incluir regras de segurança para proteger os dados das empresas.

Os estudos de campo realizados com o aplicativo tiveram como resultado a validação da aplicabilidade do sistema em um canteiro de obras real, contemplando a sua implementação piloto. Antes da implementação piloto ocorreu a preparação da infraestrutura física, testes e coleta de dados para realizar ajustes no aplicativo e o acompanhamento de serviços para coletar dados complementares. Os testes validaram a viabilidade técnica do sistema e o seu potencial de melhorar o controle formal e preservar a integridade das formas, além de apoiar na lógica de montagem e identificar possíveis desvios. O Quadro 18 resumiu os 16 pontos positivos e 16 oportunidades de melhoria do sistema extraídos dessa etapa de testes. Como contribuição prática, além da proposição do sistema, também foram listadas algumas recomendações para a implementação, incluindo a definição do plano de leitura, a elaboração de um *check-list* para uso e a indicação de boas práticas para a coleta de dados.

A implementação piloto permitiu verificar o desempenho da infraestrutura em seu contexto de uso na obra. Verificou-se que 7 *tags* sofreram algum tipo de dano e 1 foi perdida. O potencial de dano físico devido ao contato com o concreto foi pouco significativo com relação ao potencial de dano devido a golpes do martelo. Durante a implementação piloto foram registrados com sucesso 124 ocorrências de defeitos e foram discutidas algumas possibilidades de filtros desses dados, a serem incorporados futuramente na geração automática de relatórios. Também foram registradas 86 sequências de montagem, sendo que o tempo de leitura

de cada uma não ultrapassou 1 minuto. Os resultados indicaram um nível satisfatório de funcionamento. Também foram identificados no Quadro 23 os principais potenciais do sistema para apoiar tomadas de decisão.

A avaliação do desempenho do sistema e dos requisitos do cliente foi feita após a implementação piloto, considerando os constructos e variáveis definidas. As fontes de evidência foram entrevistas, testes do sistema e *feedbacks* da equipe de campo. A avaliação do constructo funcionalidade contemplou a análise das variáveis adequação da infraestrutura física, interferências e riscos durante o funcionamento, nível de precisão das leituras, latência dos dados e confiabilidade dos dados, visualização dos dados e generalização. Os resultados indicaram que o sistema teve uma funcionalidade considerada satisfatória em todos os itens analisados, exceto naqueles da variável de interferências e risco, devido a interferência que a presença do operador pode gerar no fluxo de montagem das formas. A avaliação do constructo transparência compreendeu a análise da qualidade no fornecimento de informações pelo sistema e simplicidade e rapidez no entendimento das informações do sistema. Os resultados indicaram um nível satisfatório de transparência do sistema.

A avaliação do constructo utilidade contemplou a análise das variáveis benefícios e dificuldades, custo / benefício e adequação do sistema às necessidades da empresa. A avaliação do constructo de usabilidade contemplou a análise da variável acessibilidade. Os resultados indicaram um nível satisfatório de utilidade e usabilidade do sistema. Concluiu-se que, a partir dos resultados da avaliação, o sistema apresentou um bom desempenho geral e atendeu adequadamente aos requisitos do cliente.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com relação aos Gêmeos Digitais ainda existem lacunas e oportunidade de pesquisa para aplicação no monitoramento, controle e gestão da produção, com o uso integrado de BIM, tecnologias digitais e Inteligência Artificial. Futuros estudos são necessários para o desenvolvimento de sistema integrado que utiliza Gêmeos Digitais para o rastreamento de outros recursos físicos em canteiros de obras do sistema construtivo de paredes de concreto, incluindo procedimentos necessários de aquisição e interpretação de dados de status, armazenamento de dados e interações entre os sistemas representados e reais.

O funcionamento do sistema se basearia na integração de tecnologias digitais, centralizadas no uso de BIM e IoT. Para a aquisição de dados poderia ser investigada a possibilidade de utilização de GPS, *beacons*, nuvens de pontos, Veículo Aéreo não Tripulado (VANT), sensores de varredura à laser e informações de imagens de câmeras comuns, 360° ou infravermelho, além do RFID, entre outros. Além disso, as aplicações desenvolvidas podem ser automatizadas e aperfeiçoadas com algoritmos de Inteligência Artificial.

Do ponto de vista do sistema integrado, recomenda-se que no futuro seja testada a possibilidade de colocar as *tags* no interior das costelas, que seja melhor avaliado quais as características físicas mais relevantes para serem registradas no aplicativo (por exemplo, espessura não foi considerado importante), que seja mensurado a porcentagem de retrabalho no serviço de tratamento interno que é de fato referente apenas às formas, que os procedimentos práticos de uso do aplicativo sejam automatizados para reduzir a possibilidade de falhas e manter contínua a frequência de coleta de dados em campo, que seja feita a geração automática de relatórios e que seja investigado o uso de Inteligência Artificial para identificação automática de defeitos e padrões, incluindo a comparação automática entre as imagens e formas defeituosas e paredes geradas. Além disso, as regras de segurança precisam ser incluídas.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16055**: Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 35 p.
- ADDOR, M. R. A. *et al.* Colocando o “i” no BIM. **Revista USJT ARQU.URB.** São Paulo, n. 4, p. 104–115, 2010.
- AHSON, A. A.; ILYAS, M. **RFID Handbook**: Applications, Technology, Security, and Privacy, 1. ed. Boca Raton: CRC Press – Taylor & Francis Group, 2008.
- AKANMU, A. A.; ANUMBA, C. J.; MESSNER, J. I. An RTLS-based approach to cyber-physical systems integration in design and construction. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 8, n. 12, 2012. doi: <https://doi.org/10.1155/2012/596845>
- AKANMU, A. *et al.* Auto-generated site layout: an integrated approach to real-time sensing of temporary facilities in infrastructure projects. **Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance**, v. 12, n. 10, p. 1243-1255, 2015. doi: <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1110601>
- AL-FUQAHA, A. *et al.* Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347-2376, 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- ANDERY, M. A. *et al.* **Para compreender a ciência**: uma perspectiva histórica, 14. ed. Rio de Janeiro: Editora EDUC, 2004.
- ANDRADE L. J. S. *et al.* Do device à cloud com a Plataforma SOFT-IoT: sua infraestrutura IoT em poucas horas. In: XXIV Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web: Minicursos, 24., 2018, Salvador. **Anais...** Porto Alegre: SBCOPENLIB, 2018.
- ANDRADE, M. L.; RUSCHEL, R. C. Building Information Modeling (BIM). In: KOWALTOWSKI, D. C. C. K. *et al.* **O processo de projeto em arquitetura**: da teoria à tecnologia, 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 21, p. 421-442, 2011.
- ANDRADE, M. L.; RUSCHEL, R. C. Interoperabilidade de aplicativos BIM usados em arquitetura por meio do formato IFC. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 76-111, 2009. doi: <https://doi.org/10.4237/gtp.v4i2.102>
- ANDROID. Guia do Usuário, 2020. Disponível em: <<https://developer.android.com/studio/intro>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

ARAÚJO, C. *et al.* DESENVOLVIMENTO DE UM SMART GATEWAY PARA CONSTRUÇÃO CIVIL UTILIZANDO BIM, IOT E RFID. In: ptBIM 2020 3º Congresso Português de Building Information Modelling, 2020, Porto. **Proceedings...** Porto: Universidade do Porto, 2020, p. 729-738.

ARMBRUST, M. *et al.* **Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing.** Berkeley: UCB/EECS, 2009. 23 p.

ATZORI, L.; IERA, A., MORABITO, G., The Internet of Things: a survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787-2805, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>

AUTODESK. **Forge**, 2020. Disponível em <<https://forge.autodesk.com/>>. Acesso em: 14 jan. 2020.

AZHAR, S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks and Challenges for the AEC Industry. **ASCE Journal of Leadership and Management in Engineering**, v. 11, n. 3, p. 241-252, 2011. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)

BARBIN, M. V. **Etiqueta de RFID em UHF para objetos metálicos.** 2015. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Univesidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

BOJE, C. *et al.* Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. **Automation in Construction**: v. 114, p. 1-16, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>

BRETTEL, M. *et al.* How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. **International Journal of Information and Communication Engineering**, v.8, n.1, p.47-62, 2014.

CHEN, L.; LUO, H. A BIM-based construction quality management model and its applications. **Automation in Construction**, v. 46, p. 64-73, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.009>

CHEN, M.; MAO, S.; LIU, Y. *Big Data: A Survey.* **Mobile Networks and Applications**, v. 19, p. 171-209, 2014. doi: <https://doi.org/10.1007/s11036-013-0489-0>.

CHENG, T.; TEIZER, J. Real-time Data Collection and Visualization Technology in Construction. In: Construction Research Congress, 2010, Calgary. **Proceedings...** Calgary: ASCE, 2010, p. 339–348.

CLAMPITT, H. G. **RFID Certification Textbook.** Arlington Heights: American RFID Solutions, 2007.

CORDOVA, F.; BRILAKIS, I. On-site 3D vision tracking of construction personnel. In: IGLC16: 16th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 2008, Manchester. **Anais...** Manchester: University of Salford, 2008, p. 809–820.

COSTIN, A. M.; TEIZER, J.; SCHONER, B. RFID and BIM-Enabled Worker Location Tracking to Support Real-Time Building Protocol Control and Data Visualization. **Journal of Information Technology in Construction (ITCON)**, v. 20, p. 495-517, 2015. Disponível em: <<http://www.itcon.org/2015/29>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

DAVE, B. et al. A framework for integrating BIM and IoT through open standards. **Automation in Construction**, v. 95, p. 35–45, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.022>

DEL PICO, W. J. **Project Control: Integrating Cost and Schedule in Construction**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

DEMIRALP, G.; GUVEN, G.; ERGEN, E. Analyzing the Benefits of RFID Technology for Cost Sharing in Construction Supply Chains: a case study on prefabricated precast components. **Automation in Construction**, v. 7, n. 24, p. 120-129, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.005>

DOMINGUE, J. *et al.*, **The Future Internet: Future Internet Assembly 2011: Achievements and Technological Promises**. London: Springer, 2011.

DONG, S.; LI, H.; YIN, Q. Building information modeling in combination with real time location systems and sensors for safety performance enhancement. *Safety Science*, v. 102, p. 226–237, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.011>

DRESCH, A.; LACERDA, D.P.; ANTUNES JR., J.A.V. **Design Science Research: A Method for Science and Technology Advancement**. Switzerland: Springer, 2015.

DUARTE, O. C. M. B.; MONTEIRO, F. V.; PACHECO, G. F. C.; LIMA, L. C. **GTA UFRJ**. 2019. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/10_1/rfid/historia.html>. Acesso em: 18 abr. 2019.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors**, 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**, 1. ed. Tradução de AYRES FILHO, C. et al. Porto Alegre: Bookman, 2014.

FANG, Y.; CHO, Y.; ZHANG, S.; PEREZ, E. A Case Study of BIM and Cloud-enabled Real-time RFID Indoor Localization for Construction Management Applications. **ASCE Journal of**

Construction Engineering and Management, v. 142, n. 7, 2016. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001125)

FENG, C. *et al.* An Intelligent Logistics Management Model in Prefabricated Construction. **Frontiers of Engineering Management**, v. 2, n. 2, p. 178, 2015. doi: <https://doi.org/10.15302/j-fem-2015038>

FERNANDES, L. L. A. **Análise do desempenho ambiental de obras de edificações com base nos indicadores de sustentabilidade do PBQP-H**, 2020, 163 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

FINKENZELLER, K. **RFID Handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and nearfield**, 3. ed. London: John Wiley & Sons, 2010.

FLORIO, W. Contribuições do Building Information Modeling no Processo de Projeto em Arquitetura. In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMACAO E COMUNICACAO NA CONSTRUCAO CIVIL, 3., 2007, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2007.

FORMOSO, C. T.; SANTOS, A.; POWELL, J. A. An Exploratory Study on the Applicability of Process Transparency in Construction Sites. **Journal of Construction Research**, v. 3, n. 1, p. 35-54, 2002.

GAO, X., TANG, S. PISHDAD-BOZORGI, P.; SHELDEN, D. **Foundational Research in Integrated Building Internet of Things (IoT) Data Standards, Center for the Development and Application of Internet of Things Technologies**. Atlanta: Georgia Institute of Technology (Georgia Tech), 2018, 77 p.

GARTNER. Seize the Digital Ecosystem Opportunity, 2017. Disponível em: <<https://www.gartner.com/en/information-technology/insights/cio-agenda>>. Acesso em: 02 ago. 2020

GETEC. Apresentação, 2020. Disponível em: <<http://www.getec.eng.ufba.br/>>. Acesso em: 05 out. 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2010, 184 p.

GIMP. About GIMP, 2020. Disponível em: <<https://www.gimp.org/about/>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

GRIFFOR E. R. *et al.* Framework for Cyber-Physical Systems : Volume 1, Overview. Em: NIST Special Publication 1500-20. 1. ed. Gaithersburg: **Nist**, 2017. doi: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1500-201>

GUBBI, J. *et al.* Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645-1660, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>

HEROKU. Languages, 2020. Disponível em: <<https://www.heroku.com/languages>>. Acesso em: 03 mar. 2019.

HWANG, S.; L., Y. L. BIM for Integration of Automated Real-Time Project Control Systems. In: Construction Research Congress, 2010, Banff. **Anais...** Banff: ASCE, 2020, p. 506-517.

IACOVIDOU, E.; PURNELL, P.; LIM, M. K. The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution? **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 214–223, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.093>

IKONEN, J. *et al.* Use of embedded RFID tags in concrete element supply chains. **Journal of Information Technology in Construction (ITCON)**, v. 18, p. 119-147, 2013. Disponível em: <<http://www.itcon.org/2013/7>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

INFSO D.4 Networked Enterprise & RFID INFSO G.2 Micro & Nanosystems. In: **Co-operation with the Working Group RFID of the ETP EPOSS**, Internet of Things in 2020: Roadmap for the Future, 2008.

INOVACODE. LEITOR i300 UHF, 2020. Disponível em: <<https://rfidinovacode.com.br/produto/leitor-i300-uhf-governo/40525>>. Acesso em: 10 out. 2020.

ISIKDAG, U. **Enhanced Building Information Models**. 1.ed. Istanbul: Springer, 2015.

JURAN, J. M.; GODFREY, A. B. **Juran's Quality Handbook**. 5. ed. New York: McGraw Hill Professional, 1998.

KAGERMANN, H.; LUKAS, W.; WAHLSTER, W. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. Industriellen Revolution. **VDI Nachrichten**, n.13, 2011. Disponível em: <http://www.wolfgang-wahlster.de/wordpress/wp-content/uploads/Industrie_4_0_Mit_dem_Internet_der_Dinge_auf_dem_Weg_zur_vierten_industriellen_Revolution_2.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2020.

KENSEK, K. M.; NOBLE, D. E. **Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice**. 1. ed. New Jersey: Wiley & Sons, 2014.

KHAN, R. *et al.* Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges. In: 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRONTIERS OF INFORMATION TECHNOLOGY (FIT), 10., 2012, Pakistan. **Anais...** Pakistan: IEEE, 2012, p. 257–260.

KHEDKAR, S.; THUBE, S. Real Time Databases for Applications. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v.4, n.6, p. 2078-2082, 2017.

KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Technical Report TR/SE-0401**. Keele: Keele University and NICTA, 2004. 28 p.

KOSKELA, L. **Application of the New Production Philosophy to Construction**. Stanford University, EUA: CIFE. 1992. (Technical Report 72).

KUPRIYANOVSKY, V. et al. Digital twins based on the development of BIM technologies, related ontologies, 5G, IoT, and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM. **International Journal of Open Information Technologies**, v. 8, n. 3, p. 55-74, 2020

LACERDA, D.P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A; ANTUNES JR, J. A. V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, 2013, São Carlos. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-530x2013005000014>

LEITE, R. M. C. **Uso da Gameficação para Melhoria do Planejamento e Controle de Obras**. Dissertação (Mestrado) - Programa Multiinstitucional de Mestrado em Ciência da Computação, Universidade Federal da Bahia e Universidade Estadual de Feira de Santana, Salvador e Feira de Santana, 2014

LI, C. Z. *et al.* An Internet of Things-enabled BIM platform for on-site assembly services in prefabricated construction. **Automation in Construction**, v. 89, p. 146–161, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.001>

LI, C. Z. *et al.* Integrating RFID and BIM technologies for mitigating risks and improving schedule performance of prefabricated house construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1048–1062, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.156>

LI, S.; XU, L.D.; ZHAO, S. 5G Internet of Things: A survey. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 10, p. 1–9, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.01.005>

LI, X. *et al.* RBL-PHP: Simulation of Lean Construction and Information Technologies for Prefabrication Housing Production. **Journal of Management in Engineering**, v. 34, n. 2, 2018. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000577](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000577)

LÓPEZ, T. S. et al. Taxonomy, technology and applications of smart objects. **Information Systems Frontiers**: v. 13, n. 2, p. 281–300, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10796-009-9218-4>

LU, Q. et al. Moving from Building Information Models to Digital Twins for Operation and Maintenance. **Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction**: v.2, p. 1–11, 2020. doi: <https://doi.org/10.1680/jsmic.19.00011>

LU, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, v. 6, p. 1-10, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>

MA, G.; JIANG, J.; SHANG, S. Visualization of Component Status Information of Prefabricated Concrete Building Based on Building Information Modeling and Radio Frequency Identification: A Case Study in China. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, p. 1–13, 2019. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/6870507>

MA, Z. et al. Construction quality management based on a collaborative system using BIM and indoor positioning. **Automation in Construction**: v. 92, p. 35–45, 2018.

MACDOUGALL, W. *Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the future* Germany Trade Invest. Berlin: Germany Trade and Invest, 2014. 39 p.

MACHADO, F. A. **BIM e Internet das coisas para o monitoramento do consumo de energia da edificação**, 2018. 208 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

MACHADO, F.A., RUSCHEL, R.C.: A integração de BIM e IoT com ênfase em energia na fase de operação e manutenção da edificação. In: 1º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção e 10º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, SBTIC + SIBRAGEC 2017. **Anais...** Fortaleza: 2017, p. 140-150.

MACHADO, F. A.; RUSCHEL, R. C. Soluções integrando BIM e Internet das Coisas no ciclo de vida da edificação: uma revisão crítica. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 9, n. 3, p. 240-258, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650216>>. Acesso em: 01 mar. 2019. doi: <https://doi.org/10.20396/parc.v9i3.8650216>

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, v. 15, n. 4, p. 251–266, 1995.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

MARTINS, G. A.; PELISSARRO, J. Sobre conceitos, definições e constructos nas Ciências Contábeis. **Revista Administração e Contabilidade da Unisinos**. São Leopoldo, v.2, n.2, p. 78-84, 2005.

MATEEV, M. Industry 4.0 and the digital twin for building industry. **International Scientific Journal “Industry 4.0”**, v. 5, n. 1, p. 29–32, 2020.

MONOSTORI, L. et al. Cyber-physical systems in manufacturing. **CIRP Annals**, v. 65, n. 2, p. 621–641, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>

MOTAMEDI, A.; SOLTANI, M. M.; HAMMAD, A. Localization of RFID-equipped assets during the operation phase of facilities. **Advanced Engineering Informatics**, v. 27, n. 4, p. 566–579, 2013.

MUHURI, P. K.; SHUKLA, A. K.; ABRAHAM, A. Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 78, p. 218–235, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.11.007>

NAVON, R. Automated project performance control of construction projects. **Automation in Construction**, v. 14, p. 467-476, 2005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.09.006>

NAVON, R. Research in automated measurement of project performance indicators. **Automation in Construction**, v. 16, p. 176-188, 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.03.003>

NIBS - NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES. United States National Building Information Modeling Standard. Version 1 - Part 1: **Overview, principles, and methodologies**, 2007. Disponível em: https://buildinginformationmanagement.files.wordpress.com/2011/06/nbimsv1_p1.pdf. Acesso em: 17 dez. 2018.

NUNES, V. Q. G. **Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto armado**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Paulo 2011.

OESTERREICH, T. D.; TEUTEBERG, F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. **Computers in Industry**, v.83, p.121-139, 2016.

OLIVEIRA, V. H. M.; SERRA, S. M. B. Controle de obras por RFID: sistema de monitoramento e controle para equipamentos de segurança no canteiro de obras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 61-77, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400185>

OLIVIERI, H.; SEPPÄNEN, O.; PELTOKORPI, A. Real-time Tracking of Production Control: Requirements and Solutions. In: 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 25., Heraklion. **Proceedings...** Heraklion: IGLC, 2017, p. 671-678. doi: <https://doi.org/10.24928/2017/0177>

PARK, J.; CHO, Y.; AHN, C. A Wireless Tracking System Integrated with BIM for Indoor Construction Applications. In: Construction Research Congress, 2016, San Juan. **Proceedings...** San Juan: ASCE, 2016, p. 2660-2668.

PARK, J.; KIM, K.; CHO, Y. Using BIM Geometric Properties for BLE-based Indoor Location Tracking. In: Seoul International Conference on Applied Science and Engineering. **Proceedings...** Seoul: ASCE, 2016.

PISHDAD-BOZORGI, P.; GAO, X.; SHELDEN, D. R. Introduction to cyberphysical systems in the built environment. In: SAWHNEY, A.; RILEY, M.; IRIZARRY, J. **CONSTRUCTION 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment**, 1. ed. New York: Routledge - Taylor & Francis Group, 2020.

RAY, P.P. A survey on Internet of Things architectures. **Journal of King Saud University**, Siquim, v. 30, n.3, p. 291-319, 2018

ROBLEK V.; MEŠKO M.; KRAPEŽ, A. A Complex View of Industry 4.0, p. 1–11, 2016. **SAGE Open**. doi: <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>

SACKS, R. *et al.* Construction with digital twin information systems. **Data-Centric Engineering**, v. 1, n. 14, 2020. doi: <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>

SANTOS, B. P. *et al.* **Internet das Coisas: da Teoria à Prática**. In: XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 34., 2016, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2016, p. 1-50. Disponível em: <<http://www.sbrc2016.ufba.br/downloads/anais/MinicursosSBRC2016.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2018

SAWHNEY, A.; ODEH, I. S. Digital ecosystems in the construction industry - current state and future trends. In: SAWHNEY, A.; RILEY, M.; IRIZARRY, J. **CONSTRUCTION 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment**, 1. ed. New York: Routledge - Taylor & Francis Group, 2020.

SAWHNEY, A.; RILEY, M.; IRIZARRY, J. Introduction and overview of Construction 4.0, CPS, Digital Ecosystem, and innovation. In: SAWHNEY, A.; RILEY, M.; IRIZARRY, J. **CONSTRUCTION 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment**, 1. ed. New York: Routledge - Taylor & Francis Group, 2020.

SILVEIRA, B. F. **Identificação das causas da variabilidade na execução dos processos do sistema de paredes de concreto**. 72 p. 2018. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction**, v. 18, n. 3, p. 357-375, 2009 a. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>

SUCCAR, B.; SALEEB, N.; SHER, W. Model Uses: Foundations for Modular Requirements Clarification Language. In: AUSTRALASIAN UNIVERSITIES BUILDING EDUCATION (AUBEA2016), 2016. **Proceedings...** Cairns, Australia, 2016.

SUNDMAEKER, H. *et al.*, **Vision and challenges for realising the Internet of Things**: Cluster of European Research Projects on the Internet of Things, 1.ed. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

TAHERKORDI, A.; ELIASSEN, F.; HORN, G. From IoT *Big Data* to IoT big services. In: SAC '17 Symposium on Applied Computing, 17., 2017, Marrakech. **Proceedings...** New York: ACM, 2017, p. 485–491. doi: <https://doi.org/10.1145/3019612.3019700>

TAKEDA, H. *et al.* Modeling Design Processes. **AI Magazine**, v. 11, n. 4, p. 37-48, 1990. doi: <https://doi.org/10.1609/aimag.v11i4.855>

TANG, S. *et al.* A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. **Automation in Construction**, v. 101, p. 127–139, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020>

TEIZER, J. *et al.* Internet of Things (IoT) for Integrating Environmental and Localization Data in Building Information Modeling (BIM). In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION (ISARC), 34., 2017, Taipei. **Proceedings...** Taipei: 2017.

TEZEL, A.; FELLOW, R.; AZIZ, Z. From conventional to it based visual management: a conceptual discussion for lean construction. **Journal of Information Technology in Construction (ITCON)**, v. 22, p. 220-246, 2017. doi: <http://www.itcon.org/2017/12>

THAMES, L.; DIRK SCHAEFER, D. Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0. **Changeable, Agile, Reconfigurable & Virtual Production**, v. 52, p. 12-17, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.041>

TIWANA, A. The Rise of Platform Ecosystems. In: TIWANA, A. **Platform Ecosystems: Aligning Architecture, Governance, and Strategy**, 1. ed. New York: Morgan Kaufmann, 2014.

UCKELMANN, D.; HARRISON, M.; MICHAHELLES, F. **Architecting the Internet of Things**, 1.ed. New York: Springer, 2011.

UNDERWOOD, J.; ISIKDAG, U. Emerging technologies for BIM 2.0. **Construction Innovation**, v. 11, n. 3, p. 252-258, 2011. doi: <https://doi.org/10.1108/14714171111148990>

VAIDYANATHAN, K.; VARGHESE, K.; DEVKAR, G. Cloud-based collaboration and project management. In: SAWHNEY, A.; RILEY, M.; IRIZARRY, J. **CONSTRUCTION 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment**, 1. ed. New York: Routledge - Taylor & Francis Group, 2020.

VAISHNAVI, V. K.; KUECHLER, W. K. **Methods and Patterns: Innovating Information and Communication Technology**. 2. ed. New York: Auerbach Publications, Taylor & Francis Group, 2015.

VAN AKEN, J. E. Management research as a design science: articulating the research products of mode 2 knowledge production in management. **British Journal of Management**, v. 16, p. 19-36, 2005. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8551.2005.00437.x>

VASEY, L.; MENGES, A. Potential of cyber-physical systems in architecture and construction. VASEY e MENGES In: SAWHNEY, A.; RILEY, M.; IRIZARRY, J. **CONSTRUCTION 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment**, 1. ed. New York: Routledge - Taylor & Francis Group, 2020.

VERMESAN, O. *et al.* Internet of things strategic research roadmap. In: VERMESAN, O.; FRIESS, P. 1.ed. **Internet of Things: Global Technological and Societal Trends**. 1 ed. Aalborg: River Publishers, 2011.

VISUAL STUDIO. **Visual Studio Code**, 2018. Disponível em: <<https://code.visualstudio.com/>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

WANG, S. *et al.* Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n.1, p. 1-11, 2016. doi: <https://doi.org/10.1155/2016/3159805>

WANG, X. *et al.* A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality. **Automation in Construction**, v. 34, p. 37–44, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.012>

WANT R. An introduction to RDIF technology. **IEEE Pervasive Computing**, v. 5, n. 1, p. 25-33, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/MPRV.2006.2>

WHITMORE, A.; AGARWAL, A.; XU, L. D., The Internet of Things - a survey of topics and trends. **Information Systems Frontiers**, v. 17, n. 2, p. 261–274, 2015. doi: <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9489-2>

XUE, F. *et al.* Linking radio-frequency identification to Building Information Modeling: Status quo, development trajectory and guidelines for practitioners. **Automation in Construction**, v. 93, p. 241–251, 1 set. 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.023>

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. **Computer Networks**, v. 52, n. 12, p. 2292-2330, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>

ZAHARIADIS, T. Towards a Future Internet Architecture. In: DOMINGUE, J. *et al.*, **The Future Internet: Future Internet Assembly 2011: Achievements and Technological Promises**, n. 1. London: Springer, 2011.

ZHANG, J.; SEET, B.; LIE, T. T. Building Information Modelling for Smart Built Environments. **Journal Buildings**, Basel, v. 5 n. 1, p. 100-115, 2015.

ZHONG, R. Y. *et al.* Prefabricated construction enabled by the Internet-of-Things. **Automation in Construction**, United States of America, v. 76, p. 59-70, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.006>

ZHONG, R. Y. *et al.* Towards Physical Internet-enabled prefabricated housing construction in Hong Kong. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 3, p. 1079-1086, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.227>

APÊNDICE 1 – ROTEIRO PARA VISITA AO CANTEIRO DE OBRAS

Mapeamento - Etapas do processo para paredes de concreto

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	

Obs.: fazer registro fotográfico de cada etapa.

Avaliação – Qualidade das paredes de concreto e das formas

- 1- As formas foram colocadas em sequência?
 Sim Não
- 2- A formas foram devidamente posicionadas?
 Sim Não
- 3- As formas foram devidamente travadas?
 Sim Não
- 4- Os elementos de instalação elétrica/hidráulica foram fixados da maneira correta?
 Sim Não
- 5- As formas estão em bom estado de conservação?
 Sim Não

Perguntas Complementares

- 13- Qual o tempo de produção de cada pavimento?
- 14- Quantas equipes trabalham nos processos relacionados às formas?
- 15- Qual o tempo de vida útil das formas?
- 16- Como acontece o processo de adaptação das formas ao projeto?
- 17- Como as formas são transportadas até a obra?
- 18- Onde ficam armazenadas as formas?
- 19- Como é determinada a sequência de montagem das formas em campo? O projeto de formas fica disponível e é utilizado durante a montagem?
- 20- Quais são as principais causas de retrabalho após a desforma (bicheiras e requadros, por exemplo)?
- 21- Quanto tempo é gasto em média para reparação destes problemas?

APÊNDICE 2 – ROTEIRO PARA VISITA AO GALPÃO

Perguntas adicionais:

- 1- Onde e como ficam armazenadas as formas?
- 2- Qual o tempo de vida útil das formas?
- 3- Como saber se as formas já estão desgastadas a ponto de não poderem ser mais usadas?
- 4- Existe um registro das formas que estão no galpão e das suas dimensões?
- 5- Quantas formas tem em um jogo de forma?
- 6- Essa informação, a respeito da quantidade de formas, está anotada em algum lugar?
- 7- É passado para o galpão algum projeto de formas para saber as dimensões das mesmas?
- 8- Existe tem algum controle da quantidade de formas que vão para obra?
- 9- Como é realizado a limpeza das formas ao chegarem no galpão?
- 10- Como acontece o processo de adaptação das formas ao projeto?
- 11- Como é determinada a sequência de montagem das formas em campo? O projeto de formas fica disponível e é utilizado durante a montagem?
- 12- A numeração existente nas formas vem do galpão ou eles colocam na obra?
- 13- Quais os problemas gerados ao trocar a ordem das peças?
- 14- É realizado registro de manutenção?
- 15- Como as formas são transportadas até a obra?

APÊNDICE 3 – PERGUNTAS DO QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO

O formulário original foi aplicado com o Google Formulário. As opções de resposta eram em escala Escala Likert de cinco pontos, abertas ou em formato de “SIM” ou “NÃO”, a depender do item analisado. Abaixo estão listadas as perguntas.

GRUPO 1 - PERFORMANCE DO SISTEMA
Adequação da Infraestrutura Física
1-Como você classifica a fixação das <i>tags</i> nas formas metálicas?
2-Como você classifica a resistência das <i>tags</i> às intempéries e às condições de uso da obra?
3-Como você classifica a capacidade da <i>tag</i> de armazenar e transmitir corretamente os dados?
4-Como você classifica a capacidade do leitor de coletar os dados das <i>tags</i> corretamente?
5-Como você classifica a resistência do leitor às intempéries e às condições de uso da obra?
6-A duração da bateria do leitor foi suficiente para fazer a coleta dos dados?
7-Em que grau a infraestrutura física instalada do sistema interfere nos procedimentos normais relacionados ao processo construtivo ou na logística geral do canteiro ou na movimentação dos trabalhadores?
8-Em que grau a infraestrutura física instalada do sistema representa risco à segurança dos trabalhadores?
9-Em que grau a coleta de dados representa risco à segurança do operador do leitor?
Nível de Precisão das Leituras
10-O ajuste da distância de leitura (Power 10) nas configurações do leitor possibilitou coletar os ID das formas de forma individualizada, obedecendo a sequência definida?
11-A velocidade de leitura de cada <i>tag</i> em campo foi considerada satisfatória?
Latência dos dados
12- Em que grau o tempo médio de leitura de sequência para cada cômodo foi considerado satisfatório?
13-Pode-se considerar que os dados estavam sendo coletados e visualizados no App em tempo hábil (tempo real) durante a utilização online do sistema?
14-Pode-se considerar que os dados estavam sendo coletados e visualizados no App em tempo hábil (tempo real) durante a utilização <i>off-line</i> do sistema?
15-Pode-se considerar que os dados estavam sendo exibidos em tempo hábil (tempo real) no Gêmeo Digital, quando online?
Confiabilidade dos dados
16-Em que grau os procedimentos utilizados para coletar os dados (sequência de leitura pré-definida, por exemplo) garantem a confiabilidade da leitura?

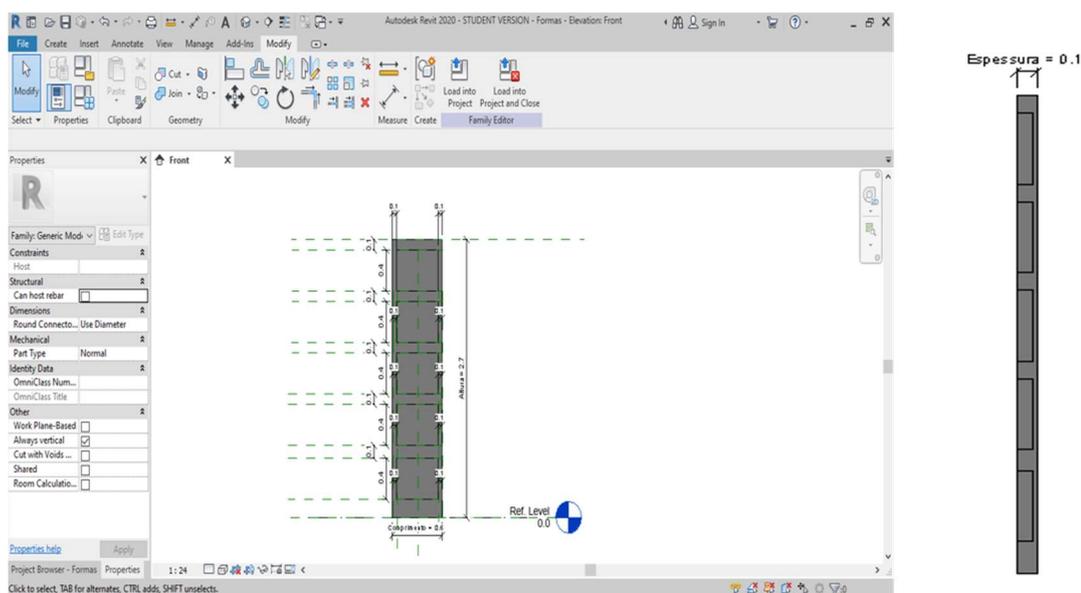
17-O App apresentou erros ou encerramento repentino durante a sua utilização?
18-Algumas das funções apresentou comportamento inesperado durante a utilização?
19-Os dados indicados nos elementos virtuais do Gêmeo Digital correspondem aos elementos reais?
Visualização
20-Como você classifica a forma de apresentação e visualização de dados no App, de maneira geral?
Escalabilidade
21-Como você classifica a capacidade de adaptação do sistema para que seja implementado em larga escala em qualquer canteiro genérico?
22-Como você classifica a capacidade de adaptação dos módulos do sistema para rastrear outros recursos físicos (equipamentos, materiais e pessoal)?
Qualidade do fornecimento de informações
23-Em que grau as informações exibidas pelo sistema são suficientes para auxiliar em tomadas de decisão referentes às formas?
24-Em que grau as informações exibidas pelo sistema são suficientes para auxiliar em tomadas de decisão referentes às paredes?
25-Em que grau o sistema possibilita a visualização e identificação de intercorrências e padrões (ou seja, informações novas) que não poderiam ser observados sem o uso do App?
Simplicidade e rapidez no entendimento das informações
26-Em que grau o sistema fornece informações que são de fácil compreensão pelas equipes de campo?
27-Em que grau o sistema fornece informações que são de fácil compreensão pelos gestores?
GRUPO 2 – REQUISITOS DO CLIEINTE
Benefícios e Dificuldades
1-Como você classifica a capacidade do sistema de registrar e exibir de maneira adequada as características físicas de cada forma (dimensões, peso e etc.)?
2-Como você classifica a capacidade do sistema de registrar e exibir de maneira adequada os defeitos nas formas?
3-Como você classifica a capacidade do sistema de registrar e exibir de maneira adequada manutenções e ajustes realizados nas formas?
4-Como você classifica a capacidade do sistema de apoiar na sequência correta de montagem das formas em campo ou de identificar erros de montagem?
5-Como você classifica o potencial do sistema de gerar impactos na redução de não conformidades nas paredes (bexigas, barrigas e problemas de requadro)?

6-Como você classifica o potencial do sistema de gerar impactos na redução de retrabalho relacionado às paredes (correção de bexigas, barrigas e problemas de requadro, por exemplo)?
7-Como você classifica o potencial do sistema de reduzir perdas de formas (placas ou componentes)?
8-Como você classifica o potencial do sistema de gerar impactos na preservação da integridade das formas?
9-Como você classifica o potencial do sistema de gerar impactos na redução de custos para a empresa?
10-Quais as principais dificuldades de implementação do sistema na empresa?
11-Considerando que o custo final do sistema corresponde a cerca de 1% do preço de um jogo de formas, em que grau o custo / benefício da infraestrutura física do sistema é considerada satisfatório?
Adequação do sistema às necessidades da empresa
12-Em que grau o sistema pode contribuir, de maneira geral, para uma melhoria no controle das formas metálicas da obra?
13-Que áreas na empresa podem sofrer maior impacto após a implementação do sistema (por exemplo, qualidade, planejamento, produção e etc.)?
14-Como você classifica o potencial do sistema de apoiar tomadas de decisão sobre paredes e formas na obra?
15-Como você classifica o potencial do sistema de apoiar tomadas de decisão sobre paredes e formas na obra no escritório?
Acessibilidade
16-Qual o seu grau de satisfação com o layout geral do App?
17-Qual o seu grau de satisfação com as cores e identidade visual (Front-End) do App?
18-Qual o seu grau de satisfação com o tamanho dos ícones e letras?
19-O uso do aplicativo é intuitivo?
20-O funcionamento de cada um dos módulos está claro?

APÊNDICE 4 – CRIAÇÃO DAS FORMAS METÁLICAS VIRTUAIS E DE PARÂMETROS DE IDENTIDADE

Para criar as formas metálicas no Revit foi criada uma família do tipo “Generic Models”. Foram feitos os processos de geração de geometria com extrusão e o material foi definido como alumínio. As dimensões comprimento, largura e espessura foram configuradas como parâmetros variáveis. Para que o elemento funcionasse de forma parametrizada e mantivesse o padrão geométrico das formas reais, algumas cotas foram criadas nas margens e seus deslocamentos foram travados, de modo que ao alterar o comprimento, largura e espessura, essas margens não se alterassem. A Figura 92 indica esse processo.

Figura 92 - Desenho e parametrização das formas no Revit.



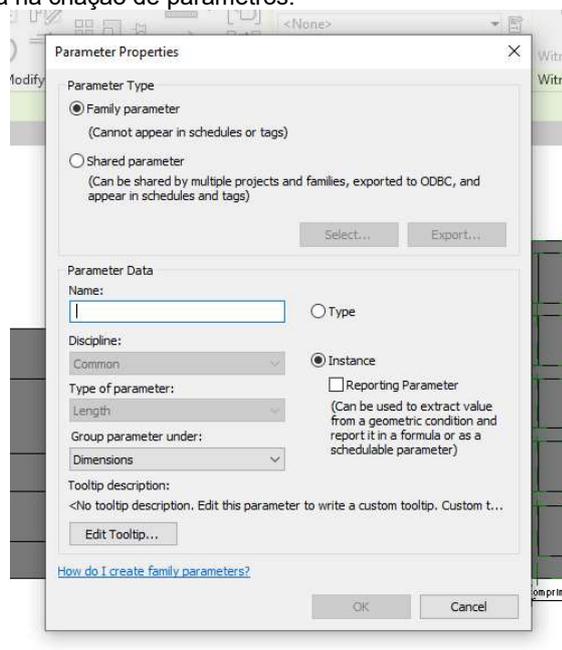
Fonte: Autora (2020).

Os passos seguidos nesse processo estão detalhados em seguida:

1. A criação das formas metálicas se deu por meio do Revit.
2. Nele foi criado uma família do tipo “Generic Models”.
3. No desenvolvimento da modelagem, utilizou-se o comando “Extrusion” (Create – Forms – Extrusion), para criar a estrutura da forma.
4. Na planta baixa, um retângulo foi desenhado representando a espessura e a largura da forma.
5. Na aba “Extrusion end” (Properties – Constraints – Extrusion end) foi adicionada a altura da forma.
6. Na aba “Solid/Void” (Properties – Identity Data – Solid/Void) definiu-se Solid.

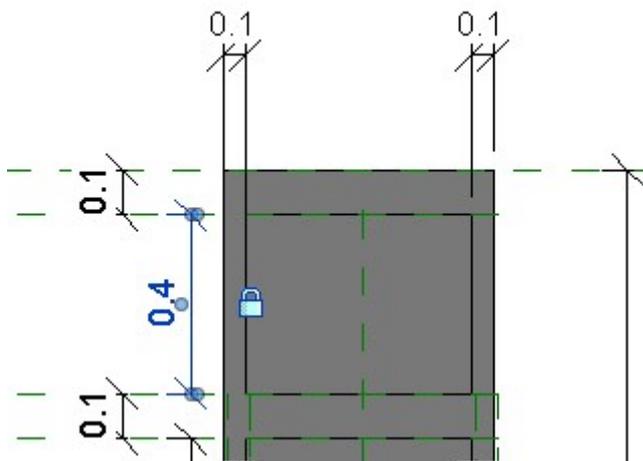
7. Na aba de “Material” (Properties – Materials and Finishes – Material) o material como foi definido como “Alumínio”.
8. Na aba “mode” (Modify/ Create Extrusion – mode) foi aceita a extrusão.
9. Na vista frontal foi utilizado o comando “Void Extrusion” (Create – Void Forms – Void Extrusion) para criação da perspectiva da forma. Por meio desse comando, retângulos menores foram desenhados dentro da forma conforme a geometria real.
10. Na aba “Extrusion end” (Properties – Constraints – Extrusion end), colocou-se a espessura necessária para os recuos dentro da forma.
11. Na aba “Set” (Work Plane – set) foi especificado o plano de trabalho.
12. Na aba “mode” (Modify/ Create Extrusion – mode) foi aceita a extrusão.
13. Obs: Antes de desenhar os retângulos, ainda na vista frontal, foi utilizado o comando “Reference Plane” (Create - Datum – Reference Plane) para criar eixos e delimitar distâncias equivalentes.
14. Em seguida, foram criadas 3 cotas correspondentes ao comprimento, largura e altura. Em seguida, elas foram adicionadas como parâmetro (Clique na cota – Modify/dimensions – label dimension – Create Parameter).
15. Na criação dos parâmetros, foi utilizada a seguinte padronização, conforme indicado na tela (Family Parameter, Name, Instance, Dimensions)

Figura 93 - Padronização seguida na criação de parâmetros.



1. Para que a forma funcionasse de forma parametrizada, algumas cotas foram criadas nas margens e os seus deslocamentos foram travados, de modo que ao alterar o comprimento ou a largura, as margens não se alterassem. É o que indica a Figura 94.

Figura 94 - Cotas criadas nas formas com deslocamentos travados.

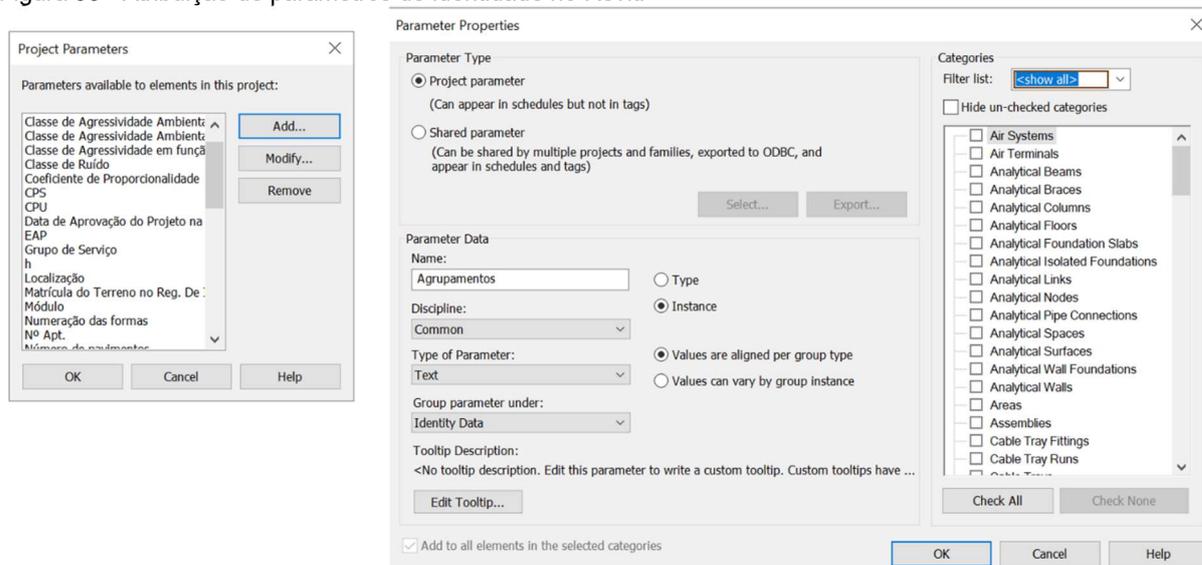


Fonte: Autora (2020).

2. Com a utilização dos comandos “Extrusion”, “Void Extrusion” e edição de material é possível detalhar ainda mais o modelo, trazendo características mais reais.

Para criar os parâmetros de identidade “Agrupamento e Numeração Sequencial da Forma” foi utilizado o comando Project Parameters, conforme exemplo indicado na Figura 95.

Figura 95 - Atribuição de parâmetros de identidade no Revit.



Fonte: Autora (2020).

APÊNDICE 5 – PROCEDIMENTOS NO FORGE E NA PROGRAMAÇÃO PARA CRIAR GÊMEO DIGITAL

As configurações iniciais para gerar uma aplicação no Forge são:

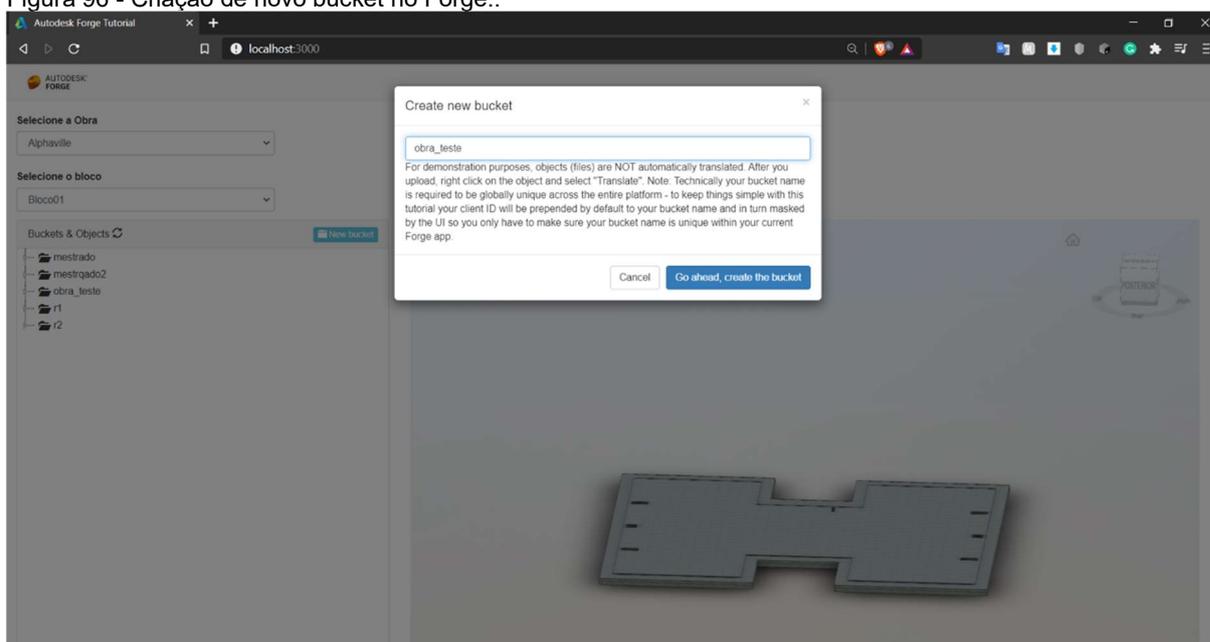
1. Criar uma conta no site <<https://forge.autodesk.com/>>;
2. Ativar a conta, aderindo a um plano gratuito de um ano ou a um plano pago;
3. Criar um aplicativo no menu “My Apps”;
4. Guardar o ID e o segredo que serão gerados após a criação da aplicação. Estes serão utilizados na autenticação do projeto.

A preparação da visualização do modelo derivado no Forge envolve as seguintes macro etapas:

1. Criar um servidor;
2. Autenticar o projeto;
3. Fazer upload de arquivos para o Forge OSS (Object Storage Service);
4. Traduzir o arquivo;
5. Mostrar o arquivo no Visualizador.

A Figura 96 indica a criação de um novo bucket no Forge, que é uma etapa fundamental para visualização do modelo

Figura 96 - Criação de novo bucket no Forge..



Fonte: Autora (2020).

Em seguida são destacados alguns pontos específicos programação.

Figura 97 - Variável "persistent" inserida para permitir visualização contínua do modelo.

```

62 const objects = await new ObjectsApi().getObjects(bucket_name, opts: { limit: 100 }, req.oauth_client, req.oauth_token)
63 res.json(objects.body.items.map(object) => {
64   return {
65     id: Buffer.from(object.objectId).toString('base64'),
66     text: object.objectKey,
67     type: 'object',
68     children: false
69   };
70 });
71 } catch(err) {
72   next(err);
73 }
74 });
75 });
76 });
77 // POST /api/forge/oss/buckets - creates a new bucket.
78 // Request body must be a valid JSON in the form of { "bucketKey": "<new_bucket_name>" }.
79 router.post(path: '/buckets', handlers: async (req: Request<P, ResBody, ReqBody, ReqQuery>, res: Response<ResBody>, next: NextFunction) => {
80   let payload = new PostBucketsPayload();
81   payload.bucketKey = config.credentials.client_id.toLowerCase() + '-' + req.body.bucketKey;
82   payload.policyKey = 'persistent'; //
83   try {
84     // Create a bucket using [BucketsApi](https://github.com/Autodesk-Forge/forge-api-nodejs-client/blob/master/docs/BucketsApi.md#createbucket)
85     await new BucketsApi().createBucket(payload, opts: { req.oauth_client, req.oauth_token});
86     res.status(200).end();
87   } catch(err) {
88     next(err);
89   }
90 });
91 // POST /api/forge/oss/objects - uploads new object to given bucket.
92 // Request body must be structured as form-data dictionary
93 callback for root)

```

Fonte: Autora (2020).

Figura 98 - Alteração de parâmetro de tamanho limite para *upload* de arquivo.

```

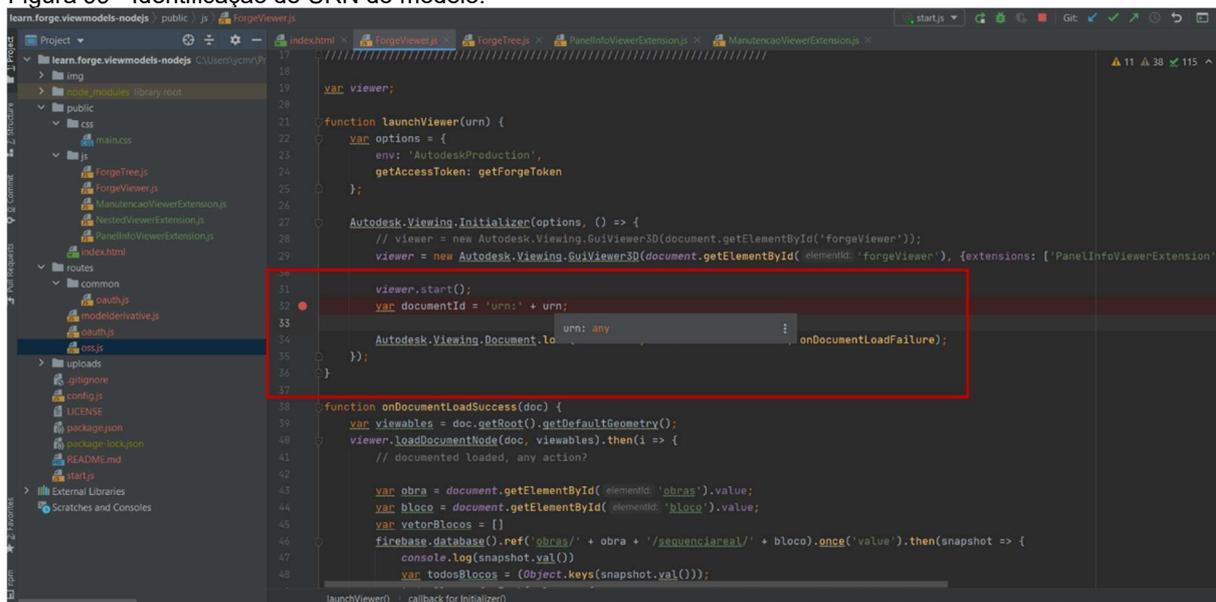
22 const { BucketsApi, ObjectsApi, PostBucketsPayload } = require('forge-apis');
23
24 const { getClient, getInternalToken } = require('./common/oauth');
25 const config = require('./config');
26
27 let router = express.Router();
28
29 // Middleware for obtaining a token for each request.
30 router.use(async (req: Request<ParamsDictionary, any, any, ParsedQs>, res: Response<any>, next: NextFunction) => {
31   const token = await getInternalToken();
32   req.oauth_token = token;
33   req.oauth_client = getClient();
34   next();
35 });
36
37 // GET /api/forge/oss/buckets - expects a query param 'id'; if the param is '#' or empty,
38 // returns a JSON with list of buckets, otherwise returns a JSON with list of objects in bucket with given name.
39 router.get(path: '/buckets', handlers: async (req: Request<P, ResBody, ReqBody, ReqQuery>, res: Response<ResBody>, next: NextFunction) => {
40   const bucket_name = req.query.id;
41   if (!bucket_name || bucket_name === '#') {
42     try {
43       // Retrieve up to 100 buckets from Forge using the [BucketsApi](https://github.com/Autodesk-Forge/forge-api-nodejs-client)
44       // Note: if there's more buckets, you should call the getBucket method in a loop, providing different 'startAt' params
45       const buckets = await new BucketsApi().getBuckets(opts: { limit: 100 }, req.oauth_client, req.oauth_token);
46       res.json(buckets.body.items.map(bucket) => {
47         return {
48           id: bucket.bucketKey,
49           // Remove bucket key prefix that was added during bucket creation
50           text: bucket.bucketKey.replace(config.credentials.client_id.toLowerCase() + '-', ''),
51           type: 'bucket',
52           children: true
53         };
54       });
55     } catch(err) {
56       next(err);
57     }
58   }
59 });

```

Fonte: Autora (2020).

A Figura 99 indica a variável referente à URN no código.

Figura 99 - Identificação de URN do modelo.



```
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
```

Fonte: Autora (2020).

APÊNDICE 6 – FORMAS CADASTRADAS NA OBRA C

A coluna “Final ID” indica o registro dos três últimos dígitos do ID da respectiva *tag* que foi fixada na placa. Cada ID é composto por 24 dígitos. Conforme solicitado pela pesquisadora ao fabricante no momento da compra, os 14 primeiros dígitos têm valor 0, os quatro seguintes indicam o ano da compra, 2020, os três seguintes indicam o valor do lote, 001, e os três últimos indicam o Final ID, com valores variando de 001 a 100 (Quadro 27).

Quadro 27 - Documento de referência com cadastro manual das formas.

Número	Final ID	Cômodo	Parede	Altura	Largura	Espessura
1	005	Quarto 01	Parede 1	2,55	0,45	0,04
2	015	Quarto 01	Parede 1	1,14	0,59	0,04
3	014	Quarto 01	Parede 1	1,15	0,60	0,04
4	008	Quarto 01	Parede 1	2,55	0,55	0,04
5	010	Quarto 01	Parede 2	2,55	0,60	0,04
6	020	Quarto 01	Parede 2	2,55	0,60	0,04
7	017	Quarto 01	Parede 2	2,55	0,60	0,04
8	001	Quarto 01	Parede 2	2,55	0,60	0,04
9	007	Quarto 01	Parede 2	2,55	0,20	0,04
10	012	Quarto 01	Parede 3	2,55	0,32	0,04
11	002	Quarto 01	Parede 3	2,55	0,60	0,04
12	018	Quarto 01	Parede 3	2,55	0,60	0,04
13	016	Quarto 01	Parede 4	2,55	0,60	0,04
14	009	Quarto 01	Parede 4	2,55	0,60	0,04
15	011	Quarto 01	Parede 4	2,55	0,20	0,04
16	019	Quarto 01	Parede 4	2,55	0,60	0,04
17	006	Quarto 01	Parede 4	2,55	0,60	0,04
18	084	Quarto 02	Parede 1	2,55	0,35	0,04
19	082	Quarto 02	Parede 1	2,55	0,55	0,04
20	085	Quarto 02	Parede 1	1,15	0,60	0,04
21	081	Quarto 02	Parede 1	1,15	0,60	0,04
22	069	Quarto 02	Parede 1	2,55	0,40	0,04
23	088	Quarto 02	Parede 1	2,55	0,60	0,04
24	087	Quarto 02	Parede 2	2,55	0,60	0,04
25	086	Quarto 02	Parede 2	2,55	0,60	0,04
26	074	Quarto 02	Parede 2	2,55	0,60	0,04
27	080	Quarto 02	Parede 2	2,55	0,50	0,04
28	067	Quarto 02	Parede 2	2,55	0,30	0,04
29	098	Quarto 02	Parede 3	2,55	0,55	0,04

Número	Final ID	Cômodo	Parede	Altura	Largura	Espessura
30	097	Quarto 02	Parede 3	2,55	0,30	0,04
31	100	Quarto 02	Parede 3	2,55	0,35	0,04
32	099	Quarto 02	Parede 3	2,55	0,30	0,04
33	096	Quarto 02	Parede 3	2,55	0,60	0,04
34	094	Quarto 02	Parede 3	2,55	0,32	0,04
35	095	Quarto 02	Parede 4	2,55	0,20	0,04
36	093	Quarto 02	Parede 4	2,55	0,60	0,04
37	091	Quarto 02	Parede 4	2,55	0,60	0,04
38	092	Quarto 02	Parede 4	2,55	0,60	0,04
39	083	Quarto 02	Parede 4	2,55	0,60	0,04
40	064	Banheiro	Parede 1	2,55	0,60	0,04
41	066	Banheiro	Parede 1	2,55	0,30	0,04
42	089	Banheiro	Parede 1	2,55	0,35	0,04
43	073	Banheiro	Parede 1	2,55	0,17	0,04
44	071	Banheiro	Parede 1	2,55	0,17	0,04
45	077	Banheiro	Parede 1	2,55	0,55	0,04
46	062	Banheiro	Parede 2	2,55	0,35	0,04
47	078	Banheiro	Parede 2	1,65	0,60	0,04
48	070	Banheiro	Parede 3	2,55	0,60	0,04
49	079	Banheiro	Parede 3	2,55	0,60	0,04
50	068	Banheiro	Parede 3	2,55	0,30	0,04
51	061	Banheiro	Parede 3	2,55	0,60	0,04
52	090	Banheiro	Parede 4	2,55	0,36	0,04
53	046	Sala/Cozinha	Parede 1	2,55	0,35	0,04
54	051	Sala/Cozinha	Parede 1	2,55	0,60	0,04
55	055	Sala/Cozinha	Parede 1	2,55	0,60	0,04
56	045	Sala/Cozinha	Parede 1	2,55	0,32	0,04
57	043	Sala/Cozinha	Parede 1	2,55	0,30	0,04
58	036	Sala/Cozinha	Parede 2	2,55	0,36	0,04
59	042	Sala/Cozinha	Parede 2	2,55	0,20	0,04
60	075	Sala/Cozinha	Parede 3	2,55	0,20	0,04
61	063	Sala/Cozinha	Parede 3	2,55	0,60	0,04
62	048	Sala/Cozinha	Parede 3	2,55	0,30	0,04
63	056	Sala/Cozinha	Parede 3	2,55	0,60	0,04
64	047	Sala/Cozinha	Parede 3	2,55	0,60	0,04
65	057	Sala/Cozinha	Parede 4	2,55	0,22	0,04

Número	Final ID	Cômodo	Parede	Altura	Largura	Espessura
66	059	Sala/Cozinha	Parede 4	1,45	0,60	0,04
67	039	Sala/Cozinha	Parede 4	1,45	0,60	0,04
68	038	Sala/Cozinha	Parede 4	2,55	0,23	0,04
69	037	Sala/Cozinha	Parede 5	2,55	0,60	0,04
70	040	Sala/Cozinha	Parede 5	2,55	0,60	0,04
71	049	Sala/Cozinha	Parede 5	2,55	0,60	0,04
72	058	Sala/Cozinha	Parede 5	2,55	0,60	0,04
73	050	Sala/Cozinha	Parede 5	2,55	0,55	0,04
74	027	Sala/Cozinha	Parede 5	2,55	0,55	0,04
75	026	Sala/Cozinha	Parede 6	2,55	0,60	0,04
76	030	Sala/Cozinha	Parede 7	2,55	0,60	0,04
77	022	Sala/Cozinha	Parede 8	2,55	0,25	0,04
78	028	Sala/Cozinha	Parede 8	2,55	0,60	0,04
79	023	Sala/Cozinha	Parede 8	2,55	0,60	0,04
80	060	Sala/Cozinha	Parede 8	2,55	0,60	0,04
81	033	Sala/Cozinha	Parede 8	2,55	0,60	0,04
82	072	Sala/Cozinha	Parede 8	2,55	0,60	0,04
83	025	Sala/Cozinha	Parede 9	2,55	0,54	0,04
84	021	Sala/Cozinha	Parede 9	2,55	0,54	0,04
85	032	Sala/Cozinha	Parede 9	2,55	0,44	0,04
86	031	Sala/Cozinha	Parede 9	2,55	0,30	0,04
87	029	Sala/Cozinha	Parede 9	2,55	0,15	0,04
88	035	Escada	Parede 1	2,55	0,35	0,04
89	003	Escada	Parede 1	2,55	0,40	0,04
90	034	Escada	Parede 1	1,25	0,80	0,04
91	004	Escada	Parede 1	2,55	0,40	0,04
92	013	Escada	Parede 1	2,55	0,35	0,04
93	041	Escada	Parede 2	2,55	0,60	0,04
94	054	Escada	Parede 2	2,55	0,60	0,04
95	065	Escada	Parede 2	2,55	0,60	0,04
96	044	Escada	Parede 2	2,55	0,31	0,04
97	053	Escada	Parede 2	2,55	0,31	0,04
98	052	Escada	Parede 2	2,55	0,31	0,04
99	024	Escada	Parede 2	2,55	0,60	0,04
100	076	Escada	Parede 2	2,55	0,60	0,04

Fonte: Autora (2021).

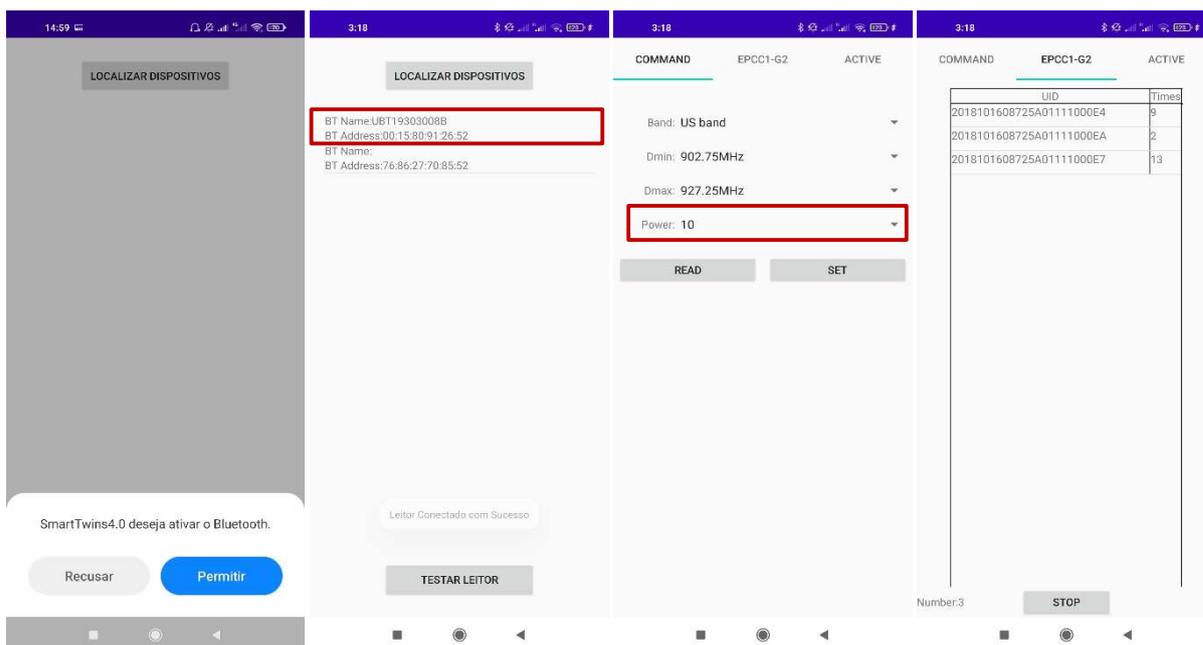
APÊNDICE 7 – MANUAL DO USUÁRIO DO APLICATIVO.

Procedimentos iniciais de uso do aplicativo Smart Twins 4.0:

1. Abrir o aplicativo
2. Fazer o registro, caso não tenha feito antes
3. Fazer *log-in*
4. Acessar Painel Principal
5. Em Configuração de Usuário:
 - 5.1 Configurar Cadastro (se necessário)
 - 5.2 Adicionar Nova Obra (se necessário)
 - 5.3 Cadastrar Funcionários (se necessário)
 - 5.4 Configurar Funcionários (se necessário)
6. Voltar ao Painel Principal

Procedimentos para configurar o leitor para a distância de 10 cm: as telas da Figura 100, a serem lidas da esquerda para a direita, indicam esse procedimento, que foi testado diversas vezes em campo com sucesso. Uma vez definido o “Power”, o usuário deve clicar em “SET” para salvar e, em seguida, clicar na aba EPCCC-G2 para fazer um teste de leitura. Na tela do teste é exibido o ID da *tag*, o número total de *tags* lidas e o número de vezes em que cada *tag* é lida por segundo. Feito isso, o usuário deve clicar em “STOP” e voltar ao Painel Principal.

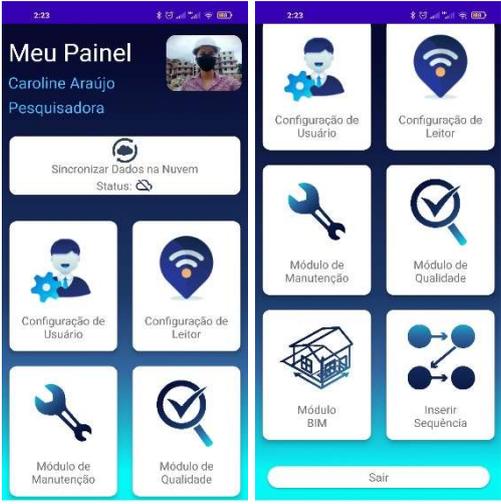
Figura 100 - Configurações feitas para habilitar o uso do leitor no sistema.

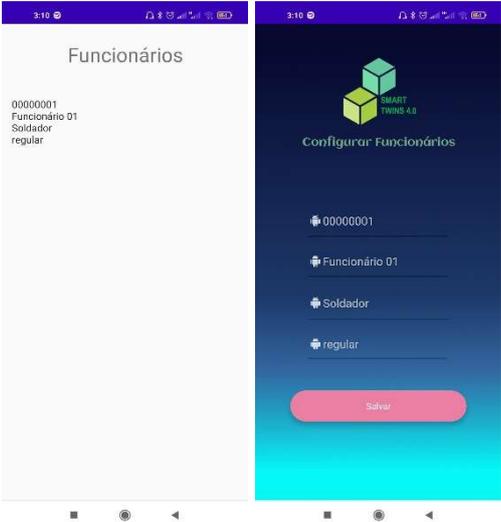


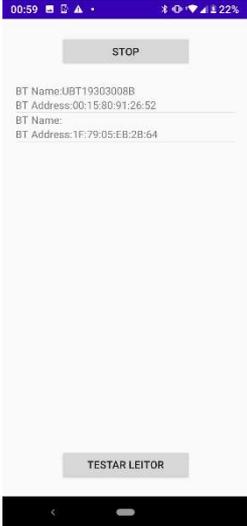
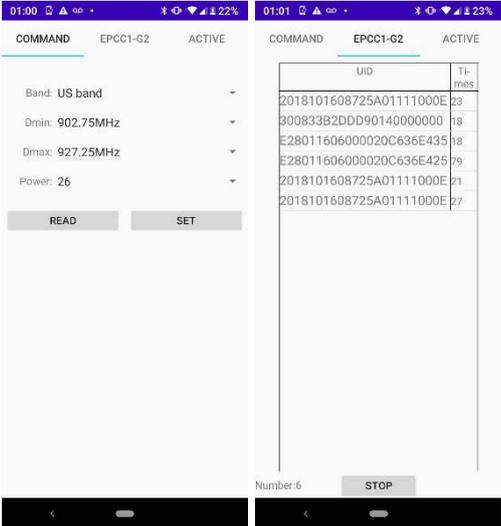
Em seguida o aplicativo é apresentado do ponto de vista da descrição do seu Front-End (interface), com descrição tela a tela das suas funções.

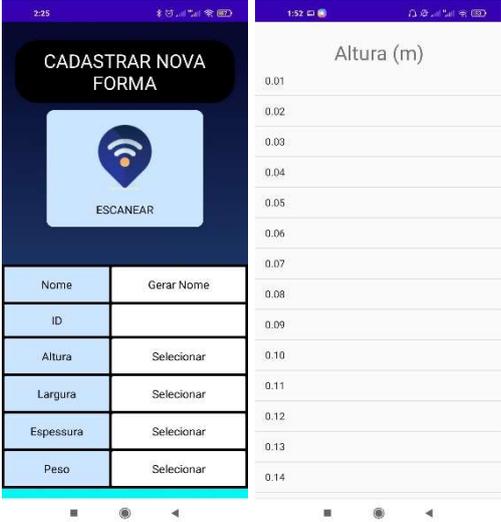
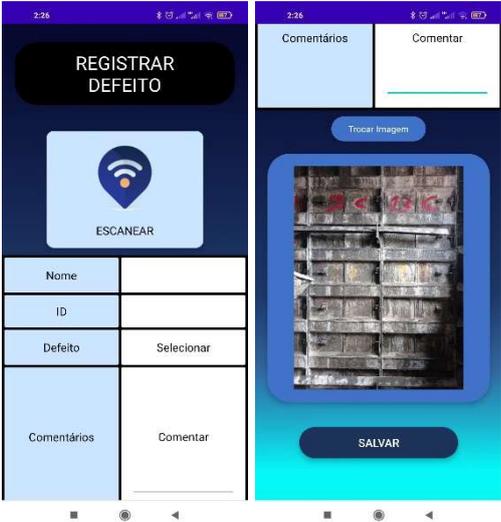
Quadro 28 - Descrição da interface do aplicativo.

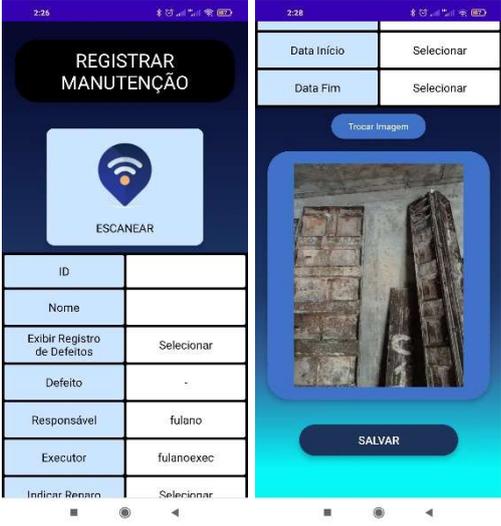
TELA	INTERFACE DO APLICATIVO	DESCRIÇÃO
TELA INICIAL		<p>Na tela inicial o usuário tem acesso a opções de log-in no aplicativo, inserindo e-mail cadastrado e senha. Caso o usuário não esteja cadastrado, existe a opção de se registrar.</p>
CRIAR UMA NOVA CONTA		<p>Para criar uma nova conta o usuário deve inserir:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nome completo • E-mail • Senha para acesso • Número de Telefone • Cargo na empresa <p>Além disso, o usuário pode inserir uma imagem sua antes de finalizar o cadastro</p>

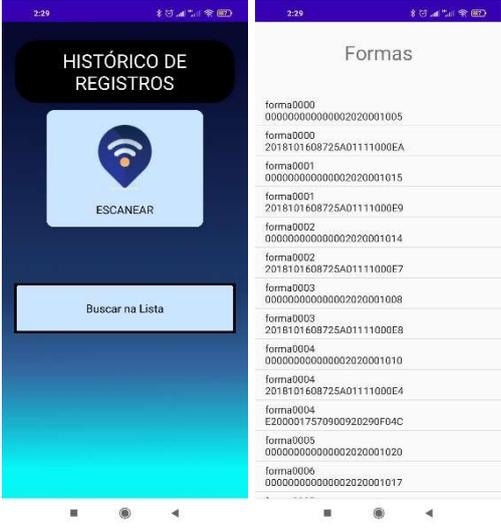
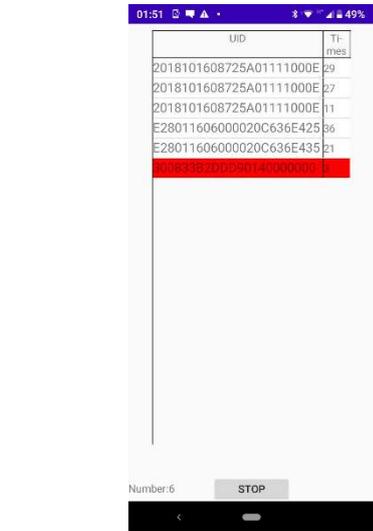
TELA	INTERFACE DO APLICATIVO	DESCRIÇÃO
PAINEL PRINCIPAL		<p>Esta é a tela principal do aplicativo, que concentra os principais módulos desenvolvidos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Configuração de Usuário • Configuração de Leitor • Módulo de Manutenção • Módulo de Qualidade • Módulo BIM • Inserir Sequência <p>Além disso, existe um botão na parte superior que indica se os dados já foram ou não sincronizados na Nuvem. Na parte inferior há a opção de sair do aplicativo.</p>
CONFIGURAÇÕES DE USUÁRIO		<p>No módulo de Configuração de Usuário é possível:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Configurar um cadastro existente • Adicionar uma nova obra • Adicionar os funcionários da obra • Configurar funcionários já cadastrados
CONFIGURAÇÕES DE CADASTRO		<p>Para configurar um cadastro existente, o usuário poderá alterar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nome cadastrado • E-mail cadastrado • Telefone cadastrado • Cargo cadastrado • Imagem • Senha <p>Além disso, é indicado se o usuário possui acesso comum (denominado Usuário), ou se possui acesso como Administrador.</p>

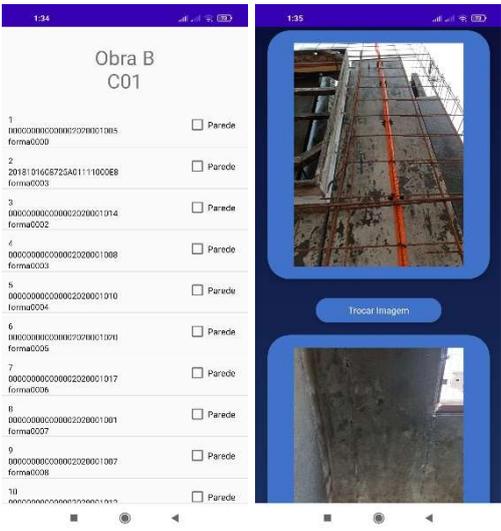
TELA	INTERFACE DO APLICATIVO	DESCRIÇÃO
ADICIONAR NOVA OBRA		<p>Nesta tela é possível cadastrar uma nova obra mediante a inserção das seguintes informações:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nome da Obra • Quantidade de blocos (edifícios) • Quantidade de pavimentos por bloco • Quantidade de apartamentos • Quantidade de cômodos <p>Esses dados são importantes para compor o Gêmeo Digital e para o módulo de Inserir Sequência.</p>
ADICIONAR NOVOS FUNCIONÁRIOS		<p>Nesta tela é possível inserir os seguintes dados do funcionário:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chapa (numeração da empresa) • Nome completo • Cargo na empresa • Situação (regular/demitido) <p>Mais informações poderão ser adicionadas conforme necessidades das empresas. Também é possível configurar essa função para cadastrar automaticamente os funcionários a partir de uma planilha do Excel.</p>
CONFIGURAR FUNCIONÁRIOS		<p>Nesta tela é possível selecionar um dos funcionários cadastrados e alterar informações cadastradas na tela anterior.</p>

TELA	INTERFACE DO APLICATIVO	DESCRIÇÃO
CONFIGURAÇÃO DE LEITOR		<p>Esta é a primeira tela do módulo de Configuração do Leitor, onde o usuário pode detectar e parear o leitor RFID com o dispositivo móvel via Bluetooth.</p>
CONFIGURAÇÃO DE LEITOR		<p>Nestas telas, ainda do módulo de Configuração do Leitor é possível fazer ajustes sobre:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Padrão de leitura (americano, chinês e etc.) • Frequência mínima de leitura • Frequência máxima de leitura • Distância de leitura
MÓDULO DE MANUTENÇÃO		<p>No Módulo de Manutenção é possível:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cadastrar uma nova forma • Alterar o cadastro de formas existentes • Registrar defeitos observados • Registrar manutenções • Ter acesso ao histórico de registro para gerar relatórios • Procurar uma forma por aproximação do leitor.

TELA	INTERFACE DO APLICATIVO	DESCRIÇÃO
CADASTRAR NOVA FORMA		<p>Nesta tela, o usuário deve escanear a <i>tag</i> com o leitor, o que atualiza ID automaticamente. Ao clicar em Gerar Nome, a forma é nomeada automaticamente com um código alfanumérico sequencial. O usuário deve preencher:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altura da nova forma • Largura • Espessura • Peso.
ALTERAR CADASTRO DE FORMA		<p>Nesta tela, caso alguma forma tenha sofrido alterações em alguns dos parâmetros registrados, é possível alterar o cadastro. Para isso o usuário pode escanear a respectiva <i>tag</i> ou então buscar a forma em uma lista através do seu código alfanumérico.</p>
REGISTRAR DEFEITO		<p>Nesta tela é possível registrar defeitos observados em determinada forma. Ao escanear a respectiva <i>tag</i> com o leitor RFID, o aplicativo preenche automaticamente os campos Nome e ID. O usuário seleciona os defeitos observados e deve inserir uma foto indicando esse defeito. Além disso, é possível inserir comentários adicionais.</p>

TELA	INTERFACE DO APLICATIVO	DESCRIÇÃO
DEFEITOS		<p>Esta é a tela que abre para que o usuário possa selecionar um ou múltiplos defeitos entre os previamente cadastrados, com base nos defeitos listados na Seção 5.1.2. A lista pode ser ampliada a depender da demanda das empresas.</p>
REGISTRAR MANUTENÇÃO		<p>Nesta tela é possível registrar todas as manutenções realizadas na forma. Ao escanear a respectiva <i>tag</i> com o leitor RFID, o aplicativo preenche automaticamente os campos Nome e ID. O usuário pode exibir os últimos defeitos relatados sobre a forma.</p> <p>O usuário deve inserir o funcionário responsável pela manutenção, o funcionário executor, o tipo de manutenção e a data de início e data de fim da manutenção, além de uma foto indicando a forma reparada.</p>
MANUTENÇÃO		<p>Esta é a tela que abre para que o usuário possa selecionar um ou múltiplos tipos de manutenção entre as previamente cadastradas, com base nos tipos de manutenção listados na Seção 5.1.2. A lista pode ser ampliada a depender da demanda das empresas.</p>

TELA	INTERFACE DO APLICATIVO	DESCRIÇÃO																										
HISTÓRICO DE REGISTROS	 <p>Formas</p> <table border="1"> <tbody> <tr><td>forma0000</td><td>00000000000000002020001005</td></tr> <tr><td>forma0000</td><td>2018101608725A01111000EA</td></tr> <tr><td>forma0001</td><td>00000000000000002020001015</td></tr> <tr><td>forma0001</td><td>2018101608725A01111000E9</td></tr> <tr><td>forma0002</td><td>00000000000000002020001014</td></tr> <tr><td>forma0002</td><td>2018101608725A01111000E7</td></tr> <tr><td>forma0003</td><td>00000000000000002020001008</td></tr> <tr><td>forma0003</td><td>2018101608725A01111000E8</td></tr> <tr><td>forma0004</td><td>00000000000000002020001010</td></tr> <tr><td>forma0004</td><td>2018101608725A01111000E4</td></tr> <tr><td>forma0004</td><td>E2000017579900920290F04C</td></tr> <tr><td>forma0005</td><td>00000000000000002020001020</td></tr> <tr><td>forma0006</td><td>00000000000000002020001017</td></tr> </tbody> </table>	forma0000	00000000000000002020001005	forma0000	2018101608725A01111000EA	forma0001	00000000000000002020001015	forma0001	2018101608725A01111000E9	forma0002	00000000000000002020001014	forma0002	2018101608725A01111000E7	forma0003	00000000000000002020001008	forma0003	2018101608725A01111000E8	forma0004	00000000000000002020001010	forma0004	2018101608725A01111000E4	forma0004	E2000017579900920290F04C	forma0005	00000000000000002020001020	forma0006	00000000000000002020001017	<p>Nesta tela é possível acessar o histórico de registros relacionados à determinada forma para a geração de relatórios, com dados organizados por data e hora. Para isso o usuário pode escanear a respectiva <i>tag</i> ou então buscar a forma em uma lista através do seu código alfanumérico ou ID da <i>tag</i>.</p>
forma0000	00000000000000002020001005																											
forma0000	2018101608725A01111000EA																											
forma0001	00000000000000002020001015																											
forma0001	2018101608725A01111000E9																											
forma0002	00000000000000002020001014																											
forma0002	2018101608725A01111000E7																											
forma0003	00000000000000002020001008																											
forma0003	2018101608725A01111000E8																											
forma0004	00000000000000002020001010																											
forma0004	2018101608725A01111000E4																											
forma0004	E2000017579900920290F04C																											
forma0005	00000000000000002020001020																											
forma0006	00000000000000002020001017																											
HISTÓRICO DE REGISTROS	 <p>NOME: forma0000</p> <p>UIDB: 00000000000000002020001005</p> <p>NOME: forma0000</p> <p>HISTÓRICO DE CADASTROS</p> <p>HISTÓRICO DE DEFEITOS</p> <p>HISTÓRICO DE MANUTENÇÕES</p>	<p>Nesta tela está indicada a tela para exibição dos seguintes relatórios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Histórico de cadastros (primeiro cadastro da forma e posteriores alterações) • Histórico de todos os defeitos já registrados sobre a forma • Histórico de todas as manutenções já registradas sobre a forma. 																										
PROCURAR APROXIMAÇÃO	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>UID</th> <th>Times</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2018101608725A01111000E</td><td>29</td></tr> <tr><td>2018101608725A01111000E</td><td>27</td></tr> <tr><td>2018101608725A01111000E</td><td>11</td></tr> <tr><td>E28011606000020C636E425</td><td>36</td></tr> <tr><td>E28011606000020C636E435</td><td>21</td></tr> <tr><td>E28011606000020C636E435</td><td>21</td></tr> </tbody> </table> <p>Number:6 STOP</p>	UID	Times	2018101608725A01111000E	29	2018101608725A01111000E	27	2018101608725A01111000E	11	E28011606000020C636E425	36	E28011606000020C636E435	21	E28011606000020C636E435	21	<p>Esta tela é referente à função de procurar uma <i>tag</i> por aproximação, utilizada para encontrar uma determinada forma. Para isso é necessário selecionar a forma de interesse em uma lista. Ao ler a <i>tag</i> procurada, esta fica em vermelho na tela, enquanto o dispositivo móvel vibra para alertar o usuário.</p>												
UID	Times																											
2018101608725A01111000E	29																											
2018101608725A01111000E	27																											
2018101608725A01111000E	11																											
E28011606000020C636E425	36																											
E28011606000020C636E435	21																											
E28011606000020C636E435	21																											

TELA	INTERFACE DO APLICATIVO	DESCRIÇÃO
MÓDULO BIM		<p>Esta é a primeira tela do Módulo BIM, que permite o acesso ao Gêmeo Digital com todas as funcionalidades que foram previamente apresentadas.</p>
INSERIR SEQUÊNCIA		<p>Esta é a primeira tela do módulo para Inserir Sequência, relacionado à captura de sequência de montagem das formas. A Leitura Teste refere-se à leitura de referência, preferencialmente feita no galpão. A Leitura Real refere-se às leituras feitas na obra.</p>
MÓDULO DE QUALIDADE		<p>Estas telas são referentes ao Módulo de Qualidade, onde o usuário insere imagens de trechos das paredes correspondentes às posições das formas geradoras, para comparar visualmente os defeitos nas formas com as não conformidades nas paredes.</p>

ANEXO A - DIRETRIZES ADOTADAS NA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SOBRE IOT NO BRASIL

O mesmo procedimento utilizado por Machado (2018) foi adotado, porém considerando o novo período de tempo. A busca foi realizada no Banco de Dissertações e Teses do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) e no Banco de Teses da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), com os termos Internet das Coisas, *Internet of Things* ou IoT. Os termos de busca empregados em todos os campos foram: Internet das Coisas, *Internet of Things* ou IoT, considerando-se o intervalo temporal de 2017 a 2019, escolhido para complementar os dados encontrados por Machado (2018) e ampliar o conhecimento referente à evolução das publicações. Por fim, foram definidos critérios de inclusão e exclusão dos estudos, estabelecidos conforme Machado (2018): (i) conter ao menos um dos termos de busca no título, resumo ou palavras-chave da dissertação ou tese; (ii) estar inserido no intervalo temporal definido (2017-2019); e (iii) estar disponível para consulta em meio eletrônico.