



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

AMANDA DA SILVA BARBOSA

**MÉTODO PARA MONITORAMENTO DO PROGRESSO E
TERMINALIDADE DE ATIVIDADES INTERNAS E EXTERNAS DE
OBRAS UTILIZANDO BIM, RPA E CÂMERA 360º**

Salvador

2022

AMANDA DA SILVA BARBOSA

**MÉTODO PARA MONITORAMENTO DO PROGRESSO E
TERMINALIDADE DE ATIVIDADES INTERNAS E EXTERNAS DE
OBRAS UTILIZANDO BIM, RPA E CÂMERA 360º**

Dissertação de mestrado 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

Agência Financiadora: CAPES

Salvador

2022

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

Barbosa, Amanda da Silva

Método para monitoramento do progresso e
terminalidade de atividades internas e externas de
obras utilizando BIM, RPA e câmera 360° / Amanda da
Silva Barbosa. -- Salvador, 2022.

160 f. : il

Orientadora: Dayana Bastos Costa.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós Graduação em
Engenharia Civil da UFBA) -- Universidade Federal da
Bahia, Escola Politécnica, 2022.

1. Monitoramento do Progresso de Obras. 2.
Aeronaves Remotamente Pilotadas. 3. Câmera 360°. 4.
Captura da Realidade. 5. Building Information
Modeling (BIM). I. Costa, Dayana Bastos. II. Título.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

AMANDA DA SILVA BARBOSA

APRESENTADA AO MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, EM 02 DE SETEMBRO DE 2022.

BANCA EXAMINADORA



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

Orientadora

PPEC-UFBA



Documento assinado digitalmente
Reymard Sávio Sampaio de Melo
Data: 11/09/2022 10:12:24-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof.(a) Dr.(a) **Reymard Sávio Melo**

PPEC- UFBA



Documento assinado digitalmente
Fernanda Fernandes Marchiori
Data: 04/09/2022 11:25:59-0300
CPF: 801.157.720-49
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof.(a) Dr.(a) **Fernanda Fernandes Marchiori**

PPGEC -UFSC



Documento assinado digitalmente
ELVIRA MARIA VIEIRA LANTELME
Data: 05/09/2022 07:40:47-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof.(a) Dr.(a) **Elvira Maria Vieira Lantelme**

PPGEC – ATITUS Educação

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por nunca ter me desamparado, por se mostrar presente na minha vida em cada dia, me dando motivos para prosseguir mesmo nos momentos difíceis.

Agradeço aos primeiros que investiram em mim nessa Terra: meus pais Cristovam e Renilva, que me proporcionaram a melhor educação possível dentro das suas condições.

Agradeço à minha orientadora Dayana Costa por ter guiado com destreza meus passos ao longo do desenvolvimento desse trabalho. Mais do que isso, meus agradecimentos também são por todos os conselhos, pela paciência e por todos os incentivos que a senhora sempre me deu.

À Marcos por todo o carinho, companheirismo, cuidado e incentivo ao meu sucesso.

Aos professores Sávio Melo, Emerson Ferreira, Elvira Lantelme e Fernanda Marchiori que participaram das bancas de projeto, qualificação e defesa, trazendo observações importantes para a melhoria do trabalho.

Aos alunos de Iniciação Científica Kayan Santana e Rafael Macedo pelo apoio no desenvolvimento desse trabalho, tornando possível a sua conclusão.

Aos meus amigos do Vieira, que sempre torceram por mim e são os melhores amigos que eu poderia ter.

A todos do GETEC pela amizade, união e parceria durante essa jornada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado que me permitiu ter dedicação exclusiva a este trabalho.

À empresa parceira e seus funcionários que sempre gentilmente abriram as portas dos seus canteiros de obras para a realização desse estudo.

RESUMO

O monitoramento do progresso de obras é uma das práticas mais importantes para se alcançar o sucesso de uma construção, sendo um processo que reflete a performance da obra com relação ao prazo, custo, qualidade, segurança, dentre outros aspectos. Entretanto, o método tradicional de monitoramento de progresso é suscetível a falhas, pois depende fortemente da experiência e visualização humana. Além disso, a maioria dos estudos desenvolvidos visando o monitoramento do progresso de obras têm uma lacuna devido ao foco predominante em áreas externas. Dessa forma, o objetivo principal desse estudo é propor um método para o monitoramento visual do progresso de obras destinado ao acompanhamento de atividades internas e externas, utilizando *Building Information Modeling* (BIM), Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) e câmera 360°. Para isso, nesse estudo foi adotada a estratégia da *Design Science Research* (DSR), sendo desenvolvido por meio das fases de conscientização, sugestão, desenvolvimento, avaliação e conclusão. A etapa de conscientização do problema envolveu revisão da literatura acerca do monitoramento do progresso de obras no contexto da Construção 4.0, bem como o entendimento do problema. Na etapa de sugestão do artefato foi realizado um estudo empírico na Obra A, de um conjunto residencial multifamiliar com 20 edifícios em que se testou a coleta de dados com uso de RPA e câmera 360°. Também foram estudadas as formas mais eficientes de se trabalhar com as fotografias 360° internas e foram realizados testes visando a integração desses dados em diferentes softwares BIM 4D. A partir desses experimentos foi possível definir e fundamentar uma proposta inicial de método para monitoramento do progresso de obras com uso das tecnologias propostas. A etapa de desenvolvimento contou com a realização de um estudo empírico na Obra B, que corresponde a um conjunto residencial com 13 edifícios, para aplicação e avaliação do método proposto. Após a aplicação, o método foi avaliado e mensurado em escala Likert com base nos seguintes constructos: potencial de impactar na identificação e avaliação do progresso da obra, contribuição para a transparência, utilidade, facilidade de adoção e generalização para outras empresas e contextos. Como resultados, o método apresentou como pontos positivos a sua simplicidade, clareza e facilidade para visualização do progresso da obra. A câmera 360° se mostrou útil para o monitoramento do progresso, com potencial também para aplicações voltadas para verificação da qualidade da execução dos serviços. Como principal contribuição deste estudo, tem-se a proposição de um método para monitoramento visual do progresso de obras com uso de BIM, RPA e câmera 360°, compreendendo procedimentos de preparação, coleta, processamento, análise de dados e tomada de decisão em relação ao avanço da obra e possíveis desvios de progresso. Para auxiliar na operacionalização do método em contextos de obras, também foram propostas recomendações e foi desenvolvido um protocolo para integração dos dados visuais coletados ao modelo BIM 4D.

Palavras-chave: Monitoramento do Progresso de Obras. Aeronaves Remotamente Pilotadas. Câmera 360°. Captura da Realidade. *Building Information Modeling* (BIM).

ABSTRACT

Construction progress monitoring is one of the most important practices to achieve the success of construction, being a process that reflects the performance of the work in terms of time, cost, quality, and safety, among other aspects. However, the traditional progress monitoring method is prone to errors, as it relies heavily on human experience and visualization. In addition, most studies of progress monitoring have a gap due to the predominant focus on external areas. Thus, the main objective of this study is to propose a method for visually monitoring the progress of indoor and outdoor activities using Building Information Modeling (BIM), Unmanned Aerial System (UAS), and a 360° camera. For this, the Design Science Research (DSR) strategy was adopted in this study. Following the steps of the DSR, the study was developed through the phases of awareness, suggestion, development, evaluation, and conclusion. The problem awareness stage was developed by reviewing the literature on progress monitoring in Construction 4.0. In the suggestion stage, an empirical study was carried out at Jobsite A, a multifamily residential complex with 20 buildings in which data collection was tested using UAS and 360° camera. The most efficient ways of working with internal 360° photographs were studied and tests were carried out aiming at the integration of these data in different BIM 4D software. Based on these experiments, it was possible to define an initial proposal for a method for construction progress monitoring using the proposed technologies. The development stage involved another empirical study to validate the proposed method in Jobsite B, which corresponds to a residential complex with 13 buildings. After implementation, the method was evaluated and measured on a Likert scale based on the following constructs: the potential to impact the identification and evaluation of progress, contribution to transparency, utility, ease of adoption, and generalization to other companies and contexts. As a result, the method presented positive points in its simplicity, clarity, and easiness to visualizing the construction progress. The 360° camera proved to be useful for monitoring progress, with the potential also for applications to verify the quality of the execution of activities. As the main contribution of this study, there is the proposal of a method for visually monitoring the construction progress using BIM, UAS, and 360° camera, comprising procedures for preparation, collection, processing, data analysis, and decision-making concerning the construction progress. To assist in the operationalization of the method in construction contexts, recommendations were also proposed, and a protocol was developed to integrate the visual data collected into the 4D BIM model.

Keywords: Construction Progress Monitoring. Unmanned Aerial System (UAS). 360° Camera. Reality Capture. Building Information Modeling (BIM).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diferença entre a terceira e quarta revolução industrial.....	15
Figura 2 – Modelo em camadas da Construção 4.0 e seus principais componentes	17
Figura 3 – O paradigma do gêmeo digital	19
Figura 4 – Visualização esquemática do fluxo de dados unidirecional e bidirecional para distinguir sombra digital de gêmeo digital	20
Figura 5 – Diferença entre BIM e gêmeos digitais de acordo com o nível de riqueza das informações que ambos são capazes de prover	22
Figura 6 – Componentes para criação de um gêmeo digital através de BIM	24
Figura 7 – Ciclo PDCA	25
Figura 8 – Níveis hierárquicos do planejamento de acordo com o Sistema <i>Last Planner</i>	27
Figura 9 – Arquitetura de um gêmeo digital proposto para um projeto de construção.....	30
Figura 10 – Algumas formas de coleta de dados visuais em campo e sua frequência estimada	32
Figura 11 – Comparação entre: (a) fotografia do estado atual e imagem mais semelhante do modelo encontrada, e (b) detecção de objetos na fotografia e na imagem do modelo.....	34
Figura 12 – Localização da perspectiva da câmera no modelo BIM	35
Figura 13 – Etapas da reconstrução 3D fotogramétrica	37
Figura 14 – Alguns tipos de RPA: (a) de asa fixa; (b) e (c) de asas rotativas	38
Figura 15 – Processo para obtenção de informações espaciais através de RPA	39
Figura 16 – Fotografia 360 graus em formato equirretangular, seu formato nativo	41
Figura 17 – Fotografia 360° em seu formato imersivo, exibida em quatro enquadramentos de visualização diferentes no aplicativo Panorama Viewer....	41
Figura 18 - Processo utilizado por Mahami <i>et al.</i> (2019) para medição do progresso	46
Figura 19 - Exemplo de modelo sobreposto (nuvem de pontos e BIM) com os indicadores de cores para identificação do status de progresso em simulação 4D	46
Figura 20 – Filtragem de elementos na nuvem de pontos: (a) uma laje de concreto; (b) um pilar	47
Figura 21 – Ideação do método com base nos principais conceitos e ferramentas identificados na literatura	50
Figura 22 - Delineamento geral das etapas da pesquisa	53
Figura 23 – Implantação da Obra A	55
Figura 24 – Plantas do (a) pavimento tipo 1 e (b) pavimento tipo 2	55
Figura 25 – DJI Phantom 4	56
Figura 26 – Câmera 360° utilizada no estudo	57
Figura 27 – Procedimento adotado para coleta de imagens com RPA e processamento fotogramétrico	58

Figura 28 – Câmera 360 e acessório para capacete	60
Figura 29 – (a) Exemplos de marcadores utilizados pelo software Metashape; (b) marcadores colocados no ambiente	61
Figura 30 – Fotografia 360° (a) Antes de aplicar a máscara; (b) Com a área de aplicação da máscara delimitada no Metashape	63
Figura 31 – Procedimento adotado para coleta de imagens com câmera 360° e processamento fotogramétrico.....	64
Figura 32 – Ambiente do Synchro com elementos do modelo 3D e planilha de planejamento.....	66
Figura 33 – (a) Implantação da Obra B e (b) apartamento tipo da Obra B	68
Figura 34 – Modelo 3D BIM da Obra B.....	70
Figura 35 – Modelo 4D BIM da obra B desenvolvido no Navisworks.....	70
Figura 36 – Modelo 4D com atividades atrasadas em vermelho e problema de terminalidade destacado através do uso de tag, nuvem de revisão e comentário	71
Figura 37 – Estrutura analítica simplificada da pesquisa	73
Figura 38 – Plano de captura para o apartamento da obra A	80
Figura 39 – Fotografia em formato equirretangular no Metashape com máscara aplicada na região do capacete e marcadores automaticamente identificados pelo software.....	82
Figura 40 – Visualização no ambiente do Metashape de (a) nuvem de pontos interna da Obra A, e (b) modelo 3D texturizado do mesmo local.....	84
Figura 41 – Visualização no ambiente do Metashape de (a) nuvem de pontos externa da Obra A, e (b) modelo 3D texturizado do mesmo local.....	85
Figura 42 – Exemplo de visualização no Synchro do modelo BIM 4D ao lado do modelo 3D texturizado (a) da área externa da obra e (b) internamente em um dos apartamentos	86
Figura 43 – Visualização em duas janelas (a) do estado planejado da obra no modelo BIM 4D, e (b) do estado real na fotografia 360°	88
Figura 44 – Representação esquemática do método proposto.....	90
Figura 45 – Nuvens de pontos da Obra B ao longo dos meses em que o segundo estudo empírico foi realizado	95
Figura 46 – Fotografias 360° dos apartamentos do 2º pavimento do Bloco 18 ao longo dos meses na Obra B.....	96
Figura 47 – (a) Hall de um dos edifícios da obra no modelo BIM 4D; (b) Fotografia 360° do mesmo local.....	97
Figura 48 – Estrutura final do método para monitoramento do progresso de obras com uso de BIM, RPA e câmera 360°	108
Figura 49 – Protocolo de integração de dados visuais ao modelo BIM 4D para monitoramento do progresso de obras	113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Diferentes ciclos de monitoramento e controle com uso de gêmeos digitais	28
Quadro 2 – Algumas soluções de softwares e aplicativos móveis desenvolvidas para o monitoramento do progresso de obras com uso de câmeras 360°	48
Quadro 3 – Visitas realizadas à Obra A no estudo empírico	54
Quadro 4 – Dados das coletas de campo com RPA no estudo empírico realizado na Obra A	59
Quadro 5 – Dados das coletas de imagens com a câmera 360° no estudo empírico na Obra A	61
Quadro 6 – Média de fotos coletadas e tempo de coleta para um apartamento nos modos HDR e modo automático a cada 5 segundos	62
Quadro 7 – Softwares utilizados para modelagem 3D e BIM 4D	65
Quadro 8 – Dados das coletas em campo com RPA na Obra B	69
Quadro 9 – Dados das coletas em campo com câmera 360° na Obra B	69
Quadro 10 – Caracterização da equipe gerencial da empresa construtora entrevistada no segundo estudo empírico	75
Quadro 11 – Constructos e variáveis para avaliação do artefato	76
Quadro 12 - Dados da reconstrução 3D fotogramétrica para um único apartamento das obras A e B	83
Quadro 13 - Dados da reconstrução 3D fotogramétrica para a área externa das obras A e B	84
Quadro 14 – Principais diferenças observadas com relação à utilização do modelo 3D texturizado e das fotografias 360° para representação do estado atual de ambientes internos da obra	89
Quadro 15 – Ferramentas sugeridas para apoio à implementação do método	92
Quadro 16 – Dados relativos à coleta de fotografias externas com RPA no segundo estudo empírico	94
Quadro 17 – Dados relativos à coleta de fotografias internas com câmera 360° no segundo estudo empírico	94
Quadro 18 – Problemas identificados nas imagens da câmera 360° que impactam na falta de terminalidade das atividades	98
Quadro 19 – Resultado das entrevistas para avaliação do constructo de impacto na identificação e avaliação do progresso da obra	100
Quadro 20 – Resultado das entrevistas para avaliação do constructo Transparência	101
Quadro 21 – Resultado das entrevistas para avaliação do constructo Utilidade	102
Quadro 22 – Benefícios, barreiras e oportunidades de melhoria levantados pelas entrevistas realizadas	103
Quadro 23 – Resultado das entrevistas para avaliação do constructo facilidade de adoção do método proposto	105
Quadro 24 – Resultado das entrevistas para avaliação do constructo generalização do método para outras empresas e contextos	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	Analista de Custo e Planejamento
ADM	Administrativo
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BA	Bahia
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CP	Coordenadora de Planejamento
DSR	<i>Design Science Research</i>
EAP	Estrutura Analítica de Projeto
GETEC	Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das Construções
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSA	Gerente de SGI e ADM
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HDR	<i>High Dynamic Range</i>
ICP	<i>Iterative Closest Point</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LPS	<i>Last Planner System</i>
MP	Megapixel
MVS	Multi View Stereo
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Act</i>
RPA	<i>Remotely-Piloted Aircraft</i>
SfM	<i>Structure from Motion</i>
SGI	Sistema de Gestão Integrada
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>
TC	Técnico em Planejamento
TG	Trainee Gerencial
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VSLAM	<i>Visual Simultaneous Localization and Mapping</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	1
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA	4
1.3 QUESTÕES DE PESQUISA	8
1.3.1 Questão Principal	8
1.3.2 Questões Secundárias	8
1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA	8
1.4.1 Objetivo principal	8
1.4.2 Objetivos secundários	8
1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	9
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2 MONITORAMENTO DO PROGRESSO DE OBRAS NO CONTEXTO DA CONSTRUÇÃO 4.0	11
2.1 PROGRESSO VERSUS TERMINALIDADE DE OBRAS	11
2.2 CONSTRUÇÃO 4.0	14
2.3 USO DE GÊMEOS DIGITAIS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO	18
2.3.1 O papel do BIM no desenvolvimento de gêmeos digitais	21
2.3.2 Uso de gêmeos digitais no planejamento e controle da produção	24
2.4 TECNOLOGIAS PARA COLETA DE DADOS AS BUILT ATRAVÉS DE IMAGENS PARA MONITORAMENTO DO PROGRESSO DE OBRAS	30
2.4.1 Uso de fotografias e vídeos	33
2.4.2 Fotogrametria	35
2.4.3 Aeronave Remotamente Pilotada	38
2.4.4 Câmera 360º	40
2.4.5 Uso de nuvens de pontos e câmera 360º para o monitoramento do progresso de obras	43
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E IDEAÇÃO DO MÉTODO	49
3 MÉTODO DE PESQUISA	51

3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	51
3.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA	52
3.3 ETAPA DE CONSCIENTIZAÇÃO.....	53
3.4 ETAPA DE SUGESTÃO – ESTUDO EMPÍRICO NA OBRA A	53
3.4.1 Caracterização geral da Obra A.....	54
3.4.2 Testes para coleta e processamento de fotografias da área externa da obra com uso de RPA	57
3.4.3 Testes para coleta e processamento de fotografias de áreas internas da obra com câmera 360°	59
3.4.4 Testes de ferramentas e processos para geração de modelo BIM 4D e sobreposição com modelo 3D texturizado 	65
3.5 ETAPA DE DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO – ESTUDO EMPÍRICO NA OBRA B	67
3.5.1 Caracterização geral da Obra B.....	67
3.5.2 Implementação do método proposto na Obra B	68
3.6 ETAPA DE AVALIAÇÃO DO ARTEFATO	72
3.7 ETAPA DE CONCLUSÃO – FORMATAÇÃO FINAL DO MÉTODO	76
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	78
4.1 PROTOCOLO PARA COLETA E PROCESSAMENTO DE FOTOGRAFIAS 360° DE AMBIENTES INTERNOS DA OBRA	78
4.1.1 Coleta de fotografias 360° de ambientes internos da obra 	78
4.1.2 Processamento fotogramétrico de fotografias 360° de ambientes internos da obra	81
4.1.3 Integração de dados visuais do estado atual da obra ao modelo BIM 4D para identificação e visualização do progresso 	85
4.2 PROPOSTA PRELIMINAR DE MÉTODO PARA MONITORAMENTO VISUAL DO PROGRESSO DE OBRAS COM USO DE BIM, RPA E CÂMERA 360°	89
4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO NA OBRA B.....	93

4.4 AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO COM BASE NOS CONSTRUCTOS DE PESQUISA	99
4.4.1 Avaliação do impacto proporcionado pela adoção das tecnologias propostas para o monitoramento do progresso	100
4.4.2 Avaliação da estrutura do método proposto	102
4.5 MÉTODO PARA MONITORAMENTO DO PROGRESSO DE OBRAS COM USO DE BIM, RPA E CÂMERA 360º.....	107
4.5.1 Apresentação da estrutura final do método proposto	107
4.5.2 Recomendações para implementação do método proposto	109
4.5.3 Protocolo para integração dos dados obtidos através de câmera 360º e RPA no modelo BIM 4D para o monitoramento do progresso de obras	111
4.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	114
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	119
REFERÊNCIAS	124

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com o relatório *Rise of the platform era: the next chapter in construction technology* produzido pela McKinsey, o cenário de pandemia que vigorou no mundo a partir do ano de 2020 evidenciou ainda mais os problemas de baixa produtividade e inovação preexistentes na construção civil (BARTLETT *et al.*, 2020).

Segundo relatório da Deloitte, a pandemia causou efeitos indesejados no planejamento das obras devido ao enfrentamento de problemas como atrasos ou suspensão de projetos, dificuldade na obtenção de licenças de construção e dificuldade em adquirir materiais e equipamentos (MEISELS, 2020). O *Global Construction Survey 2019* da KPMG (2019), por sua vez, mostra que em empresas líderes em inovação, 66% dos projetos alcançam 90% de aderência com o cronograma planejado. Segundo este relatório, a transparência no acesso a informações da construção pode significar a diferença entre um pequeno ajuste de curso e um atraso significativo da obra (ARMSTRONG; GILGE; MAX, 2019).

Diferentemente da produção industrial, as etapas de processamento nos canteiros de obras são extremamente dinâmicas devido ao alto grau de incertezas, às fortes dependências entre as etapas de um único processo e ao fato de que cada construção possui características únicas (TUTTAS *et al.*, 2017). Por essas razões, é comum na construção civil que o estado real de uma obra se desvie do planejado, o que reforça a necessidade do monitoramento e atualização constante do progresso planejado da construção. O acompanhamento, análise e visualização de forma precisa e eficiente do status da construção é fundamental para dar subsídios à análise e tomada de decisão quanto ao desempenho da obra (GOLPARVAR-FARD; PEÑA-MORA; SAVARESE, 2015), possibilitando a detecção precoce de possíveis atrasos no seu cronograma e facilitando a comunicação efetiva de informações sobre o progresso (ASADI *et al.*, 2019).

As informações do estado atual de uma obra, necessárias para avaliar o seu progresso, não são fáceis de serem obtidas, devido às mudanças frequentes que ocorrem ao longo da construção (KIM; KIM; LEE, 2020). Em razão da falta de informações de *as-built* disponíveis, a coleta de dados do estado atual da obra para monitoramento do progresso tradicionalmente pode ser realizada através de

observações visuais, com auxílio de cronogramas e projetos (KROPP; KOCH; KÖNIG, 2018). Tais dados são, então, registrados em planilhas, relatórios ou no diário da obra, para posterior comparação com o estado planejado nos cronogramas, o que torna esse processo excessivamente manual, propício a erros e pouco transparente (TUTTAS *et al.*, 2017).

Além disso, normalmente, a tomada de decisão para as ações de controle e revisão do planejamento ocorrem em reuniões de coordenação com a presença de profissionais encarregados por alguma área específica e subcontratados. Segundo Golparvar-Fard *et al.* (2015), nessas interações, as informações de progresso precisam ser comunicadas de maneira fácil e rápida entre os participantes, o que nem sempre é possível utilizando as ferramentas convencionais, como planilhas, gráficos de barras e projetos em 2D.

As representações em 2D comumente utilizadas fazem com que uma quantidade significativa de informações seja apresentada de maneira ineficiente, o que reforça a necessidade de um método de monitoramento visual eficaz que permita que as informações possam ser transmitidas com clareza para todas as partes envolvidas (HAN; DEGOL; GOLPARVAR-FARD, 2018). Neste sentido, a utilização de informações geométricas tridimensionais é fundamental em um processo de monitoramento do progresso, pois garante que as informações coletadas acerca do estado atual da execução do projeto não sejam subjetivas, reproduzindo exatamente o trabalho desenvolvido até o momento em que foi registrada (PURI; TURKAN, 2020).

McHugh, Koskela e Tezel (2021) indicam que uma das consequências trazidas pela pandemia foi uma maior fragmentação das equipes de trabalho, fato que impactou processos colaborativos de planejamento da obra, como o sistema *Last Planner*. Estes autores identificaram que o uso de técnicas de captura de realidade com auxílio de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), também conhecidas como drones, e câmera 360° foram soluções que apoiaram a coordenação, comunicação e interação entre as partes interessadas na elaboração do planejamento, possibilitando uma análise mais assertiva das atividades concluídas, e gerando *insights* de produtividade.

O desenvolvimento de métodos visuais e automatizados de monitoramento do progresso que sejam completos e suficientemente detalhados são necessários especialmente para canteiros de obras grandes, onde a área de construção e a

quantidade de subcontratados são significativos, dificultando a realização do monitoramento tradicional (BRAUN *et al.*, 2020).

Segundo Kropp *et al.* (2018), os métodos visuais são particularmente válidos para ambientes internos, onde é mais difícil se obter uma visão geral das atividades em andamento devido à presença de barreiras físicas como paredes, divisórias, teto, dentre outros. Os ambientes internos de uma obra são dotados de elementos construtivos das mais diversas disciplinas, como arquitetura, elétrica, proteção contra incêndio, dentre outras, muitas vezes dependendo fortemente do desempenho de subcontratados para execução dos serviços no prazo que foi planejado (ROH; AZIZ; PEÑA-MORA, 2011). Além disso, de acordo com Hamledari *et al.* (2017), atividades realizadas em ambientes internos são fortemente interdependentes uma das outras, de modo que o atraso nessas atividades pode causar um grande impacto no cronograma geral da obra. Dessa forma, devido a sua importância e complexidade, os ambientes internos devem ser levados em consideração ao se desenvolver um método para monitoramento do progresso de obras (KOPSIDA; BRILAKIS, 2020).

Neste contexto, o crescimento sem precedentes do uso de tecnologias digitais como RPA, *laser scanners* e diferentes sensores para coleta de dados na construção civil possibilitou a ascensão de sistemas ciber-físicos que têm permitido a utilização desses dados integrados ao *Building Information Modeling* (BIM) para monitoramento do progresso de obras (LIN; GOLPARVAR-FARD, 2020a). Essas abordagens, que consistem na captura da realidade para comparação com o estado planejado e realização de análises através de tecnologias de visão computacional, ilustram a transformação do ambiente construído físico para o digital na estrutura da Construção 4.0 (LIN; GOLPARVAR-FARD, 2020b). Segundo Sepasgozar (2021), a necessidade de desenvolver e implementar sistemas ciber-físicos está aumentando, de modo que esta pode ser uma tecnologia central em muitos setores industriais no cenário pós-COVID-19.

Ressalta-se ainda que o Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das Construções (GETEC-UFBA), o qual a pesquisadora faz parte, tem desenvolvido diversos estudos com uso de tecnologias digitais para inspeção e monitoramento de obras. Dentre eles, o trabalho desenvolvido por Álvares (2019), *Monitoramento Visual do Progresso de Obras com Uso de Mapeamentos 3D de Canteiros por VANT e*

Modelos BIM 4D, foi um dos que motivaram a realização do presente estudo, de modo que serão utilizadas suas contribuições no desenvolvimento desta pesquisa.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Em geral, para a realização do monitoramento tradicional do progresso de obras, os projetos em 2D da construção são levados ao local de interesse para analisar e compreender como o produto é construído. Segundo Mahmood, Han e Lee (2020), nessa prática, busca-se comparar, perceptivamente, o mundo real e aquilo que foi planejado, sendo um processo físico e mental que pode se tornar complexo e demorado.

Segundo Duarte-Vidal *et al.* (2021), o monitoramento digitalizado da construção tem como objetivo conectar os métodos tradicionais ou existentes de monitoramento do progresso aos novos sistemas tecnológicos, permitindo aos gestores uma maior eficácia na realização desse processo. Duarte-Vidal *et al.* (2021) afirmam que a implementação de ferramentas digitais na construção permite a integração entre equipes, processos e organizações, reduzindo o problema da fragmentação presente nos métodos tradicionais. Através do monitoramento digital da construção é possível se alcançar uma maior colaboração entre os envolvidos no projeto e sua interação por meio de informações acessíveis que dão suporte à tomada de decisão, independentemente da distância geográfica entre as pessoas (DUARTE-VIDAL *et al.*, 2021).

Para o desenvolvimento de métodos digitais e visuais de monitoramento do progresso de obras pode-se utilizar uma representação do estado atual da construção, obtida por meio de métodos de captura da realidade, sendo os principais deles o escaneamento a laser e a fotogrametria (MAHAMI *et al.*, 2019). A fotogrametria é uma técnica que utiliza fotografias adquiridas em diferentes perspectivas por meio de câmeras fotográficas para geração da nuvem de pontos (BRAUN *et al.*, 2020). A nuvem de pontos, como explica Braun e Borrmann (2019), possui a informação tridimensional constituída por diversos pontos, cada um deles com suas propriedades de cores, representando assim o modelo *as-built* da construção (BRAUN *et al.*, 2020).

Embora o uso de *laser scanner* possibilite a criação de nuvens de pontos mais densas e precisas, a sua utilização requer o uso de componentes pesados e caros, conhecimento técnico aprofundado, além de levar mais tempo durante a coleta de

dados, quando comparado com técnicas de fotogrametria (ASADI *et al.*, 2019). Já as abordagens que se baseiam no uso de fotogrametria são mais flexíveis e de fácil aplicação, uma vez que câmeras são equipamentos comuns, de baixo custo e amplamente utilizadas em RPA (BRAUN *et al.*, 2020).

Atualmente, diversas empresas, como Pix4D, Agisoft e DroneDeploy desenvolvem soluções comerciais que permitem a geração de malhas 3D e nuvens de pontos tanto por meio de imagens aéreas coletadas por RPA quanto por meio de fotografias terrestres (BRAUN *et al.*, 2020). Han, Degol e Golparvar-Fard (2018) afirmam que o rápido avanço nas tecnologias de câmeras, sensores, baterias e propriedades aerodinâmicas tem contribuído para que as RPA se tornem cada vez mais acessíveis, seguras e fáceis de operar em canteiros de obras, possibilitando a documentação do trabalho em andamento através do registro de centenas de fotografias em diferentes ângulos e em um curto espaço de tempo.

Os dados do estado planejado são a linha de base do monitoramento do progresso da construção. A implementação de modelos BIM nas suas “n” dimensões, ou seja, enriquecidos com informações como cronograma, custo e segurança, dá origem ao modelo do estado planejado da construção, utilizado para a comparação com o estado atual nos sistemas ciber-físicos para monitoramento do progresso (LIN; GOLPARVAR-FARD, 2020b). Os modelos BIM podem ser utilizados como ferramentas de apoio à gestão visual por incentivarem a comunicação de ideias e o compartilhamento de informações entre as partes envolvidas na construção (OMAR; NEHDI, 2016).

Dessa forma, Duarte-Vidal *et al.* (2021) afirmam que as tecnologias mais utilizadas nas últimas décadas para o monitoramento de obras, tais como, BIM, RPA e fotogrametria, apresentam uma forte compatibilidade entre si. Tal fato permite uma redução na fragmentação das informações e automação de processos até um certo ponto, uma vez que o suporte humano ainda é necessário (DUARTE-VIDAL *et al.*, 2021).

Dentre os estudos desenvolvidos nos últimos anos visando o monitoramento visual do progresso de obras, pode-se citar o método proposto por Álvares (2019), que utiliza BIM 4D e fotogrametria auxiliada por RPA para o mapeamento 3D do canteiro. No trabalho de Álvares (2019), devido à impossibilidade de monitoramento

de atividades internas nas obras com uso de RPA, este processo foi realizado manualmente.

Braun *et al.* (2020) complementaram o processo tradicional de comparação da nuvem de pontos com o modelo BIM utilizando uma Rede Neural Convolutiva para detectar elementos estruturais que não puderem ser vistos devido a falhas ou oclusões na nuvem de pontos gerada através de imagens coletadas por RPA. Estes autores afirmam que apesar dessa abordagem melhorar os métodos de monitoramento do progresso já existentes, ainda assim nem todos os elementos podem ser detectados, destacando a necessidade de métodos complementares para aquisição de dados especialmente em áreas internas.

A fase de execução dos acabamentos internos cobre uma parte significativa do orçamento e tempo planejados das obras residenciais, de modo que atrasos nessas etapas geralmente têm uma grande influência no desempenho geral do projeto (KROPP *et al.*, 2012). Apesar disso, segundo o levantamento realizado por Ekanayake *et al.* (2021), desde 2005 até 2021, cerca de 280 artigos foram publicados sobre o monitoramento do progresso da construção com uso de tecnologias baseadas em visão computacional. Dessa amostra, Ekanayake *et al.* (2021) consideraram que apenas 21 artigos eram relevantes para o monitoramento do progresso interno, com o restante sendo focado na construção externa.

Segundo Ekanayake *et al.* (2021), os métodos de monitoramento de progresso que têm sucesso em ambientes externos não podem ser transferidos e aplicados em ambientes internos sem acomodar as necessidades específicas destes locais, principalmente com relação aos tipos de objetos e texturas presentes, condições de iluminação e movimentos de câmera. Além disso, ao contrário do local de construção externo, o ambiente interno apresenta desafios para a captura de dados de posicionamento, tornando impraticável ou diminuindo a performance de ferramentas baseadas em sinais de satélite, sistemas de posicionamento global (GPS) e banda ultra larga (UWB), por exemplo (EKANAYAKE *et al.*, 2021).

Holdener *et al.* (2017) afirmam que uma solução eficiente para mapear ambientes internos consiste no uso de fotografias em 360°. Segundo Kopsida e Brilakis (2020), métodos que utilizam dispositivos móveis para captura da realidade podem potencialmente aprimorar o processo de inspeção e reduzir o tempo necessário para essa atividade, permitindo que o inspetor adquira dados de progresso

simplesmente andando pelo local. Kopsida e Brilakis (2020) sugerem que o uso de tais dispositivos seja feito de forma a não se restringir o uso das mãos, reduzindo assim os riscos de segurança.

De acordo com Barazzetti *et al.* (2018), câmeras 360° capturam toda a cena ao redor de um fotógrafo em uma única fotografia e são um novo paradigma na fotogrametria devido ao seu custo-benefício. O grande campo de visão das fotografias 360° reduz o número de imagens necessárias para a reconstrução 3D de um ambiente, conseqüentemente, reduzindo o tempo de coleta de dados no local, quando comparado com câmeras tradicionais, que possuem um campo de visão relativamente mais limitado (SUBRAMANIAN; GHEISARI, 2019). Segundo Barazzetti *et al.* (2019), as fotografias 360° são especialmente úteis para levantamento de áreas longas e estreitas, como em ambientes internos, ou quando se deseja priorizar a coleta rápida de imagens em detrimento de uma alta precisão métrica.

Dada a necessidade de se mapear e monitorar ambientes internos de obras, nos últimos anos foram publicados alguns estudos nos quais são desenvolvidos métodos exclusivamente voltados para o monitoramento do progresso interno. Kropp, Koch e König (2018), por exemplo, fazem o registro de *frames* de vídeos gravados com um smartphone ao modelo BIM para identificação automática do status de atividades executadas internamente. Asadi *et al.* (2019) utilizam técnicas de localização e mapeamento simultâneos (SLAM) em ambientes internos para obter *frames* de vídeos visando a geração de nuvem de pontos e alinhamento dos *frames* ao modelo BIM. Já Kopsida e Brilakis (2020) desenvolvem um método que realiza a comparação automática entre o estado planejado com o executado em ambientes internos da obra utilizando um dispositivo móvel de realidade aumentada. Apesar de câmeras 360° poderem facilitar a captura de imagens graças ao campo de visão obtido em uma única captura, até a finalização desse texto não foram encontrados estudos na literatura que validem o uso dessa ferramenta para monitoramento do progresso em ambientes internos de obras.

Observa-se também que embora diversas pesquisas tenham sido desenvolvidas nos últimos anos com foco no monitoramento visual do progresso de obras, a maioria desses estudos têm como foco o monitoramento de áreas externas. Tal fato limita a aplicação desses métodos, principalmente em obras residenciais, nas quais uma quantidade significativa do trabalho é realizada internamente. Dentre as tecnologias

existentes para coleta de dados, o uso de fotografias obtidas por RPA é uma abordagem amplamente utilizada na literatura para monitoramento externo do progresso de obras. No entanto, verifica-se uma lacuna nesses estudos devido à falta de integração com dados visuais de progresso interno. Há uma necessidade, portanto, de se desenvolver métodos mais abrangentes, que façam uso de dados visuais internos e externos da construção para fornecer informações acerca do progresso da obra que auxiliem a tomada de decisão.

Por fim, a falta de terminalidade é considerada uma das causas para o aumento do trabalho em progresso nas obras, pois faz com que o tempo para a conclusão das atividades aumente e impeça a liberação da unidade para atividades posteriores (SOMMER; FORMOSO; VIANA, 2017). Apesar do impacto negativo causado pela falta de terminalidade no planejamento das obras, os estudos de monitoramento do progresso frequentemente não observam a influência que esse tipo de perda tem na não conclusão dos serviços conforme planejado. Verifica-se, portanto, a necessidade de se desenvolver métodos capazes de integrar o monitoramento do progresso à identificação da falta de terminalidade dos serviços, para que seja possível garantir que os serviços finalizados de fato possam ser aceitos como concluídos, não sendo necessário que a equipe executora retorne ao local para realização de reparos.

1.3 QUESTÕES DE PESQUISA

1.3.1 Questão Principal

Como utilizar BIM e dados visuais coletados por RPA e câmera 360° para o monitoramento do progresso de obras em ambientes internos e externos?

1.3.2 Questões Secundárias

- a) Como utilizar BIM e dados visuais obtidos através de câmera 360° para o monitoramento do progresso de atividades internas de obras?
- b) Como integrar dados do progresso e terminalidade de obras obtidos através de câmera 360° e de levantamentos fotogramétricos realizados com RPA?
- c) Quais os benefícios e barreiras no uso integrado de dados obtidos por câmeras 360 e levantamentos fotogramétricos para monitoramento do progresso?

1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.4.1 Objetivo principal:

Propor um método para o monitoramento visual do progresso de obras em ambientes internos e externos utilizando BIM, RPA e câmera 360°.

1.4.2 Objetivos secundários:

- a) Desenvolver um protocolo para realização do levantamento fotogramétrico em ambientes internos de obras utilizando câmera 360° para monitoramento do progresso;
- b) Estabelecer protocolo e recomendações para realização do monitoramento do progresso e terminalidade de obras com uso de BIM e dados visuais de RPA e câmera 360°;
- c) Identificar benefícios e barreiras de uso integrado de dados obtidos por câmeras 360° e levantamentos fotogramétricos por RPA para monitoramento do progresso.

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa será realizada utilizando-se modelos comerciais específicos de RPA e câmera 360° de modo que não serão testadas outras especificações para a RPA e seus componentes ou para a câmera 360°. Os voos serão realizados de modo a atender às regulamentações para operação de RPA no Brasil, respeitando as limitações impostas com relação à altura de voo, distanciamento de pessoas e obstáculos físicos, dentre outras, definidas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). O estudo será desenvolvido em obras residenciais do Programa Casa Verde e Amarela, que adotam o sistema construtivo de paredes de concreto, não sendo realizadas aplicações em obras com características diferentes destas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em cinco capítulos, de modo que o presente capítulo (Capítulo 1) consiste na Introdução, na qual são apresentados a justificativa do trabalho, o problema de pesquisa, as questões de pesquisa, os objetivos e a delimitação da pesquisa.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura que fundamenta a pesquisa, abordando conceitos e definições sobre o tema de monitoramento do progresso de

obras na era da Construção 4.0, com o uso de gêmeos digitais, BIM, tecnologias para captura da realidade através de imagens, dentre outros.

O Capítulo 3 refere-se ao método de pesquisa, com a descrição da estratégia de pesquisa utilizada, as etapas da pesquisa e as ferramentas utilizadas, tais como equipamentos, softwares, protocolos para coleta de dados etc. Também são apresentados os estudos empíricos desenvolvidos, além da estrutura analítica do trabalho (constructos, variáveis e fontes de evidência).

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa. O capítulo inicia com os resultados experimentais do estudo empírico na Obra A e apresentação da estrutura geral simplificada do método proposto. Em seguida são apresentados os resultados da implementação do método no estudo empírico na Obra B, incluindo resultados da avaliação baseada nos constructos definidos. A partir dos resultados obtidos, é apresentada a estrutura final do método proposto e recomendações para sua implementação em obras. Por fim, é realizada a discussão dos resultados.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, incluindo suas contribuições e impactos avaliados a partir dos resultados, além de apresentar possíveis desdobramentos e sugestões para trabalhos futuros.

2 MONITORAMENTO DO PROGRESSO DE OBRAS NO CONTEXTO DA CONSTRUÇÃO 4.0

Este capítulo tem como objetivo expor os conceitos, definições e abordagens mais pertinentes acerca do tema de monitoramento do progresso de obras na era da Construção 4.0. Para isso, primeiramente será apresentada uma abordagem geral sobre os conceitos de progresso e terminalidade de obras, seguido pela abordagem acerca do tema Construção 4.0 e uso de gêmeos digitais na indústria da construção civil. Em seguida, serão apresentadas as tecnologias para coleta de dados da obra através de imagens para monitoramento do progresso e os principais métodos para utilização de fotografias, nuvens de pontos e BIM para monitoramento do progresso.

2.1 PROGRESSO VERSUS TERMINALIDADE DE OBRAS

O objetivo de se monitorar o progresso das obras é garantir o alcance das metas propostas para execução dos serviços, alertando sobre eventuais obstáculos que possam impedir o cumprimento de tais metas (DUARTE-VIDAL *et al.*, 2021). Mattos (2010) afirma que o acompanhamento físico de uma obra consiste na identificação do andamento das atividades e a posterior atualização do cronograma. Dentre as possíveis razões elencadas por Mattos (2010) para ocorrerem desvios entre o que foi executado e o planejado estão: as atividades nem sempre são iniciadas ou concluídas na data prevista, podem ocorrer alterações de projeto que impactam na execução das tarefas, podem ocorrer flutuações de produtividade que alteram a duração das atividades, podem ocorrer alterações no plano de ataque da obra, dentre outras razões.

À medida que o trabalho avança, o cronograma tem de ser atualizado para refletir o desempenho real, permitindo que os gestores tenham dados para tomar decisões. Segundo Del Pico (2013), o processo de monitoramento tem como objetivo estabelecer uma comparação entre o progresso real e o previsto para o projeto. O monitoramento revela quais atividades encontram-se adiantadas, dentro do cronograma e, o mais importante, atrasadas (DEL PICO, 2013).

Ao planejamento inicial concluído e aprovado pela equipe executora da obra dá-se o nome de planejamento referencial ou linha de base. É com relação à linha de base que o andamento real do projeto será comparado (previsto versus realizado), servindo de parâmetro para a detecção de atrasos e adiantamentos (MATTOS, 2010).

De modo prático, Mattos (2010) explica as principais etapas para realização do acompanhamento do progresso da obra:

- **Aferição do progresso das atividades:** nesta etapa, o progresso das atividades é aferido no campo para posterior comparação com o que havia sido planejado para aquele período. Nesta fase, a equipe registra o avanço de cada tarefa em quantidade ou percentual. A esse trabalho de obtenção de dados de campo dá-se o nome de apropriação.
- **Atualização do planejamento:** nesta etapa, os dados de campo são comparados com o planejamento de linha de base. O cronograma é então recalculado de acordo com o que falta ser feito. Nesse sentido, a quantidade de tempo que a atividade ainda precisa para sua conclusão é denominada duração remanescente.
- **Interpretação do desempenho:** a atualização do planejamento deve ser acompanhada de uma avaliação crítica da tendência de atraso ou adiantamento da obra. Nesta etapa, o planejador e a equipe da obra analisam as causas de desvio do cronograma e inferem se as discrepâncias ocorreram por um motivo pontual ou se representam uma tendência.

Desvios de progresso, que podem ocorrer quando o andamento da obra fica aquém do seu planejamento, devem ser corrigidos com medidas imediatas e eficazes. Del Pico (2013) afirma que as ações necessárias são determinadas como resultado da análise de todos os dados no ciclo de feedback, discutindo as opções com os membros da equipe e considerando quaisquer consequências potenciais de tais ações. A detecção precoce de desvios de progresso permite que se tenha mais tempo e uma gama maior de opções para entender as causas e decidir as ações corretivas (DEL PICO, 2013).

Por outro lado, entende-se como terminalidade, a conclusão total de um serviço em um espaço pré-definido como apartamento ou pavimento, sem que haja resquícios deste serviço e que necessite da volta do executor para alguma pequena finalização (ULHÔA, 2012). Dessa forma, Ulhôa (2012) afirma que a falta de terminalidade em obras consiste em haver ainda restos a serem finalizados do serviço quando a equipe

de produção informa e faz medição do serviço, considerando-o finalizado, porém, na verdade, o serviço não está finalizado.

Esses pequenos pacotes de trabalho¹ geralmente são negligenciados nas reuniões de planejamento e contribuem para o fato de que grande parte das atividades dos canteiros de obras são executadas informalmente, ou seja, parte do trabalho realizado pelas equipes não está formalmente incluído nos planos operacionais (FORMOSO; BØLVIKEN; VIANA, 2020).

Sommer, Formoso e Viana (2017) afirmam que a falta de terminalidade contribui para o aumento de trabalho em progresso, pois o tempo para a conclusão da atividade aumenta, assim como o tempo de liberação da unidade para atividades posteriores. Entre os fatores que influenciam a falta de terminalidade das tarefas, destaca-se o grau de definição dos pacotes de trabalho e o adequado sequenciamento dos processos (SOMMER; FORMOSO; VIANA, 2017).

A ausência de terminalidade implica na maioria dos casos em atraso nos serviços subsequentes gerando inúmeros transtornos na gestão da obra. Um serviço não terminado demandará mais mão de obra, custos e tempo, fazendo-se necessário um controle mais preciso da evolução dos serviços, a fim de apontar os possíveis erros no processo e repará-los de forma rápida (LIMA *et al.*, 2021).

Dificuldades na execução do controle da qualidade podem também ser uma possível causa do aumento do trabalho em progresso. Por exemplo, se uma equipe não concluir adequadamente a sua tarefa, as falhas de qualidade são detectadas tardiamente, após o deslocamento da equipe para outra frente de trabalho, deixando o local em espera para ser corrigido (SOMMER; FORMOSO; VIANA, 2017).

A falta de terminalidade pode ser medida por meio da identificação dos lotes que não estão prontos, impedindo o serviço subsequente de ser iniciado. Pode ser associado também ao controle de qualidade e identificado mediante os serviços que apresentam não conformidades, ou apenas identificado por meio de lotes que foram iniciados, porém, estão sem equipe alguma realizando o trabalho (SOMMER; FORMOSO; VIANA, 2017).

¹ Choo *et al.* (1999) definem pacote de trabalho como um conjunto de tarefas a serem realizadas em uma área bem definida, utilizando informações de projeto específicas, bem como material, mão de obra e equipamentos, e tendo seus pré-requisitos completados em tempo hábil para sua execução.

Alves (2000) faz ainda um paralelo entre os conceitos de continuidade e terminalidade. Segundo Alves (2000), a continuidade refere-se à realização de processos e operações sem paralisações, de forma que ocorra um fluxo contínuo de atividades sendo realizadas ao longo do tempo. Já a terminalidade consiste na finalização dos processos e operações sem a necessidade de retrabalhos ou arremates que exigem visitas posteriores por parte de uma equipe ao mesmo posto de trabalho, prolongando o tempo de realização de uma tarefa. Portanto, a terminalidade está relacionada a conclusão das tarefas e ao fazer certo pela primeira vez, sendo de grande importância para a continuidade dos processos e operações (ALVES, 2000). Segundo Alves (2000), uma forma de contribuir para a manutenção da terminalidade e da continuidade consiste na elaboração de pacotes de trabalho com um elevado grau de definição do que deve ser executado, do nível de aceitação exigido e do prazo de realização do mesmo.

2.2 CONSTRUÇÃO 4.0

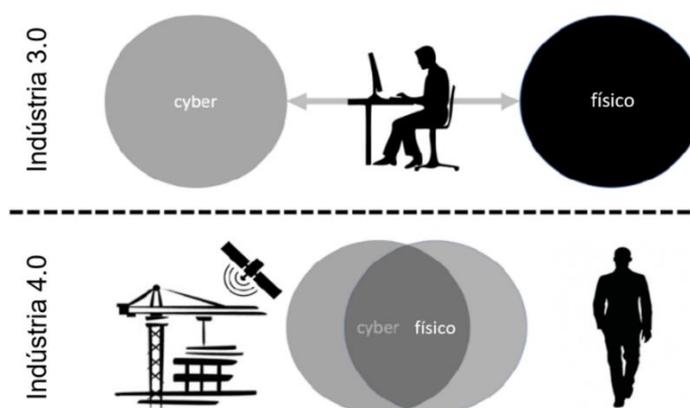
No início da década de 2010, a partir da competição trazida pela acelerada industrialização da Ásia, a indústria alemã deu início à sua reforma, dando luz ao conceito de “Indústria 4.0” (KLINC; TURK, 2019). Tecnicamente, a Indústria 4.0 tem como seus alicerces os sistemas ciber-físicos, constituídos por uma parte física, podendo ser um dispositivo, uma máquina ou um edifício, e uma parte digital ou cibernética, como por exemplo, os dados, o sistema de software e a rede de comunicação (PISHDAD-BOZORGI; GAO; SHELDEN, 2020).

O espaço físico é definido por Rolle, Martucci e Godoy (2020) como um ambiente complexo, dinâmico e diversificado, no qual interagem pessoas, máquinas e materiais, cada qual com suas diferentes características de desempenho e comportamento, que podem variar ao longo do tempo. O espaço virtual, por sua vez, é onde se realizam as operações de replicação do funcionamento do espaço físico (ROLLE; MARTUCCI; GODOY, 2020).

De acordo com Um (2019), na quarta revolução industrial, a economia global enfrentará mudanças sem precedentes com o advento de tecnologias disruptivas, como a inteligência artificial, internet das coisas, *big data*, robótica avançada, realidade virtual/ aumentada e impressão 3D. Espera-se que essas tecnologias tragam mudanças fundamentais na produção, distribuição e consumo, transformando os atuais modos de comércio e investimento entre os países (UM, 2019).

A diferença essencial da Indústria 4.0 para a automação da Indústria 3.0, como mostra a Figura 1, é que nesta há um mediador humano entre o mundo real e o digital que insere os dados no computador, faz a leitura das informações geradas e guia os eventos no mundo material (KLINC; TURK, 2019). Na Indústria 4.0, a parte física e a parte digital dos sistemas ciber-físicos são reciprocamente conectadas e sincronizadas em tempo real por meio de sensores e atuadores (PISHDAD-BOZORGI; GAO; SHELDEN, 2020). Segundo Um (2019), na Terceira Revolução Industrial, máquinas e robôs executavam instruções à medida em que estas eram inseridas, sem a capacidade cognitiva. Na Quarta Revolução Industrial, tais máquinas recebem a capacidade de se comunicar, inclusive umas com as outras (UM, 2019).

Figura 1 – Diferença entre a terceira e quarta revolução industrial



Fonte: traduzido de Klinc e Turk (2019)

Um (2019) elenca algumas razões pelas quais as transformações atuais representam não apenas um prolongamento da Terceira Revolução Industrial, mas sim a chegada de uma quarta revolução. A primeira delas reside na velocidade das descobertas atuais, que evoluem em um ritmo exponencial, sem precedente histórico. Além disso, Um (2019) afirma que esta revolução está sendo disruptiva em quase todos os setores em todos os países. Exemplo disso é a implementação de Inteligência Artificial, que tem avançado para novas áreas e impulsionado a melhoria geral da eficiência de diversas indústrias (UM, 2019). Para Begic e Galic (2021), em comparação com as revoluções tecnológicas anteriores, a Quarta Revolução pode ser a primeira simultaneamente ativa na maior parte do mundo, devido às tendências da globalização.

Do ponto de vista do usuário, os produtos da Indústria 4.0 têm algumas características que os diferenciam dos produtos desenvolvidos anteriormente.

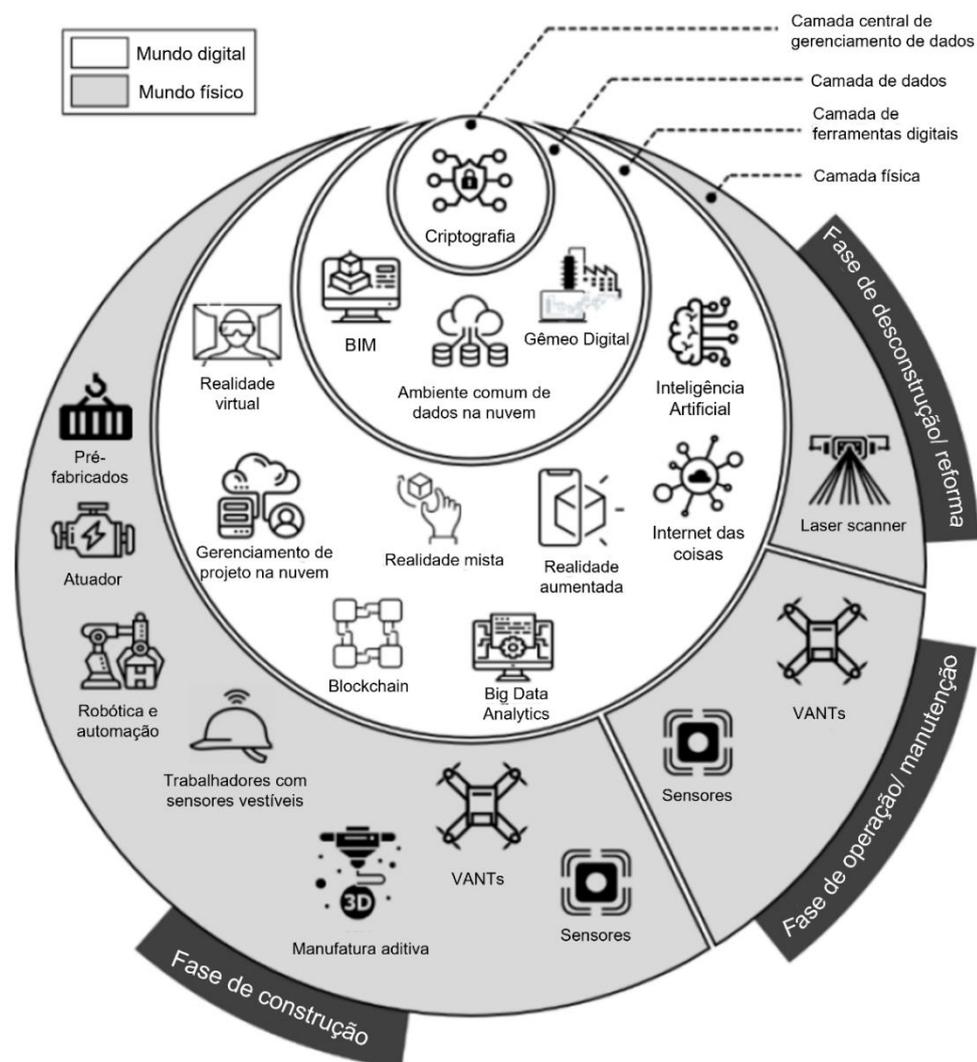
Segundo Klinc e Turk (2019), esses produtos são caracterizados por serem feitos sob medida e por serem “inteligentes”. Isso significa que os edifícios, por exemplo, serão capazes de “decidir” o melhor momento de aquecer, abrir ou fechar janelas ou, dependendo do número atual de pessoas no prédio, quantos elevadores serão enviados para os andares superiores (KLINC; TURK, 2019). Klinc e Turk (2019) citam ainda que os produtos da Indústria 4.0 estão interconectados, ou seja, podem se comunicar: o carro se comunica com a estrada, que se comunica com os semáforos, que se comunicam com outros carros e produtos inteligentes.

Com a tendência de digitalização trazida pela Indústria 4.0, a indústria da construção civil tem buscado formas de acompanhar a transformação em busca de ganhos operacionais e de produtividade (KAN; ANUMBA, 2019). Denominada de Construção 4.0, a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 é vista como uma força que dará início a uma evolução do setor de construção, revolucionando suas práticas e técnicas (TURNER *et al.*, 2021). A estrutura da Construção 4.0 inclui uso de BIM de projeto até operações, produção industrial de peças e módulos pré-fabricados, uso de sistemas ciber-físicos, monitoramento digital da cadeia de suprimentos e análise de dados através de *big data*, inteligência artificial, computação em nuvem, *blockchain* etc. (SACKS *et al.*, 2020).

Karmakar e Delhi (2021) conceituam o paradigma da Construção 4.0 como um modelo de quatro camadas, sendo uma física, na qual os ativos são construídos, e três digitais, como mostra a Figura 2. Conforme o projeto avança da conceituação para a execução, quantidades crescentes de informações são produzidas, dando origem à camada de dados do projeto. A camada de dados e a camada física são mediadas pela camada de tecnologias digitais. Além disso, cada vez mais o setor da construção reconhece a importância de uma camada central de segurança cibernética, que se estende por todo o ciclo de vida do projeto com relação à segurança, privacidade e propriedade dos dados (KARMAKAR; DELHI, 2021).

Os papéis e funções das pessoas também são significativamente alterados com o advento deste novo paradigma. Segundo Karmakar e Delhi (2021), as pessoas e tecnologias interagem e facilitam o fluxo e a troca de informações entre as camadas por meio de processos definidos. Dessa forma, o advento da Construção 4.0 tem criado novas funções para as pessoas e novos processos nas diferentes fases do ciclo de vida do projeto (KARMAKAR; DELHI, 2021).

Figura 2 – Modelo em camadas da Construção 4.0 e seus principais componentes



Fonte: traduzido de Karmakar e Delhi (2021)

O canteiro de obras da Construção 4.0 faz uso de robótica e automação para produção, transporte e montagem, bem como de atuadores para converter sinais digitais em ações físicas, além de sensores e IoT para detectar dados sobre objetos e pessoas da camada física (SAWHNEY; RILEY; IRIZARRY, 2020). Em sistemas ciber-físicos da construção civil, a ponte entre o espaço físico e o espaço virtual é feita através da detecção dos elementos dos processos e atividades através de sensores e tecnologias de aquisição de dados (AKANMU; ANUMBA, 2020). Os dados sobre as dinâmicas do processo de construção são então processados e vinculados a elementos cibernéticos, podendo transmitir as informações necessárias para a

tomada de decisão rápida para controlar fisicamente as atividades e recursos da construção (AKANMU; ANUMBA, 2020).

2.3 USO DE GÊMEOS DIGITAIS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

O *Centre for Digital Built Britain* define os gêmeos digitais (tradução para a nomenclatura inglesa “*Digital Twins*”) como uma representação digital realista de ativos, processos ou sistemas no ambiente construído (BOLTON *et al.*, 2018). Os gêmeos digitais começaram se popularizar em 2012, quando a NASA e a Força Aérea dos Estados Unidos começaram a usar o conceito a partir da necessidade de se monitorar peças de maquinário de alto valor e essenciais para a segurança das operações, como motores de aeronaves durante o voo (ALIZADEHSALEHI; YITMEN, 2021; TAO *et al.*, 2019).

Tanto os sistemas ciber-físicos quanto os gêmeos digitais envolvem uma interação entre os sistemas cibernéticos e físicos. No entanto, segundo Akanmu, Anumba e Ogunseiju (2021), enquanto o gêmeo digital representa uma réplica digital da instalação como planejada e como construída, os sistemas *cyber*-físicos envolvem a integração de sistemas físicos com sua réplica digital por meio de sensores e atuadores.

Akanmu, Anumba e Ogunseiju (2021) também identificam diferenças com relação à natureza da ponte ciber-física em cada conceito. Segundo estes autores, no gêmeo digital o controle sob o sistema físico é do tipo passivo, ou seja, é alcançado por meio de modelos para prever estados e riscos futuros, de modo que as decisões gerenciais possam ser tomadas em tempo hábil. Já no sistema ciber-físico, o controle pode ser tanto do tipo passivo como também ativo, sendo o controle ativo obtido quando dispositivos físicos na forma de atuadores são usados para controlar o estado do sistema físico (AKANMU; ANUMBA; OGUNSEIJU, 2021).

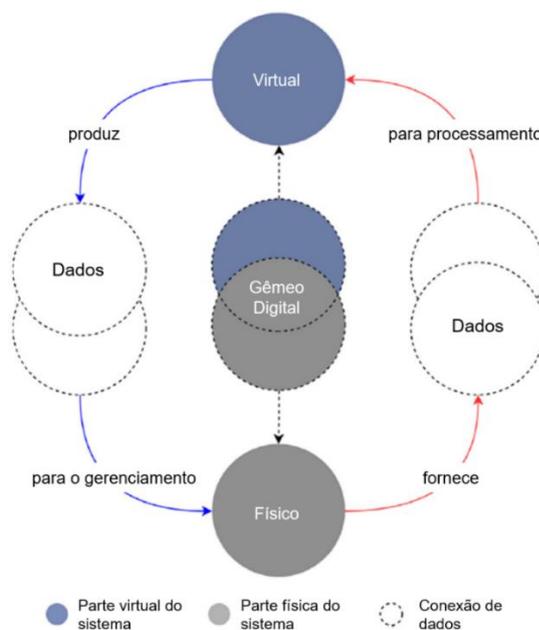
Para Kan e Anumba (2019), os gêmeos digitais surgem como uma nova geração de sistemas ciber-físicos com a função de integrar seus componentes do espaço físico e virtual e realizar a interligação entre ambos. Esse processo de geminação, ou seja, o estabelecimento da conexão entre o espaço físico e virtual é alcançado por meio de dados coletados por sensores (KAN; ANUMBA, 2019). O maior potencial dos sistemas ciber-físicos é o horizonte que ele abre para análises de dados que permitem medir o desempenho do gêmeo físico com relação às metas planejadas que, por sua vez,

foram inicialmente simuladas no gêmeo digital, criando assim um ciclo contínuo de avaliação da eficácia do projeto (PISHDAD-BOZORGI; GAO; SHELDEN, 2020).

Segundo Tao *et al.* (2018), um gêmeo digital completo deve incluir um modelo físico, um modelo virtual e conexões entre os modelos físico e virtual, enfatizando a interação, comunicação e colaboração entre o espaço físico e o espaço cibernético. Tao *et al.* (2018) afirmam ainda que o gêmeo digital se comporta como um espelho do produto físico, podendo refletir todo o seu ciclo de vida, bem como simular, monitorar, diagnosticar, prever e controlar o estado e o comportamento das entidades físicas correspondentes.

Graças à abordagem dos sistemas ciber-físicos, é possível alcançar uma coordenação bidirecional entre o sistema físico e o modelo virtual, facilitando o gerenciamento do sistema físico através do monitoramento mais preciso do seu desempenho (BONCI *et al.*, 2019). Segundo Boje *et al.* (2020), os dados são os propulsores de um ciclo que ocorre entre a dualidade “virtual-físico” do sistema. Dados da parte física do sistema são coletados e enviados para processamento, enquanto a parte virtual aplica seus modelos de engenharia e inteligência artificial para fornecer informações que são utilizadas para o gerenciamento diário da parte física, como ilustra a Figura 3 (BOJE *et al.*, 2020).

Figura 3 – O paradigma do gêmeo digital

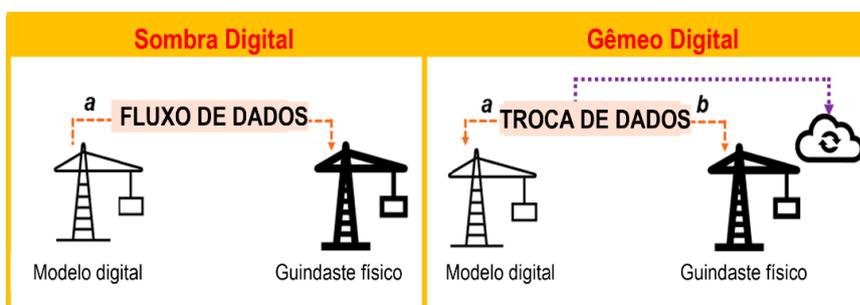


Fonte: traduzido de Boje *et al.* (2020)

Segundo Camposano, Smolander e Ruippo (2021), em seu nível mais básico, os gêmeos digitais oferecem uma descrição do ativo, com conectividade assíncrona ou baixa conectividade com o ambiente real. Tais representações visuais podem então ser aprimoradas com dados em tempo real para diagnosticar o estado do ativo e, posteriormente, com a integração de modelos estatísticos, probabilísticos ou de Inteligência Artificial podem incorporar capacidades de previsão e prescrição. Camposano, Smolander e Ruippo (2021) afirmam que, em seu estado mais avançado, o gêmeo digital poderia substituir a intervenção humana e determinar autonomamente uma ação em nome do ativo físico.

Segundo Sepasgozar (2021), se o modelo virtual apenas representa a parte física do sistema e o fluxo de dados entre as partes é unidirecional, ele é considerado uma sombra digital. Sepasgozar (2021) afirma que em um gêmeo digital tanto a parte virtual quanto a física devem se comunicar entre si, como mostra a Figura 4. Além disso, o gêmeo digital deve ser capaz de codificar os dados e refletir aspectos do passado, da atualidade e do futuro da entidade física (SEPASGOZAR, 2021).

Figura 4 – Visualização esquemática do fluxo de dados unidirecional e bidirecional para distinguir sombra digital de gêmeo digital



Fonte: adaptado de Sepasgozar (2021)

Alizadehsalehi e Yitmen (2021) utilizam ainda o conceito de mestre digital, que é criado paralelamente ao desenvolvimento do produto e inclui os seus protótipos virtuais, modelos de simulação e variáveis relacionadas às configurações do produto. Alizadehsalehi e Yitmen (2021) consideram que a sombra digital surge a partir do momento em que o produto começa a ser fabricado, e dados relativos à sua produção, manutenção ou dados de uso podem ser visualizados. De acordo com estes autores, o gêmeo digital é o resultado da combinação das informações do mestre digital e da sombra digital.

Sacks *et al.* (2020) afirmam que os gêmeos digitais representam uma nova forma de gerenciamento da construção, na qual dados do ambiente físico são coletados por uma variedade de tecnologias de monitoramento para obter informações do status da construção, otimizando a análise do projeto, planejamento e da produção. Alizadehsalehi e Yitmen (2021) afirmam que os gêmeos digitais auxiliam a indústria a simular, compreender, prever e otimizar todos os aspectos de um ativo físico. Sem a utilização de gêmeos digitais, a maior parte da otimização é reativa, com base em alertas que ocorrem posteriormente ao fato (ALIZADEHSALEHI; YITMEN, 2021).

2.3.1 O papel do BIM no desenvolvimento de gêmeos digitais

Sacks *et al.* (2018) definem Modelagem da Informação da Construção, ou *Building Information Modeling* (BIM), como uma tecnologia de modelagem e um conjunto de processos associados para produzir, comunicar e analisar modelos de construção. Através do BIM, um ou mais modelos virtuais de um edifício são construídos digitalmente, dando suporte e permitindo uma melhor análise e controle de todas as fases do projeto em comparação com os processos manuais (SACKS *et al.*, 2018).

Segundo Borrman *et al.* (2018), um modelo BIM é uma representação digital de uma construção com uma grande variedade de informações armazenadas. Além de incluir a geometria tridimensional dos componentes do edifício, também pode conter elementos não físicos, como espaços, zonas e cronogramas (BORRMANN *et al.*, 2018). Os elementos são normalmente associados a um conjunto bem definido de informações semânticas, como o tipo de componente, materiais, propriedades técnicas, custo, bem como as relações entre os componentes e outras entidades físicas ou lógicas (HE *et al.*, 2021).

De acordo com Crowther e Ajayi (2019), para assegurar a qualidade do projeto e do planejamento é fundamental que os modelos sejam tão confiáveis quanto possível, contando com informações das durações e sequenciamento lógico das atividades. Esses elementos são o que o BIM 4D pretende implementar melhor, envolvendo uma representação ainda mais visual e dinâmica do planejamento do que um gráfico de Gantt tradicionalmente utilizado (CROWTHER; AJAYI, 2019).

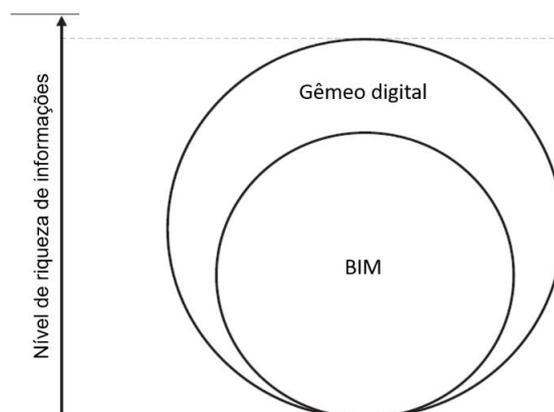
Alaloul *et al.* (2021) afirmam que no processo de monitoramento do progresso de obras, o BIM desempenha um importante papel fornecendo uma plataforma

integrada para avaliar modelos executados e planejados da construção por meio da comparação ou sobreposição entre eles. Através do modelo BIM 4D, o estado planejado da construção pode ser comparado com o seu estado real em qualquer ponto no tempo, possibilitando a detecção de desvios através da identificação de elementos adicionais ou ausentes no modelo (BRAUN *et al.*, 2018).

Nos últimos anos as práticas de modelagem digital, o uso de ferramentas de aquisição de dados, o desenvolvimento de interfaces homem-computador e o próprio BIM têm fornecido dados para a construção, monitoramento ou controle de objetos físicos (SEPASGOZAR, 2021). No entanto, um gêmeo digital oferece mais do que uma representação digital. Segundo Sepasgozar (2021), características como troca bidirecional de dados e autogerenciamento em tempo real diferenciam um gêmeo digital de outros sistemas de modelagem de informação.

Como um importante componente para a abordagem de sistemas ciber-físicos, o BIM atua como um modelo de referência 3D semanticamente rico, ajudando a compor o gêmeo digital para uso em diversas aplicações (BOJE *et al.*, 2020). No entanto, para Lu *et al.* (2020), da perspectiva de riqueza de informações e capacidade analítica, o conceito de gêmeo digital é mais amplo do que BIM, como mostra a Figura 5. Nesse sentido, o gêmeo digital não é apenas um modelo do objeto físico, mas também transmite dados e monitora o sistema físico em tempo real (LU *et al.*, 2020).

Figura 5 – Diferença entre BIM e gêmeos digitais de acordo com o nível de riqueza das informações que ambos são capazes de prover



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

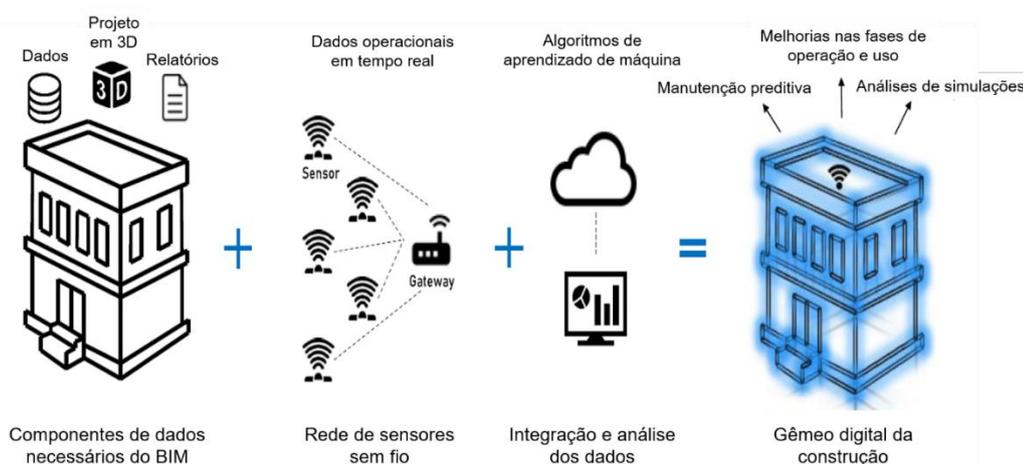
Além disso, segundo Sacks *et al.* (2020), modelos BIM sozinhos não proporcionam os ciclos curtos de feedback necessários para o monitoramento e controle da produção. Modelos federados da construção que contém as mais diversas

disciplinas de projeto, por exemplo, não são gêmeos digitais, pois refletem aquilo que foi projetado e planejado, mas não o que foi efetivamente executado, e não são atualizados conforme o estado físico muda (SACKS *et al.*, 2020). Da mesma forma, modelos BIM de *as-built* também não são considerados gêmeos digitais, pois são desenvolvidos de forma reativa ao final da obra para representar o estado final da construção, sem considerar o processo de construção, e com o objetivo apenas de auxiliar os proprietários na fase de manutenção (SACKS *et al.*, 2020).

O paradigma dos gêmeos digitais visa aprimorar os processos da construção civil dentro do contexto de uma sincronidade ciber-física, onde os modelos digitais são um reflexo dos ativos físicos da construção em um determinado momento (BOJE *et al.*, 2020). Nesse sentido, autores como Pan e Zhang (2021) e Bonci *et al.* (2019) consideram que o BIM pode ser o ponto de partida para o desenvolvimento de um gêmeo digital. Segundo Pan e Zhang (2021), o BIM fornece uma plataforma não apenas para coletar informações sobre o projeto, mas também para compartilhar, e analisar dados em tempo real, favorecendo a comunicação e colaboração entre vários participantes.

Tagliabue *et al.* (2021) afirmam que tornar um modelo BIM um gêmeo digital é uma questão de ser capaz de coletar, analisar e representar dados. Como mostra a Figura 6, o gêmeo digital pode utilizar o modelo BIM da construção aliado a diversas redes de sensores para criar uma visão em tempo real do ativo, permitindo análises de dados em tempo real e a tomada de decisão baseada em informações (KHAJAVI *et al.*, 2019). Dessa forma, através do BIM, tanto os modelos do estado construído quanto os projetados podem ser acessíveis no gêmeo digital, no qual as informações dessas duas partes podem ser continuamente trocadas e sincronizadas (PAN; ZHANG, 2021).

Figura 6 – Componentes para criação de um gêmeo digital através de BIM



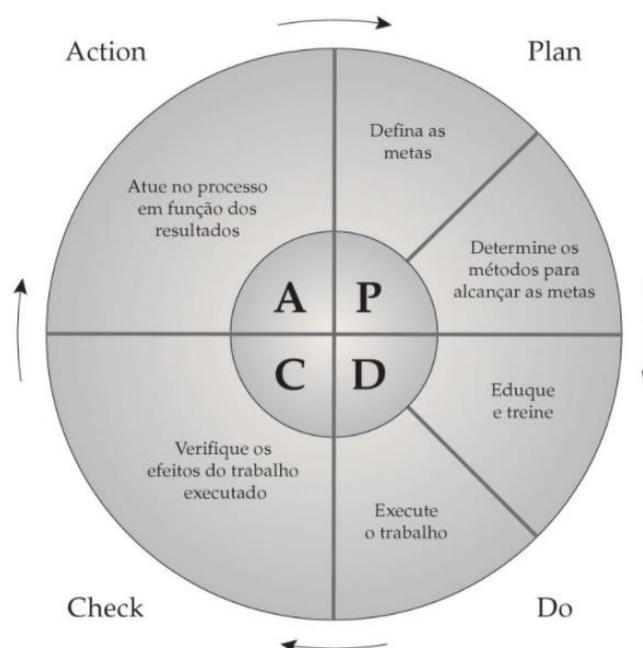
Fonte: traduzido de Khajavi *et al.* (2019)

2.3.2 Uso de gêmeos digitais no planejamento e controle da produção

O gerenciamento da construção através de gêmeos digitais passa por ciclos de *feedback* em diferentes escalas de tempo e frequência, indo do monitoramento da aderência das atividades aos principais marcos do planejamento, a ciclos quase em tempo real de monitoramento de entregas de materiais, localização de trabalhadores e equipamentos, e assim por diante (SACKS *et al.*, 2020).

Segundo Sacks *et al.* (2020), o conceito de gêmeo digital da construção parte do princípio de que o fluxo de informações em tempo real da construção permite o desenvolvimento de um modelo de circuito fechado para controle da produção cujas bases estão no Ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Action*) de melhoria contínua de processos e produtos proposto por Deming (1982). O Ciclo PDCA, conforme mostra a Figura 7, é utilizado pelas organizações para gerenciar os seus processos internos de forma a garantir o alcance de metas estabelecidas, tomando as informações como fator de direcionamento das decisões (MARIANI, 2005).

Figura 7 – Ciclo PDCA



Fonte: Werkema (2014)

As fases que compõem o Ciclo PDCA e suas respectivas correspondências com o fluxo de trabalho utilizando gêmeos digitais, segundo Mariani (2005) e Sacks *et al.* (2020), são as seguintes:

- **Planejar (Plan)** – essa etapa envolve a definição de metas do processo analisado, estabelecendo os métodos para a sua execução. Em um fluxo de trabalho com gêmeos digitais, essa fase corresponde à etapa de modelagem digital da construção e do seu planejamento com a utilização de ferramentas e processos BIM;
- **Fazer (Do)** – no Ciclo PDCA essa etapa compreende a execução daquilo que foi planejado, sendo necessário para tanto educar e treinar as pessoas envolvidas. Paralelamente a isso, as informações geradas no processo são registradas. No contexto da construção civil e do fluxo de trabalho com gêmeos digitais, esta corresponde à etapa de fabricação e construção;
- **Verificar (Check)** – essa etapa tem por objetivo comparar a execução (a partir dos dados registrados) com o planejamento, verificando se os resultados propostos inicialmente foram ou não alcançados. Nessa fase

ocorre a interpretação dos dados coletados para gerar informações que descrevam o status e informem o desempenho dos produtos e processos;

- **Agir (Action)** – nessa fase, a partir dos resultados alcançados, tem-se dois caminhos distintos a seguir: se a verificação mostrou que não foi possível atingir os resultados propostos, deve-se partir para o estudo de ações corretivas e a seguir retomar o método PDCA; porém, se os resultados propostos foram atingidos, deve-se então padronizar o processo, assegurando assim sua continuidade. Com o uso de gêmeos digitais, o planejamento e a execução da obra são avaliados e ações são tomadas para a implementação de melhorias nos modelos digitais.

Segundo Sacks *et al.* (2020), o próprio sistema *Last Planner (Last Planner System – LPS)* incorpora Ciclos PDCA através dos níveis de planejamento de longo prazo, planejamento de fase, de médio prazo, e planejamento de curto prazo. O sistema *Last Planner* de controle da produção foi primeiramente introduzido por Ballard (1993), estabelecendo diversas mudanças no modo como os projetos da construção civil eram planejados e controlados. Segundo Ballard (2020), o LPS foi criado como uma alternativa à abordagem do Método do Caminho Crítico (©) e pode ser compreendido como uma resposta ao apelo de Laufer e Howell (1993) para um novo paradigma de planejamento de obras.

O sistema *Last Planner* é uma filosofia, com regras, procedimentos e ferramentas que facilitam a implementação de procedimentos para controle do fluxo de trabalho da produção, diminuindo as incertezas e criando mecanismos para transformar o que “se deve fazer” em o que “será feito” (BALLARD, 2000). Segundo Vaidyanathan, Varghese e Devkar (2020), na metodologia do LPS todas as partes interessadas realizam uma análise de restrições antecipada que essencialmente lhes permite coordenar as atividades de forma mais integrada e proativa, eliminando as restrições no estágio de planejamento e não no momento da execução. Na metodologia do LPS, o indicador Porcentagem de Planos Concluídos (PPC) é utilizado como uma métrica para entender a confiabilidade do planejamento, e os motivos para não cumprimento dos pacotes de trabalho são documentados, possibilitando não somente a medição da performance, como também a sua melhoria constante durante o ciclo de vida do projeto (VAIDYANATHAN; VARGHESE; DEVKAR, 2020).

De acordo com Ballard e Tommelein (2016), o LPS é dividido em planejamentos em níveis hierárquicos, como mostra a Figura 8. De modo geral, os quatro níveis hierárquicos de planejamento e controle, como explicam Ballard (2000), Bernardes (2003) e Ballard e Tommelein (2016), são os seguintes:

- **Planejamento de longo prazo ou planejamento mestre:** estabelece a estrutura do trabalho com os marcos chave do projeto e suas durações, sendo o nível hierárquico com menos detalhes;
- **Planejamento de fase:** nesse nível de planejamento, a partir das metas do planejamento de longo prazo, as atividades de uma fase são especificadas e têm suas restrições levantadas para que sejam removidas futuramente;
- **Planejamento de médio prazo:** busca remover as restrições das atividades para atingir os objetivos traçados nos níveis anteriores, ocorrendo em ciclos de dois a três meses;
- **Planejamento de curto prazo, ou operacional:** orienta diretamente a execução da obra através da designação de pacotes de trabalho bem definidos às equipes de produção, ocorrendo em ciclos semanais. Atrelado ao planejamento de curto prazo, a aprendizagem visa aprender com as falhas de planejamento, evitando a sua recorrência.

Figura 8 – Níveis hierárquicos do planejamento de acordo com o Sistema *Last Planner*



Fonte: adaptado de Ballard e Tommelein (2016)

Sacks *et al.* (2020) afirmam que um dos principais desafios para a implementação eficaz do LPS está na necessidade de se obter informações precisas sobre o grau de remoção das restrições para todas as atividades. Segundo Boje *et al.* (2020), métodos de construção enxuta como o LPS geralmente necessitam de coleta de informações de todas as partes envolvidas para elaboração do planejamento. No entanto, persiste uma falta de integração entre as informações nos níveis de planejamento (BOJE *et al.*, 2020). É nesse ponto que o monitoramento da obra utilizando gêmeos digitais pode ser particularmente benéfico (SACKS *et al.*, 2020). Através da utilização de gêmeos digitais é possível conectar os vários níveis hierárquicos de planejamento, bem como integrar os conjuntos de dados heterogêneos (BOJE *et al.*, 2020).

Dessa forma, Sacks *et al.* (2020) defendem que a diferença mais significativa entre o modelo de controle da produção utilizando gêmeo digital e o modelo tradicional está na fase de “Verificar”, do ciclo PDCA. Uma vez que é possível extrair informações precisas e abrangentes da grande quantidade de dados coletados através de uma variedade de tecnologias de forma automática e em tempos de ciclos curtos, tais informações podem ser utilizadas, juntamente com as informações contidas no modelo BIM do projeto para avaliar soluções e planos alternativos de produção (SACKS *et al.*, 2020). O Quadro 1 apresenta diferentes ciclos de monitoramento e controle com uso de gêmeos digitais na construção, indo dos ciclos mais curtos de monitoramento em tempo real até o mais longo, cuja duração é a do projeto.

Quadro 1 – Diferentes ciclos de monitoramento e controle com uso de gêmeos digitais

Objeto do monitoramento	Escala de tempo	Descrição
Produtos físicos e processos	Monitoramento e feedback em tempo real	Nos ciclos com escalas de tempo mais curtos, o sensoriamento remoto pode dar suporte às equipes ao monitorar, por exemplo, a localização de um componente pré-fabricado em comparação com a sua localização planejada no modelo BIM, ou ao monitorar em tempo real a localização dos trabalhadores para prevenção de acidentes.
Recursos da construção	Monitoramento em tempo real e feedback diário	O monitoramento contínuo dos recursos de construção permite identificar o status das restrições que governam as tarefas antes que estas sejam liberadas para produção, evitando situações em que as equipes aguardam ter condições para executar o trabalho.

Objeto do monitoramento	Escala de tempo	Descrição
Performance do produto e dos processos	Monitoramento diário; feedback diário a semanal	A detecção precoce de desvios entre a produção planejada e a produção realizada pode reduzir o tempo de reação, de modo que os problemas possam ser identificados e tratados antes que causem danos maiores.
Planejamento periódico	Análise e feedback semanais a mensais	Em intervalos de planejamento periódicos, os possíveis resultados de mudanças no planejamento da construção podem ser avaliados através de simulações usando a situação atual como ponto de partida.
Planejamentos de longo prazo	Duração do projeto	Nos ciclos mais longos, as informações acumuladas nos gêmeos digitais de projetos concluídos são um recurso inestimável para a melhoria contínua, permitindo não só a melhora das tecnologias utilizadas no monitoramento, como também dos métodos gerenciais empregados.

Fonte: traduzido de Sacks *et al.* (2020)

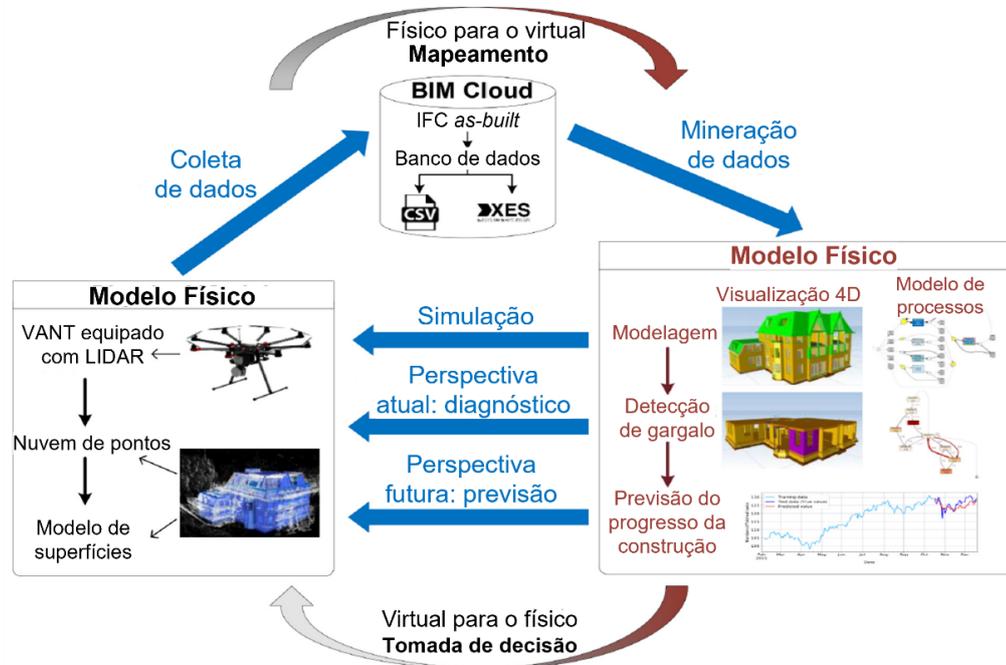
Os benefícios da gestão da construção centrada em dados surgem da consciência situacional significativamente melhor que ela pode fornecer aos gerentes e trabalhadores da construção, tornando a gestão da construção um processo mais proativo do que reativo (SACKS *et al.*, 2020). Pode-se dizer, portanto, que os gêmeos digitais são capazes de prover recursos de prognóstico, viabilizando não somente a análise das condições atuais, como também a avaliação de resultados esperados de ações gerenciais, apoiando o planejamento e controle da obra de forma proativa (SACKS *et al.*, 2020).

Pan e Zhang (2021b) desenvolveram um modelo orientado a dados com uso de gêmeo digital para obter um circuito fechado de troca de dados entre o mundo físico e digital (Figura 9). Foi utilizado uma RPA equipado com LiDAR e dispositivo IoT para monitoramento em tempo real do ambiente físico através de nuvens de pontos, posteriormente enviadas para um sistema de armazenamento em nuvem e comparadas ao modelo planejado. Para isso foi feito uso de uma ferramenta chamada RAAMAC², capaz de identificar desvios de progresso entre o que foi planejado e executado. Técnicas de mineração de dados foram utilizadas para integrar os dados

² Trata-se de uma ferramenta para comunicação e identificação de desvios entre o estado planejado e executado da obra

e realizar a modelagem de processos, diagnósticos de possíveis atrasos e previsão de progresso.

Figura 9 – Arquitetura de um gêmeo digital proposto para um projeto de construção



Fonte: traduzido de Pan e Zhang (2021b)

Dessa forma, Pan e Zhang (2021b) avaliam que a maior vantagem da análise de dados através do gêmeo digital consiste em poder explorar os dados coletados em tempo hábil para a tomada de decisões estratégicas, permitindo a melhoria dos processos, e fazendo com que os gerentes não dependam unicamente da sua experiência e conhecimento técnico. Dessa forma, o feedback pode ser dado à dimensão física a tempo de regular a programação das atividades e o dimensionamento de equipes (PAN; ZHANG, 2021b).

2.4 TECNOLOGIAS PARA COLETA DE DADOS AS-BUILT ATRAVÉS DE IMAGENS PARA MONITORAMENTO DO PROGRESSO DE OBRAS

O monitoramento do progresso de uma obra é considerado uma das tarefas mais desafiadoras para os gestores, devido à complexidade dos objetivos a serem alcançados e interdependência entre as atividades (ALIZADEHSALEHI; YITMEN, 2019). Em canteiros de obras de grande escala, o processo de monitoramento do progresso das mais diversas atividades pode se tornar altamente trabalhoso e sujeito a erros, devido à vasta quantidade de dados produzidos diariamente e armazenados em cronogramas, relatórios e registros fotográficos (RAHIMIAN *et al.*, 2020).

A integração de modelos BIM e sistemas de aquisição de dados da construção pode aumentar o grau de automação e confiabilidade do processo de controle e monitoramento do progresso ao longo da obra (SALEHI; YITMEN, 2018). A utilização de sistemas ciber-físicos para monitoramento de progresso visa reduzir ou eliminar a coleta manual de dados em campo e proporcionar ferramentas para avaliar o progresso em tempo reduzido ou em tempo real, possibilitando que as pessoas se concentrem em atividades de maior valor agregado e de tomada de decisão (CORREA, 2018).

A tendência de se utilizar dados visuais como imagens e vídeos para documentar o progresso da construção é uma grande oportunidade para alimentar sistemas ciber-físicos com informações visuais e atualizadas acerca do status da obra (LIN; GOLPARVAR-FARD, 2ª20a). Segundo Lin e Golparvar-Fard (2020b), o uso de dados visuais em sistemas ciber-físicos pode melhorar o desempenho dos processos nos seguintes aspectos:

- **Transparência:** através de dados visuais é possível obter uma representação gráfica acessível a todos;
- **Eficiência:** dados visuais podem fornecer informações claras e completas para comunicação;
- **Acessibilidade:** dados visuais podem ser facilmente compartilhados e acessados por meio de diferentes interfaces;
- **Durabilidade:** dados visuais podem ficar armazenados digitalmente pelo período que for necessário, podendo ser acessado facilmente quando preciso.

De acordo com Han e Golparvar-Fard (2017), dados visuais, independentemente da sua qualidade, registram as condições em que cenas ou objetos se encontram no momento da captura, enquanto texto e palavras podem ter significados variados que podem mudar ao longo do tempo. Dessa forma, o grande aumento no volume de dados de imagem e vídeo registrados nos canteiros de obras com dispositivos como smartphones, câmeras fixas, RPA e laser scanner oferece uma oportunidade única para registrar e analisar todo o ciclo de vida da construção (LIN; GOLPARVAR-FARD, 2020b). Os avanços alcançados no desenvolvimento de tais tecnologias possibilitam a obtenção de informações acerca do status real em que se encontra a execução do

projeto, sendo esta uma tarefa de fundamental importância para o monitoramento do progresso da obra (HAN; DEGOL; GOLPARVAR-FARD, 2018; ALIZADEHSALEHI; YITMEN, 2019).

Freimuth e König (2019) listam um conjunto de requisitos desejáveis para um sistema de captura de dados do *as-built* moderno e eficiente, incluindo: (a) ser baseado em representações visuais dos objetos físicos, proporcionando uma melhor compreensão e análise pelas pessoas envolvidas; (b) possibilitar o processamento automatizado dos dados; e (c) ser utilizado de modo a contribuir para o processo de comparação com os dados do modelo planejado. Além disso, é importante que o método escolhido tenha eficiência operacional (FREIMUTH; KÖNIG, 2019). A Figura 10 apresenta diversas tecnologias para coleta de dados visuais em campo.

Figura 10 – Algumas formas de coleta de dados visuais em campo e sua frequência estimada



Fonte: adaptado de Lin e Golparvar-Fard (2020b)

Segundo Lin e Golparvar-Fard (2020b), atualmente existem duas práticas dominantes para utilizar fotografias no processo de monitoramento do progresso em obras:

- **Através da utilização de fotografias panorâmicas de alta resolução do local:** embora essas imagens forneçam excelentes recursos para visualização das atividades em andamento, elas carecem de informações

tridimensionais que poderiam auxiliar, por exemplo, em medições baseadas em áreas e volumes para o monitoramento do progresso.

- **Através da geração de nuvens de pontos 3D:** o estado da arte em métodos de fotogrametria e visão computacional para geração de nuvens de pontos avançou significativamente na última década. Esses desenvolvimentos levaram à existência de várias plataformas comerciais capazes de gerar nuvens de pontos de forma automatizada a partir de um conjunto de fotografias sobrepostas.

A seguir serão apresentadas algumas das abordagens baseadas em imagens mais utilizadas em trabalhos da literatura para coleta de dados do estado real da obra visando o monitoramento do progresso da construção.

2.4.1 Uso de fotografias e vídeos

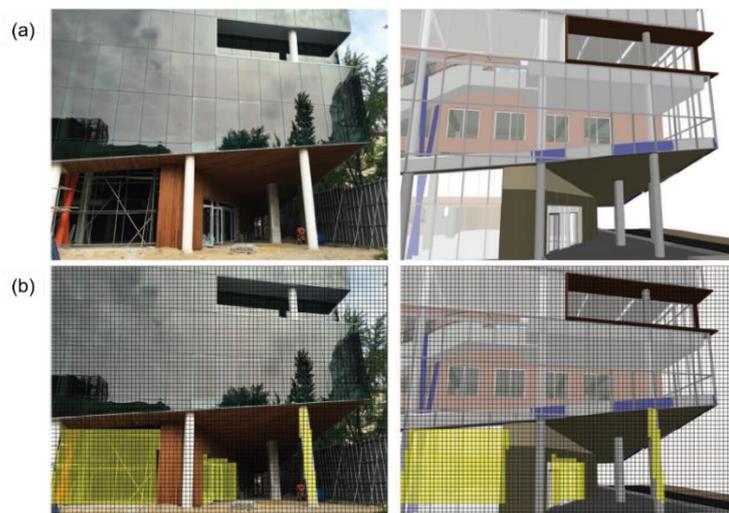
Os métodos que utilizam fotografias e vídeos como a principal ferramenta para coleta de dados do estado atual têm como vantagens o seu bom custo-benefício e facilidade operacional (RAHIMIAN *et al.*, 2020). A utilização de fotografias e vídeos para fins de documentação é uma prática comum em canteiros de obras, muitas vezes não necessitando de nenhum conhecimento prévio específico (KROPP; KOCH; KÖNIG, 2018).

De acordo com Freimuth e König (2019), em métodos que utilizam fotografias 2D como fonte de dados do *as-built*, as imagens são alinhadas ao modelo BIM para comparação com o estado planejado, sendo necessário para tanto estimar a pose da câmera com a qual a imagem foi registrada. Uma câmera virtual na representação do modelo recebe a pose reconstruída da fotografia e, em seguida, a imagem da perspectiva da câmera virtual é comparada à fotografia real e as diferenças entre as duas podem ser extraídas (FREIMUTH; KÖNIG, 2019). Os métodos de visão computacional mais utilizados para o registro de uma imagem na outra são aqueles que estimam o movimento da câmera através de uma cena, sendo os principais deles: odometria visual, localização e mapeamento simultâneos e *Structure from Motion* (SfM) (KROPP; KOCH; KÖNIG, 2018).

Park, Cai e Perissin (2018) apresentam um método automatizado de registro de fotografias em modelos 4D BIM. No método proposto, quando o usuário acessa o sistema web e carrega uma foto do estado atual da obra, o sistema extrai a data em

que a foto foi tirada e transmite esses dados para o servidor. O servidor acessa um banco de dados e pesquisa a imagem do modelo BIM mais semelhante à fotografia carregada utilizando a tecnologia de recuperação de imagem baseada em conteúdo. Os descritores utilizados são de histograma de borda e histograma de pirâmide de gradientes orientados, que se baseiam em textura e forma, respectivamente. Em seguida, o sistema extrai uma lista de elementos BIM que aparecem no ponto de vista do modelo 4D para identificar esses objetos na fotografia enviada, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Comparação entre: (a) fotografia do estado atual e imagem mais semelhante do modelo encontrada, e (b) detecção de objetos na fotografia e na imagem do modelo



Fonte: adaptado de Park, Cai e Perissin (2018)

Kropp, Koch e König (2018) apresentam um método para aumentar o grau de automação do monitoramento do progresso em ambientes internos de obras. O método reconhece o estado atual das atividades a partir de vídeos, modelos BIM do estado planejado e algoritmos de visão computacional. O primeiro passo consiste no registro dos quadros de vídeo no modelo 4D BIM. Um registro inicial é realizado com intervenção manual para o primeiro quadro, e visa obter uma estimativa da pose da câmera que é usada para estimar a pose dos quadros subsequentes. Para encontrar correspondências entre o modelo e a cena real, é desenvolvida uma abordagem de extração de segmentos de linhas. Após o registro, as imagens individuais são analisadas e é feita a identificação de objetos com base na sua presença física na imagem. Em seguida é utilizada uma abordagem baseada em aparência para reconhecer o material dos elementos e identificar o status da atividade. As atividades

monitoradas por Kropp, Koch e König (2018) foram a instalação de *drywall* e montagem de radiadores.

No método proposto por Rahimian *et al.* (2020), a captura de fotografias da obra é realizada diariamente utilizando câmeras com sensor de profundidade. As configurações de localização da câmera são utilizadas para reproduzir a cena da fotografia no modelo BIM. Uma rede neural convolucional detecta e identifica elementos de construção nas fotografias reais, sobrepondo-os ao modelo BIM em um ambiente de realidade virtual para comparação.

Por sua vez, Wang *et al.* (2021) utilizam vídeos de câmeras de segurança juntamente com técnicas de detecção e rastreamento de objetos e segmentação de instâncias para coletar informações temporais e de localização da instalação de paredes pré-fabricadas em canteiros de obras. Essas informações são transferidas para o modelo BIM, possibilitando o monitoramento do progresso dessa atividade.

O mapeamento e localização visual simultâneos (VSLAM) é um método de visão computacional que considera a estimativa da localização da câmera durante a construção de um mapa (KROPP; KOCH; KÖNIG, 2018). Asadi *et al.* (2019) apresentam um modelo para automatizar o registro de frames de vídeos do estado atual da obra no modelo BIM do estado planejado. Esse registro ocorre através do mapeamento e localização simultâneos (SLAM), que permite a detecção e correspondência entre as perspectivas dos frames de vídeo e suas vistas no modelo BIM. Segundo Asadi *et al.* (2019), por meio do método proposto é possível estimar poses de sequências de imagens ou vídeos e mapear o ambiente em tempo real, uma vez que o SLAM visual permite a estimativa da localização e orientação da câmera enquanto reconstrói a cena tridimensionalmente (Figura 12).

Figura 12 – Localização da perspectiva da câmera no modelo BIM



Fonte: traduzido de Asadi *et al.* (2019)

2.4.2 Fotogrametria

Embora os estudos que utilizam fotografias 2D para coleta de dados tenham alcançado bons resultados para fins de monitoramento visual do progresso, as fotografias 2D não fornecem informações geométricas tridimensionais para visualização do status de execução da obra, fazendo com que várias pesquisas tenham se voltado para o processamento de fotografias, com a geração de nuvens de pontos por meio de técnicas de fotogrametria (PURI; TURKAN, 2020).

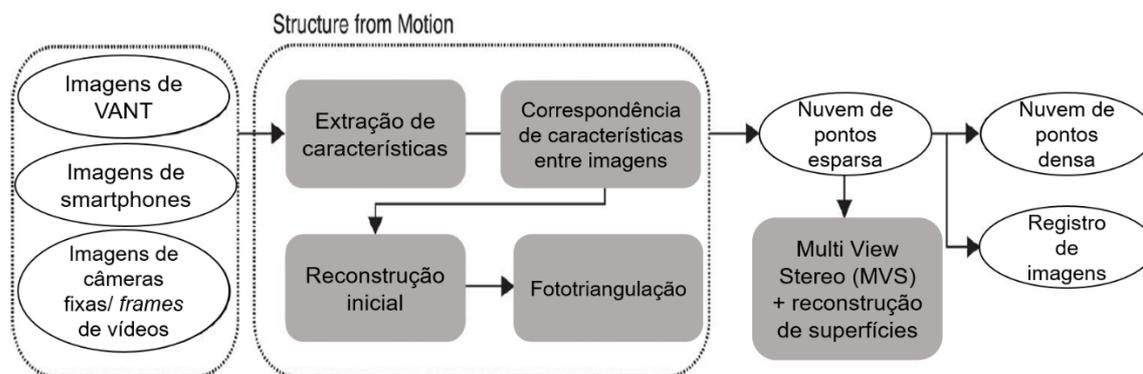
Foster e Halbstein (2014) definem fotogrametria como a ciência capaz de extrair informações úteis a partir da aquisição, processamento e análise de imagens 2D, na maioria das vezes fotografias. Esse campo de estudo tem uma história que o conecta a muitos outros campos e disciplinas, como a óptica, a geometria projetiva, o sensoriamento remoto e a visão computacional (FOSTER; HALBSTEIN, 2014). Na fotogrametria a reconstrução 3D do ambiente físico é feita com base na identificação de características homólogas, como pontos, padrões ou bordas entre duas ou mais imagens sobrepostas (NOCERINO *et al.*, 2020).

Na fotogrametria, a reconstrução do canteiro de obras sob a forma de nuvens de pontos é possível utilizando-se câmeras para captura de fotografias sobrepostas do local de interesse (BRAUN; BORRMANN, 2019). A nuvem de pontos do estado real da construção contém “n” pontos dotados de coordenadas espaciais e informações de cor extraídas dos pixels correspondentes nas imagens originais (BRAUN *et al.*, 2020). Segundo Braun *et al.* (2020), o número “n” de pontos presentes na nuvem de pontos depende de fatores como luminosidade, textura das superfícies e quantidade e resolução das imagens utilizadas.

Havendo um número suficiente de fotografias sobrepostas e em diferentes ângulos, a nuvem de pontos da construção pode ser gerada com a utilização de técnicas fotogramétricas, como a *Structure from Motion* (SfM) e *Multi-View Stereo* (MVS) (BRAUN; BORRMANN, 2019). A SfM é uma técnica que consiste na detecção automática de características em comum entre as imagens seguida pela fototriangulação, na qual são estimados os parâmetros da câmera e as coordenadas 3D dos pontos (REMONDINO *et al.*, 2017). A técnica de MVS geralmente é utilizada após a SfM nos softwares comerciais de fotogrametria com o objetivo de construir uma nuvem de pontos mais densa ou uma malha triangular de superfície a partir da nuvem de pontos resultante (NOCERINO *et al.*, 2020). Todo esse processo é

computacionalmente intensivo, mas o desenvolvimento de softwares comerciais simplificados ajudou a difundir mais o uso dessas técnicas (FREIMUTH; KÖNIG, 2019). A Figura 13 apresenta um diagrama contendo as etapas para geração de nuvens de pontos através das técnicas de SfM e MVS.

Figura 13 – Etapas da reconstrução 3D fotogramétrica



Fonte: traduzido de Lin e Golparvar-Fard (2020b)

Alguns requisitos referentes à orientação e a posição de onde as imagens são tiradas devem ser seguidos para uma reconstrução 3D confiável. Segundo Eltner e Sofia (2020), as imagens devem ter um alto nível de sobreposição em diferentes perspectivas, de modo que se tenham pelo menos três imagens contendo um ponto para que este ponto seja corretamente identificado. De modo geral, quanto mais imagens a tendência é obter uma melhor reconstrução (ELTNER; SOFIA, 2020).

Algumas propriedades como iluminação e textura das superfícies influenciam significativamente a detecção e correspondência de características homólogas entre as imagens. Deve-se evitar sombras ou iluminação em excesso. A textura das superfícies deve apresentar um contraste suficiente, mas não deve ser muito complexa, como ocorre com vegetações, por exemplo, em que a aparência muda distintamente com mudanças mínimas de perspectivas (ELTNER; SOFIA, 2020).

Segundo Barazzetti, Gianinetto e Scaioni (2020), o georreferenciamento é fundamental para associar cada primitiva geométrica a uma localização no espaço geográfico, podendo ser realizado das seguintes formas:

- Diretamente do sensor para aquisição de dados integrados a sistemas de navegação por satélite (GNSS), de navegação inercial (INS) e outros;

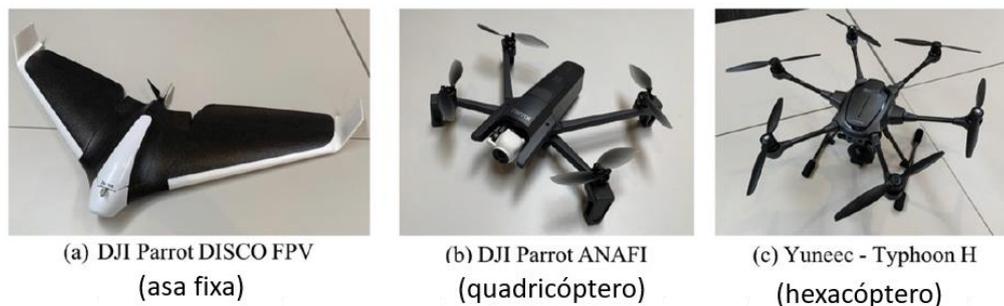
- Indiretamente através de pontos de controle cujas coordenadas são conhecidas;
- Ou mesclando as duas técnicas.

As nuvens de pontos produzidas por meio de fotogrametria são menos precisas quando comparadas com a técnica de varredura a laser e requerem o uso de ferramentas computacionais robustas para processamento (BRAUN *et al.*, 2020). Além disso, a técnica empregada no momento da aquisição das imagens afeta fortemente a qualidade da reconstrução final da superfície (NOCERINO *et al.*, 2020). Ainda assim, a reconstrução 3D através de imagens é frequentemente utilizada devido à sua facilidade, portabilidade, eficiência e confiabilidade (NOCERINO *et al.*, 2020). Além disso, câmeras são equipamentos comuns, de baixo custo e atualmente muito utilizadas em RPA (BRAUN *et al.*, 2020).

2.4.3 Aeronave Remotamente Pilotada

Uma Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely-Piloted Aircraft – RPA*) significa a aeronave não tripulada pilotada a partir de uma estação de pilotagem remota com finalidade diversa de recreação (ANAC, 2021). Também conhecida como *drone*, é uma aeronave que voa de forma autônoma ou é pilotada remotamente, neste caso, podendo ser controlada por um smartphone ou tablet (ALIZADEHSALEHI *et al.*, 2020). As duas formas mais comuns de RPA são os de asa fixa, que possuem asas aerodinâmicas para criar sustentação, e asa rotativa, que ganham sustentação com o empuxo do motor (GHEISARI; COSTA; IRIZARRY, 2020). A Figura 14 mostra alguns tipos de RPA mais comuns.

Figura 14 – Alguns tipos de RPA: (a) de asa fixa; (b) e (c) de asas rotativas



Fonte: traduzido de Gheisari, Costa e Irizarry (2020)

Embora as RPA de asa fixa sejam capazes de voar em alta velocidade por uma longa duração e tenham uma estrutura mais simples, eles precisam de uma pista para

decolagem ou de um lançador e não são capazes de pairar (GHEISARI; COSTA; IRIZARRY, 2020). RPA de asas rotativas como os quadricópteros são preferíveis para uso no contexto da construção civil, pois suas características aerodinâmicas incluem decolagem e pouso verticais, capacidade de pairar estável no ar e de transportar sensores como câmeras, laser scanners, leitores de identificação por radiofrequência (RFID), dentre outros (FREIMUTH; KÖNIG, 2019; MCCABE *et al.*, 2017).

A possibilidade de introduzir câmeras de alta resolução a bordo de RPA torna essa ferramenta especialmente útil para o levantamento fotogramétrico de canteiro através da captura de centenas a milhares de fotografias aéreas em um curto espaço de tempo (HAN; DEGOL; GOLPARVAR-FARD, 2018). As RPA podem melhorar significativamente o processo de coleta de imagens para realização do levantamento fotogramétrico, principalmente pelo fato de a maioria das RPA terem a capacidade de se localizarem constantemente durante o voo (FREIMUTH; KÖNIG, 2019). Com isso, é possível recuperar a orientação precisa do sensor e a posição da câmera durante a captura de imagens, permitindo aplicações de fotogrametria através da técnica de SfM sem a obrigatoriedade de utilizar pontos de controle (ELTNER; SOFIA, 2020).

Como mostra a Figura 15, é possível gerar nuvens de pontos com fotografias coletadas por RPA através da utilização de diversos softwares de processamento fotogramétrico, como Pix4D, Context Capture e Metashape, possibilitando a captura em locais de difícil acesso e em grandes altitudes (KIM; KIM; LEE, 2020).

Figura 15 – Processo para obtenção de informações espaciais através de RPA



Fonte: adaptado de Kim, Kim e Lee (2020)

A RPA pode ser controlada manualmente, de forma semiautônoma, ou de forma completamente autônoma (GHEISARI; COSTA; IRIZARRY, 2020). No Brasil, o órgão que regulamenta operações com RPA é a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).

De acordo com a ANAC (2021), as operações totalmente autônomas, ou seja, aquelas nas quais o piloto remoto não é capaz de intervir, são proibidas. Essas operações diferem-se das automatizadas ou semiautônomas, nas quais o piloto remoto pode interferir em qualquer ponto (ANAC, 2017).

A maioria das RPA comerciais possibilitam que o trajeto do voo autônomo ou semiautônomo seja preparado antecipadamente através de aplicativos para smartphones (FREIMUTH; KÖNIG, 2019). Para voos com o objetivo de coleta de imagens para reconstrução 3D fotogramétrica do ambiente, Templin e Popielarczyk (2020) recomendam evitar ventos fortes e chuvas, escolhendo, se possível, um dia nublado por volta de meio dia para realização do voo, quando as sombras não são muito fortes e nem muito longas. McCabe *et al.* (2017) ressaltam que, especialmente no ambiente em obras, é importante que o trajeto designado seja otimizado e controlado para lidar com mudanças dinâmicas do local. Em ambientes fechados em construção, o som da RPA pode distrair os trabalhadores, resultando em acidentes, além de também haver o risco de a RPA entrar em contato físico com eles ou outros objetos no local (MCCABE *et al.*, 2017).

2.4.4 Câmera 360°

O desenvolvimento da fotografia esférica 360° quebrou paradigmas da tradição fotográfica. A possibilidade de estar em um ambiente imersivo, que simula a interação humana com a realidade, amplia a compreensão do espaço e da situação registrada, não mais sujeita a cortes (GROSSKOPF *et al.*, 2019).

A fotografia imersiva 360° possui captura integral, sendo capaz de registrar espaços integralmente com apenas um disparo, e por apresentar uma simulação ultrarrealista da interação sujeito-espaço, tem se mostrado como uma poderosa ferramenta para a verificação e validação de informações espaciais, com elevado potencial de utilidade para as áreas de georreferenciamento, planejamento urbano e construção civil (GROSSKOPF *et al.*, 2019).

As câmeras 360° comerciais modernas são, na realidade, compostas por dois ou mais sensores montados em um equipamento comum (CALANTROPIO *et al.*, 2019). O uso de imagens esféricas não é algo novo, apesar de a maioria das aplicações terem sido realizadas com imagens coletadas a partir de uma câmera giratória e posteriormente unidas com softwares de geração de panoramas

(BARAZZETTI; PREVITALI; RONCORONI, 2018). Fangi *et al.* (2018) afirmam que uma das maiores vantagens em se utilizar câmeras 360° está justamente no fato de não ser mais necessária a captura seguida pela junção de múltiplas imagens para criação de um panorama. Outras vantagens citadas por Fangi *et al.* (2018) para utilização de câmeras 360° incluem a sua alta resolução, o campo de visão de até 360° das fotografias, o baixo custo, a completude das informações geradas e a alta velocidade de captura das fotos.

Figura 16 – Fotografia 360 graus em formato equirretangular, seu formato nativo



Fonte: Grosskopf *et al.* (2019)

Figura 17 – Fotografia 360° em seu formato imersivo, exibida em quatro enquadramentos de visualização diferentes no aplicativo Panorama Viewer



Fonte: Grosskopf *et al.* (2019)

As fotografias em 360° também podem ser úteis para o levantamento fotogramétrico de espaços longos e estreitos, substituindo as fotografias tradicionais em perspectiva central que podem levar à aquisição de muitas imagens (BARAZZETTI *et al.*, 2019). Barazzetti *et al.* (2019) realizaram a reconstrução 3D fotogramétrica de interiores com auxílio de câmeras tradicionais de perspectiva central, utilizando

câmera 360° apenas nas regiões entre os cômodos que apresentam portas e janelas. Segundo Barazzetti *et al.* (2019), nesse caso, o amplo campo de visão das fotografias 360° permite capturar simultaneamente diferentes ambientes, bem como espaços internos e externos, que serão visíveis em uma única foto.

Losè, Chiabrando e Tonolo (2021) têm como foco o uso de câmeras 360° e fotogrametria esférica para a documentação de patrimônio cultural. Segundo estes autores, essas são abordagens menos consolidadas entre as atualmente adotadas para a mesma finalidade. Losè, Chiabrando e Tonolo (2021) consideram que a aquisição de dados com uma câmera 360° é geralmente mais fácil em comparação com as abordagens tradicionais de fotogrametria de curto alcance. No entanto, segundo estes autores, é importante planejar cuidadosamente a estratégia de aquisição para esse tipo de sensor.

Segundo Losè, Chiabrando e Tonolo (2021), a primeira etapa antes de se realizar o processamento fotogramétrico de dados coletados com uma câmera 360° é a fase de costura, que consiste em combinar as imagens adquiridas por cada sensor da câmera em uma única fotografia. Losè, Chiabrando e Tonolo (2021) afirmam que a fase de costura pode ser realizada automaticamente com a adoção de diversas soluções de software, tanto comerciais como de código aberto. No entanto, nos últimos anos, as câmeras 360° disponíveis comercialmente possuem seus próprios softwares dedicados para a fase de costura.

Subramanian e Gheisari (2019) realizaram a comparação entre as técnicas de varredura a laser e fotogrametria com fotografias em 360 graus e chegaram à conclusão de que esta é significativamente mais rápida, podendo ser uma técnica apropriada para aplicações nas quais um nível de precisão menor seria suficiente. Calantropio *et al.* (2019) exploram as potencialidades de fotografias e vídeos esféricos adquiridos por meio de uma câmera 360° montada a bordo de RPA, com foco no desenvolvimento de um sistema híbrido que proporcione a aquisição rápida de dados. Diante dessa experiência, Calantropio *et al.* (2019) afirmaram que a fusão de tais dados é um procedimento compatível com a reconstrução 3D do objeto levantado por meio de abordagem fotogramétrica. Tal procedimento pode ser adotado quando apenas um ou poucos voos podem ser realizados no local, possibilitando a realização de um voo de menor duração com RPA.

Losè, Chiabrando e Tonolo (2021) consideram, portanto, que os dados adquiridos a partir de câmeras 360° podem ser usados em conjunto com uma técnica para realização de levantamentos fotogramétricos rápidos. Além disso, os autores afirmam que esses dados possuem um valor agregado intrínseco como dados 360°, uma vez que seus componentes imersivos podem ser utilizados para a realização de passeios virtuais. No entanto, para Losè, Chiabrando e Tonolo (2021), algumas questões ainda permanecem em aberto, como a possibilidade de combinar as imagens e vídeos 360° com os modelos 3D gerados por fotogrametria em um ambiente virtual para melhor gerenciar e compartilhar os dados coletados em campo.

2.4.5 Uso de nuvens de pontos e câmera 360° para o monitoramento do progresso de obras

De modo geral, a identificação automática do progresso com uso de nuvens de pontos é um processo que possui seis grandes etapas: coleta de imagens, geração da nuvem de pontos, registro, segmentação da nuvem de pontos, reconhecimento semântico de objetos na nuvem de pontos e, por fim, a detecção do progresso (XUE; HOU; ZENG, 2021).

Para permitir a análise do desvio do progresso, o modelo BIM e a nuvem de pontos precisam estar alinhados no mesmo sistema de coordenadas. O alinhamento ou sobreposição de dados do mundo real, como fotografias e nuvens de pontos a um modelo digital é denominado registro (MAHMOOD; HAN; LEE, 2020). O protocolo mais utilizado pela literatura para registro de nuvens de pontos inclui um pré-processamento para remover ruídos, a realização de um registro grosso para obter um alinhamento aproximado, e um registro fino para atingir um alinhamento quase ideal, minimizando a distância entre as nuvens de pontos (MASOOD *et al.*, 2020; MAHMOOD; HAN; LEE, 2020).

O algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP), um dos mais utilizados na literatura, aplica iterativamente as matrizes de transformação (rotações e translações) até que a distância média mínima possível entre as nuvens de ponto seja alcançada (MAHMOOD; HAN; LEE, 2020). Nos casos de imagens coletadas por RPA, as coordenadas GPS podem ser utilizadas para realizar o registro do modelo BIM com as nuvens de pontos. No entanto, Han e Golparvar-Fard (2017) afirmam que coordenadas GPS imprecisas, especialmente no eixo vertical, e modelos fora do sistema de coordenadas ainda são desafios não resolvidos.

Segundo Paneru e Jeelani (2021), mesmo pequenas imprecisões no processo de registro podem comprometer a precisão do progresso calculado. Estes autores afirmam ainda que, como atualmente ainda não existe um método robusto disponível para realização do registro de forma automática, essa etapa é mais comumente realizada manualmente.

Um outro desafio encontrado no processo de identificação automática do progresso é que, independentemente do método utilizado para gerar a nuvem de pontos, haverá a presença de ruídos, objetos não desejados e obstáculos como equipamentos, materiais e trabalhadores. Segundo Xue, Hou e Zeng (2021), nuvens de pontos ruidosas implicam não somente na utilização de mais recursos computacionais, como também afetam o processo final de detecção do progresso. Devido a isso, é necessário segmentar a nuvem de pontos para excluir pontos redundantes fora da região de interesse (XUE; HOU; ZENG, 2021).

A atribuição de informações semânticas para a nuvem de pontos é um processo denominado reconhecimento ou rotulagem semântica. Em geral, na prática, a nuvem de pontos é segmentada em pequenos fragmentos 3D homogêneos e, em seguida, os recursos como cor, posição, altura, compacidade, linearidade, planicidade, ângulo com o solo etc. de cada fragmento são extraídos para reconhecer e classificar padrões (XUE; HOU; ZENG, 2021).

Por fim, a identificação do progresso é uma abordagem que realiza a comparação automática entre o modelo planejado e o construído, detectando desvios entre eles. Nos últimos anos, os principais métodos utilizados para identificação automática do progresso tem sido aqueles baseados em ocupação, aparência e relacionamento entre primitivas geométricas (XUE; HOU; ZENG, 2021).

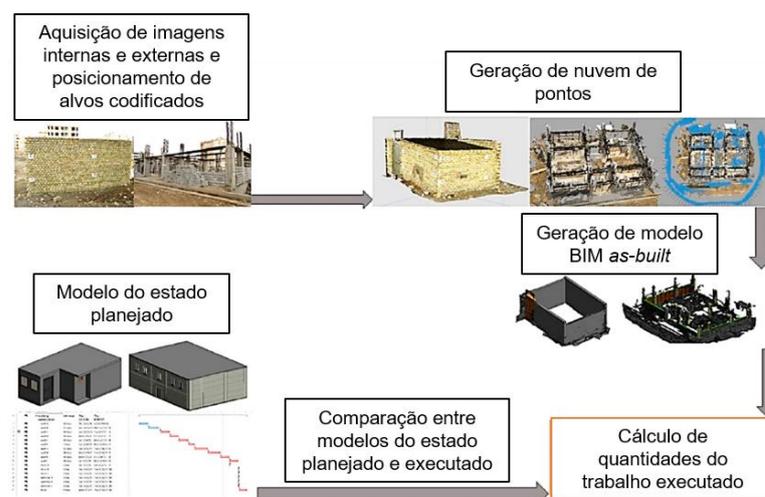
Kielhauser *et al.* (2020) apresentam uma metodologia para monitorar o progresso da construção que consiste em três partes: (1) coleta de imagens por RPA no canteiro de obras, (2) processamento das imagens, com a geração de ortomosaico e nuvem de pontos e (3) análise de dados para monitoramento do progresso e da qualidade da obra. Para isso, é desenvolvido um modelo BIM que reflete o estado em que a obra deveria se encontrar no dia da coleta das fotografias, de acordo com o cronograma. Paralelo a isso, um modelo digital do edifício é criado a partir das imagens coletadas por RPA do estado em que a obra de fato se encontrava no dia da coleta. Ambos os modelos são comparados de forma manual, e a diferença de volume

de concreto executado com relação ao volume previsto é, então, avaliada, de modo que uma diferença negativa significa um atraso na execução das atividades, enquanto uma diferença positiva significa atividades adiantadas.

No entanto, a análise de custos realizada por Kielhauser *et al.* (2020) mostrou que, atualmente, o método tradicional de monitoramento do progresso é mais econômico do que o método proposto pelos autores. Além disso, Kielhauser *et al.* (2020) apontam como uma desvantagem do método a grande quantidade de processos manuais e demorados, principalmente nas etapas de processamento e análise dos dados. Segundo Kielhauser *et al.* (2020), o desenvolvimento de um programa para automatizar tais processos não é algo trivial, de modo que, para automatizar totalmente os processos propostos, uma solução de inteligência artificial precisaria ser empregada.

Uma abordagem quantitativa também é adotada por Mahami *et al.* (2019), que utilizam nuvens de pontos geradas a partir das técnicas de SfM e MVS para o monitoramento do progresso interno e externo de obras. A partir da nuvem de pontos é gerado um modelo 3D BIM para comparação com o modelo do estado planejado da obra, permitindo que gestores avaliem a quantidade de trabalho executado e identifiquem desvios de progresso de forma eficiente. Para geração do modelo BIM do *as-built* a partir da nuvem de pontos, Mahami *et al.* (2019) convertem a nuvem de pontos em uma malha de superfície triangular. Com os modelos do estado planejado e executado, o progresso é medido quantitativamente, e os resultados da comparação dos modelos planejados e executados são usados para atualizar o cronograma da obra, como mostra a Figura 18. O método foi implementado em edifícios de um e dois andares, e os autores tiveram como foco a análise da precisão do modelo *as-built* gerado.

Figura 18 - Processo utilizado por Mahami *et al.* (2019) para medição do progresso



Fonte: traduzido de Mahami *et al.* (2019)

Álvares (2019), por sua vez, propõe um método para monitoramento visual do progresso de obras baseado em mapeamentos 3D de canteiros com uso de RPA e modelos BIM 4D, com foco na sua integração ao processo de Planejamento e Controle da Produção (Figura 19). Segundo Álvares (2019), a partir da implementação do método foi possível obter melhorias na identificação de desvios de progresso e das suas causas, na comunicação e integração da análise do progresso e tomada de decisão, além de aumento da transparência e colaboração no controle da produção. Como limitações do estudo, Álvares (2019) cita a impossibilidade de medição do progresso de atividades internas e a não incorporação de sistemas automatizados para o monitoramento do progresso.

Figura 19 - Exemplo de modelo sobreposto (nuvem de pontos e BIM) com os indicadores de cores para identificação do status de progresso em simulação 4D



Fonte: Álvares (2019)

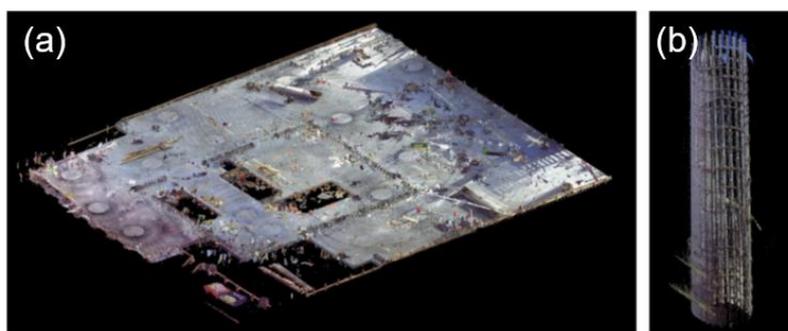
Kim, Kim e Lee (2020) também desenvolveram um método para monitoramento visual do progresso de obras, porém com a aquisição de dados com LIDAR e RPA

para geração de nuvem de pontos do estado atual. O acompanhamento visual do progresso da obra foi realizado por meio da sobreposição do modelo 3D BIM com a nuvem de pontos. Segundo Kim, Kim e Lee (2020), o método proposto permitiu uma melhor visualização do progresso real da obra e sua comparação com o planejado. No entanto, segundo estes autores, houve limitações relacionadas a erros e omissões que ocorreram no processo de alinhamento dos dados das nuvens de pontos.

Lin e Golparvar-Fard (2020b) citam os métodos baseados em ocupação (ou geometria) e baseados em aparência como o estado da arte para a comparação automática entre o planejado e o realizado. Han, Degol e Golparvar-Fard (2018) utilizam métodos baseados em geometria e em aparência para detecção do progresso a partir de fotografias diárias da construção. Para isso, um modelo 3D do *as-built* é gerado através das técnicas de SfM e MVS, utilizando as fotografias como entrada. As poses da câmera, ou seja, seus parâmetros intrínsecos e extrínsecos, assim como a nuvem de pontos do *as-built* são as saídas desse processo. O registro da nuvem de pontos com o modelo BIM é realizado manualmente através da correspondência de pontos característicos entre o modelo e a nuvem de pontos.

A próxima etapa do método proposto por Han, Degol e Golparvar-Fard (2018) consiste na filtragem da nuvem de pontos baseada em geometria, que ocorre através de uma verificação de ocupação, na qual se examina se há ou não pontos ocupados por elementos BIM (Figura 20). Nessa etapa é detectado o status de construção de elementos do modelo BIM, classificando-os, por exemplo, como em andamento ou concluído. Em seguida é utilizado um método baseado em aparência para identificar atividades a nível operacional através do reconhecimento de diferentes tipos de materiais utilizados nos elementos do modelo.

Figura 20 – Filtragem de elementos na nuvem de pontos: (a) uma laje de concreto; (b) um pilar



Fonte: Han, Degol e Golparvar-Fard (2018)

Com relação ao uso de câmeras 360° para monitoramento do progresso de obras, até a escrita deste documento a autora não encontrou artigos científicos voltados para esta aplicação específica. Por outro lado, foram levantadas algumas soluções comerciais como softwares e aplicativos móveis que fazem uso de fotografias 360° para esta finalidade. As informações sobre tais soluções foram então extraídas dos seus respectivos *websites* e apresentadas no Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Algumas soluções de softwares e aplicativos móveis desenvolvidas para o monitoramento do progresso de obras com uso de câmeras 360°

Solução	Principais funcionalidades para monitoramento do progresso	Integração ao BIM	Licenças de uso	País
Construct In (2021)	Realização de comentários nas imagens, delegação de tarefas para a equipe, geração de relatórios, acesso para todos os stakeholders.	Sim	Apenas pago	Brasil
OpenSpace (2021)	Navegação pelas fotografias 360°, comparação com o modelo BIM e uso de visão computacional e aprendizado de máquina para reconhecer, quantificar e rastrear atividades	Apenas nas versões pagas	Possui duas versões pagas e uma gratuita que permite a captura de até 3 fotografias 360° por semana	EUA
StructionSite (2021)	Documentação e navegação pelo canteiro de obras através das fotografias 360°. Possui uma ferramenta de quantificação automatizada da produção capaz de fornecer as taxas de produção planejada versus a taxa real de produção	Sim	Apenas pago	EUA
Holo Builder (2021)	Comparação entre passado e presente através de capturas 360° feitas em tempos diferentes, comparação da fotografia 360° com o modelo BIM, criação de relatórios visuais e geração de dashboards de progresso	Sim	Possui uma versão de teste de 21 dias e versões pagas	EUA
Reconstruct (2021)	Captura da realidade utilizando diferentes mídias (fotografias 360°, imagens de RPA, varredura a laser etc.) e comparação com o estado planejado através de sobreposição com o modelo BIM, identificando áreas no planejamento com risco de atraso	Sim	Apenas pago	EUA
OnSiteIQ (2021)	Documentação e navegação pelo canteiro de obras através das fotografias 360°, comparação entre passado e presente através das fotografias e uso de IA para localizar objetos de interesse	Não	Apenas pago	EUA

Solução	Principais funcionalidades para monitoramento do progresso	Integração ao BIM	Licenças de uso	País
AirGo (2021)	Navegação e comparação entre passado e presente através das fotografias 360° e comparação entre executado e planejado com o modelo BIM	Sim	Apenas pago	Singapura e Holanda
Oculo (2021)	Navegação pelas fotografias 360°, comparação com o modelo BIM e uso de aprendizado de máquina para reconhecimento automático de objetos	Sim	Apenas pago	Reino Unido

Fonte: a autora

Segundo Duarte-Vidal *et al.* (2021), embora os avanços tecnológicos tenham aumentado significativamente, a indústria da construção tem adotado de forma lenta tais técnicas apresentadas nesta revisão da literatura para o monitoramento de obras. Duarte-Vidal *et al.* (2021) consideram que, no geral, a implantação de métodos automatizados de monitoramento do progresso ainda possui caráter experimental e requer um investimento significativo das empresas.

Além dos desafios já citados, a privacidade dos dados continua sendo uma preocupação para os trabalhadores cujas atividades são capturadas por RPA, robôs terrestres, dispositivos móveis e outras ferramentas de captura. Segundo Paneru e Jeelani (2021), a questão de quem é o proprietário dos dados visuais e como eles podem ou não ser usados permanece sem resposta. Além disso, embora o objetivo da coleta de dados visuais não seja o monitoramento do trabalhador, suas atividades inevitavelmente são registradas no processo de coleta de dados. Isso pode fazer com que os trabalhadores se sintam sob constante observação, causando níveis de ansiedade e estresse que podem ter um impacto em sua saúde mental (PANERU; JEELANI, 2021).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E IDEAÇÃO DO MÉTODO

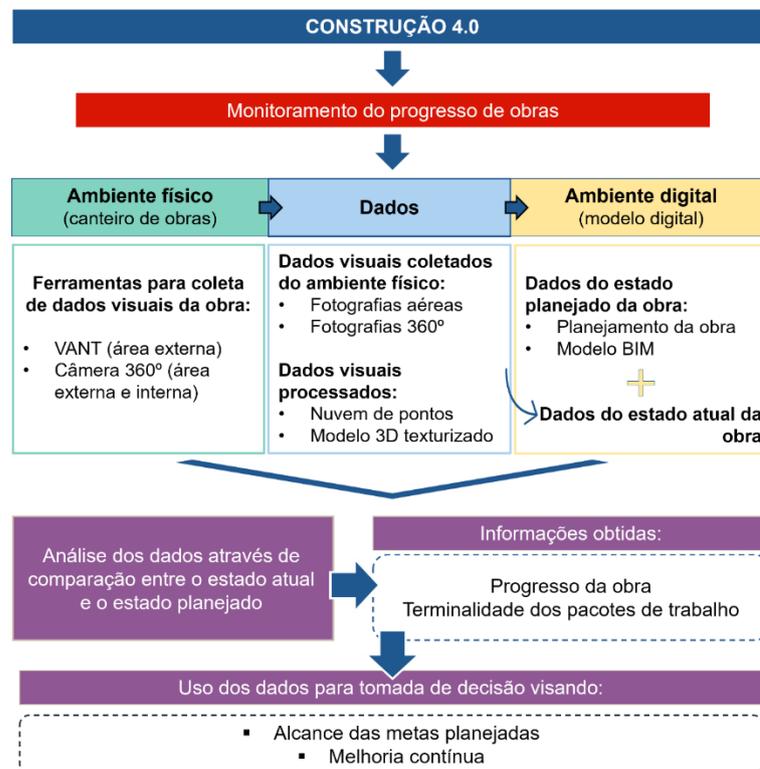
A partir dos conceitos, definições e estudos relacionados apresentados ao longo do Capítulo 2 de revisão da literatura, foi possível delinear um encadeamento de ideias para o método com base nos principais conceitos e ferramentas identificados na literatura. No esquema da Figura 21 é apresentado um resumo dos principais conceitos abordados, destacando suas conexões em função do olhar que este trabalho possui sobre tais assuntos.

O estudo terá como foco o monitoramento do progresso de obras no contexto da Construção 4.0. Nesse sentido, pretende-se implementar um fluxo de dados do ambiente físico para o ambiente digital, que permita a obtenção de informações que auxiliem a comunicação e tomada de decisão acerca do progresso da obra.

Seguindo essa lógica, o ambiente físico é composto pelo canteiro de obras, e seus dados serão coletados através de RPA e câmera 360°. Dentre os potenciais dados visuais a serem obtidos estão: fotografias aéreas, fotografias 360°, nuvem de pontos e modelo 3D texturizado. Já o ambiente digital é composto por um modelo digital no qual poderão ser integrados dados visuais e não visuais, tanto do estado planejado da obra, como do estado atual.

Pretende-se com isso realizar a análise dos dados integrados no ambiente digital através da comparação entre o estado atual e o estado planejado da obra, possibilitando a obtenção de informações acerca do progresso e da terminalidade dos pacotes de trabalho. Espera-se, portanto, que tais informações obtidas sejam úteis para a tomada de decisão visando o alcance das metas de progresso planejadas e a melhoria contínua dos processos de Planejamento e Controle da Produção.

Figura 21 – Ideação do método com base nos principais conceitos e ferramentas identificados na literatura



Fonte: a autora

3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta o método de pesquisa adotado para o desenvolvimento do trabalho, incluindo a descrição da estratégia de pesquisa, o delineamento da pesquisa e o detalhamento das etapas.

3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

A estratégia de pesquisa utilizada nesse trabalho é a *Design Science Research* (DSR). A *Design Science* é responsável por conceber e validar sistemas, seja criando, recombinao, alterando produtos, processos, softwares ou métodos para melhorar as situações existentes (LACERDA *et al.*, 2013). O objetivo da *Design Science* é desenvolver conhecimento científico para dar suporte à criação de soluções para problemas práticos, com o propósito de melhorar a condição humana (AKEN; ROMME, 2009). As pesquisas que desenvolvam artefatos, os apliquem em um contexto organizacional (cooperativamente, ou não, com os envolvidos) e o avaliem, encontram na DSR um respaldo metodológico apropriado (LACERDA *et al.*, 2013).

Na DSR, o conhecimento e a compreensão de um domínio do problema e sua solução são alcançados graças ao projeto, construção e aplicação de um artefato (BAX, 2015). Segundo Aken e Romme (2009), na DSR o pesquisador utiliza do conhecimento científico para compreender problemas práticos e prescrever uma solução adequada para o problema, atuando não somente como observador, mas também como construtor e avaliador do artefato. De acordo com Hevner *et al.* (2004), pesquisas que têm a DSR como estratégia metodológica devem ser capazes de propor e criar um artefato inovador, que possa ser útil para um determinado domínio do problema especificado. O artefato deve ser rigorosamente definido e formalmente representado, de modo que possa ser avaliado, gerando resultados para a pesquisa que sejam então comunicados (HEVNER *et al.*, 2004).

Dessa forma, esse trabalho se enquadra na abordagem da DSR por tratar de um problema de fato existente e relevante na construção civil, que ocorre devido à dificuldade para se realizar o monitoramento visual do progresso de atividades executadas tanto em ambientes internos quanto externos das obras. Para a construção de uma solução que possa ser aplicada a esta realidade, propõe-se o uso de tecnologias como BIM, RPA e câmera 360°, compondo um artefato a ser implementado e avaliado em dois estudos empíricos.

Os artefatos podem ser divididos em Constructos, Modelos, Métodos e Instanciações (MARCH; SMITH, 1995). O artefato a ser desenvolvido nessa dissertação será do tipo método, que segundo Lacerda *et al.* (2013), representam um conjunto de passos que devem ser obedecidos para que um resultado seja produzido em determinado ambiente externo. Segundo Lacerda *et al.* (2013) e Aken e Berends (2018), a DSR deve ser conduzida através das seguintes etapas:

- Conscientização: a etapa de conscientização diz respeito à compreensão da problemática envolvida, resultando na definição e formalização do problema e os objetivos e metas necessários para a sua resolução;
- Sugestão: na etapa de sugestão, dentre um conjunto de possíveis artefatos, escolhe-se um ou mais para serem desenvolvidos, explicando a fundamentação para essa escolha;
- Desenvolvimento: nessa etapa ocorre o processo de construção do artefato, podendo utilizar para isso diferentes abordagens, tais como: algoritmos computacionais, representações gráficas, protótipos, maquetes, dentre outros, resultando no artefato em estado funcional;
- Avaliação: nessa etapa ocorre um processo rigoroso de verificação do comportamento do artefato no ambiente para o qual foi projetado. No caso dos métodos, a avaliação deve considerar a sua operacionalidade, eficiência, generalidade e facilidade de uso;
- Conclusão: consiste na formalização geral do processo e sua comunicação às comunidades acadêmicas e de profissionais.

3.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Nesse tópico serão apresentadas as principais etapas para condução da pesquisa, estabelecidas com base na metodologia da *Design Science Research*, como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Delineamento geral das etapas da pesquisa



Fonte: a autora

3.3 ETAPA DE CONSCIENTIZAÇÃO

Na etapa de conscientização foi realizada uma revisão da literatura acerca do monitoramento do progresso de obras na era da Construção 4.0, identificando os principais conceitos acerca do uso de gêmeos digitais na construção, as principais tecnologias utilizadas para coleta de dados da obra através de imagens, ferramentas para captura da realidade por meio de fotogrametria e a integração de tais ferramentas e processos ao BIM para monitoramento do progresso. A partir da revisão da literatura foi possível desenvolver o problema, as questões e os objetivos da pesquisa, além de uma ideia conceitual do método. A análise dos trabalhos publicados nos últimos anos também auxiliou no desenvolvimento de sugestões para possíveis soluções para o problema de pesquisa e na estruturação da proposta inicial do método.

3.4 ETAPA DE SUGESTÃO – ESTUDO EMPÍRICO NA OBRA A

Na etapa de sugestão do artefato foi desenvolvido um primeiro estudo empírico com o objetivo de compreender a operacionalização da coleta e processamento dos dados com as tecnologias utilizadas para ajudar a definir e fundamentar uma proposta

inicial do método. O primeiro estudo empírico foi realizado na Obra A entre os meses de janeiro a maio de 2021 (Quadro 3), e compreendeu a realização das seguintes atividades:

- Realização de testes para coleta e processamento de fotografias do estado atual da obra em ambientes externos com a utilização de RPA;
- Realização de testes para coleta e processamento de fotografias do estado atual da obra em ambientes internos com a utilização de câmera 360°;
- Realização de testes com ferramentas computacionais para a integração dos produtos gerados ao modelo BIM 4D do estado planejado da obra.

Quadro 3 – Visitas realizadas à Obra A no estudo empírico

Nº da visita	Data	Atividades realizadas
1	22/01/2021	Conhecimento geral da obra e voo com RPA para captura de imagens
2	28/01/2021	Voo com RPA para captura de imagens
3	05/02/2021	Teste da câmera 360° com tripé para captura de imagens
4	18/03/2021	Voo com RPA para captura de imagens
5	26/03/2021	Voo com RPA e teste da câmera 360° com tripé para captura de imagens
6	13/04/2021	Voo com RPA e teste da câmera 360° no capacete para captura de imagens
7	26/04/2021	Teste da câmera 360° no capacete para captura de imagens
8	18/05/2021	Voo com RPA e teste da câmera 360° no capacete para captura de imagens

Fonte: a autora

A seguir será apresentada uma caracterização geral da obra A na qual o estudo foi desenvolvido, bem como o detalhamento das atividades realizadas.

3.4.1 Caracterização geral da Obra A

O primeiro estudo empírico foi desenvolvido na obra A, executada por uma empresa de médio porte presente em dois estados brasileiros, com mais de 30 anos atuando no mercado e mais de 10 mil unidades habitacionais vendidas. A escolha por essa obra se deu pelo fato de a empresa ter interesse em difundir o uso do BIM e de tecnologias digitais em suas obras, além de já ter uma parceria com o grupo de pesquisa GETEC o qual a pesquisadora faz parte.

A obra A corresponde a uma obra de edificações residenciais, localizada na cidade de Camaçari – BA (região metropolitana de Salvador). O empreendimento (Figura 23) consiste em um conjunto residencial multifamiliar com 20 edifícios (ou blocos) de 5 pavimentos (térreo e mais 4 pavimentos tipo) e 4 unidades por pavimento, totalizando 400 apartamentos. O empreendimento possui dois apartamentos por andar, com área privativa variando entre 54,03 m² a 58,41 m², como mostra a Figura 24.

Figura 23 – Implantação da Obra A



Fonte: empresa construtora da Obra A

Figura 24 – Plantas do (a) pavimento tipo 1 e (b) pavimento tipo 2



Fonte: empresa construtora da Obra A

O terreno da Obra A possui uma área total de 21.856,63 m², com 19.618,78 m² de área construída. O empreendimento tem suas fundações em blocos com estacas e estrutura de concreto armado do tipo radier. O sistema estrutural dos blocos de apartamentos é em paredes de concreto. O empreendimento também conta com áreas de uso comum, como áreas de lazer, casa de lixo e guarita, construídos em

alvenaria estrutural. A obra teve início em fevereiro de 2020 e o seu fim está previsto para setembro de 2021.

3.4.1.1 Caracterização das ferramentas utilizadas para coleta de dados com RPA

A aeronave utilizada no estudo é um RPA (Remotely Pilot Aircraft) ou drone do tipo quadricóptero (aeronave de asas rotativas com quatro hélices), modelo DJI Phantom 4, como mostra a Figura 25. Esta aeronave foi escolhida por ser uma tecnologia acessível e amplamente comercializada, com características que facilitam sua operação em canteiros de obras, como será explicado a seguir.

Figura 25 – DJI Phantom 4



Fonte: grupo GETEC

Este equipamento possui boa estabilidade durante o voo; modalidade vertical de pouso e decolagem; pequenas dimensões e peso (1388g); operação por controle remoto; e dispositivos de segurança como *Return to Home*, que possibilita a aeronave voltar ao ponto de decolagem em caso de perda do comando com o controle. A aeronave utilizada possui câmera acoplada com resolução de 12,4 MP e GPS, permitindo a captura de imagens georreferenciadas. Além disso, possui programações que atendem às limitações impostas por normas regulamentadoras quanto à altitude de voo (limite máximo de 120m) e zonas proibidas para voo, como áreas próximas a aeroportos.

Para operação e controle da aeronave foram utilizados os aplicativos móveis DJI Go, usado para controle manual da aeronave, e Pix4D Capture, usado para voos automatizados, ou seja, sem interferência direta do operador na missão, porém com a possibilidade de retomar o controle manual a qualquer momento durante o voo. O Pix4D Capture possibilita realizar voos automatizados a partir da programação prévia

de parâmetros para coordenação autônoma da missão, incluindo seleção do trajeto percorrido pela aeronave, velocidade e altura de voo, angulação da câmera e taxa de sobreposição entre imagens.

3.4.1.2 Câmera 360°

Para captura de imagens em ambientes internos da obra foi utilizada uma câmera portátil de lente esférica em 360° do modelo Insta360° One X. Esse tipo de câmera é amplamente comercializado no mercado, possuindo resolução de 18MP e tamanho e peso reduzidos que possibilitam seu uso de diversas formas (segurando na mão, acoplada no capacete de segurança, em tripés e hastes de selfie etc.), além de ter o diferencial de capturar todo o espaço ao redor em uma única fotografia, características que foram preponderantes para a sua escolha. O sistema é composto por duas lentes acopladas em lados opostos do corpo do dispositivo, como pode ser observado na Figura 26. O dispositivo também conta com um aplicativo para celular que permite configurar os diferentes modos de captura e visualizar, armazenar e editar as imagens coletadas.

Figura 26 – Câmera 360° utilizada no estudo



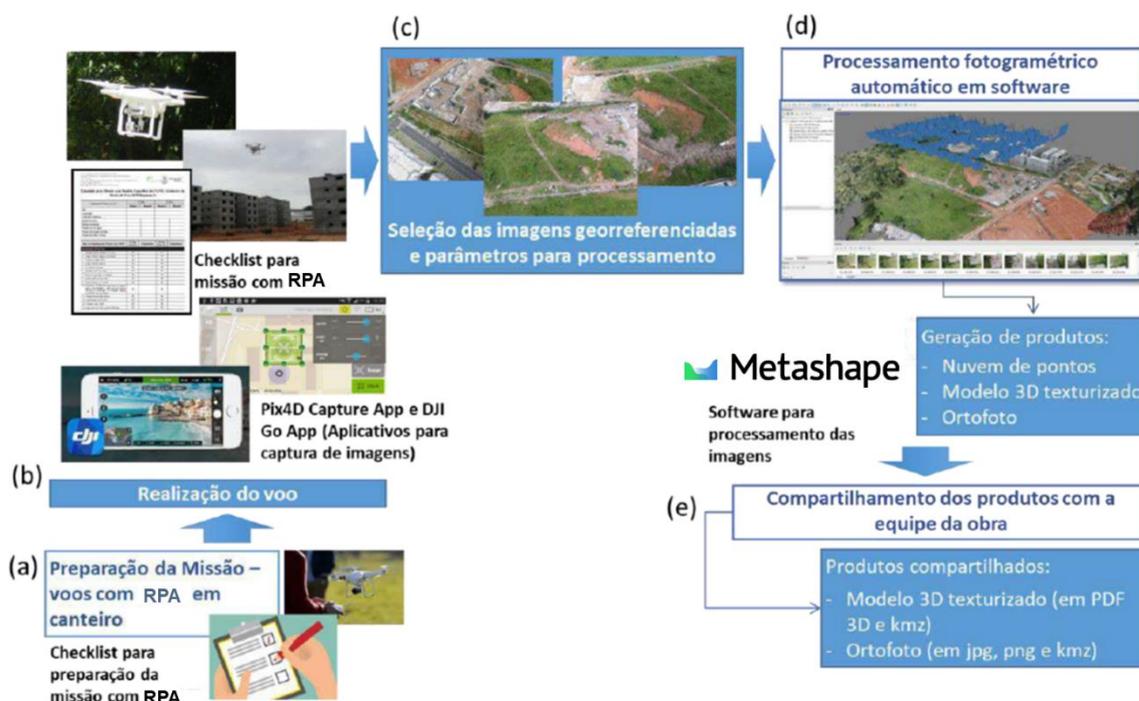
Fonte: a autora

3.4.2 Testes para coleta e processamento de fotografias da área externa da obra com uso de RPA

A geração de mapeamentos 3D do canteiro com uso de RPA tem como objetivo a captura e representação visual do estado atual da área externa da obra. Para tanto, visando testar as ferramentas e estruturar os processos envolvidos, foram realizados registros de imagens da Obra A com RPA e processamento fotogramétrico dessas

imagens, tendo como base o procedimento utilizado por Álvares (2019), ilustrado na Figura 27 e detalhado em sequência.

Figura 27 – Procedimento adotado para coleta de imagens com RPA e processamento fotogramétrico



Fonte: adaptado de Álvares (2019)

a) Preparação da missão com suporte de protocolo para programação do voo, incluindo análise dos objetivos de uso das imagens, das condições físicas do canteiro e das atividades de construção em execução, além de seleção dos parâmetros de voo e de registro das imagens;

b) Registro de imagens da área externa da obra por meio de voos com RPA, seguindo o checklist para missão e utilizando os aplicativos de controle DJI Go (usado em voos manuais) e Pix4D Capture (usado para voos automatizados);

c) Seleção das fotos que serão utilizadas no processamento fotogramétrico e seleção dos parâmetros de processamento no software Metashape;

d) Processamento das imagens com uso do software Metashape e geração do mapeamento 3D do atual estado da obra, incluindo os produtos fotogramétricos de nuvem de pontos, ortofoto e modelo 3D texturizado.

Para a condução dos voos com RPA em canteiro foi utilizado o checklist de missão desenvolvido por Álvares (2019), que inclui o cadastro de dados técnicos do

voos, além de roteiro para checagem dos procedimentos necessários para operação da aeronave em condições adequadas de segurança. O modelo do checklist de missão pode ser encontrado no Apêndice 1.

Para processamento fotogramétrico das imagens e reconstrução 3D do canteiro, foi utilizado o software Agisoft Metashape (antigo PhotoScan). Tal escolha está associada a bons resultados obtidos quando utilizado o PhotoScan em estudos prévios (ÁLVARES, 2019; ÁLVARES; COSTA; MELO, 2018), além de certa automatização e facilidade de uso do software.

O Metashape realiza a conversão de imagens 2D georreferenciadas em produtos 3D (nuvem de pontos, modelos 3D texturizados, ortomosaicos e modelos digitais de superfície e terreno georreferenciados), por meio de processamento fotogramétrico automatizado, com alinhamento automático das fotografias, identificação de feições homólogas entre imagens e geração de nuvem de pontos (AGISOFT, 2020). Os produtos gerados são ainda customizáveis e compatíveis com outros softwares, podendo ser exportados em diferentes formatos. O Quadro 4 apresenta o resumo das informações dos voos com RPA realizados na Obra A.

Quadro 4 – Dados das coletas de campo com RPA no estudo empírico realizado na Obra A

Nº de visitas com realização de voos	Modalidade dos voos	Média de fotos por voo	Duração média dos voos
6	Semiautônomo	342	00:15:27

Fonte: a autora

Dessa forma, pode-se afirmar que essa etapa foi importante para a pesquisadora adquirir os conhecimentos e habilidades práticas relacionadas ao uso das ferramentas apresentadas para geração de mapeamentos 3D da área externa do canteiro de obras.

3.4.3 Testes para coleta e processamento de fotografias de áreas internas da obra com câmera 360°

Para o monitoramento do estado real da obra no interior dos edifícios onde a visualização das atividades em andamento através das imagens coletadas por RPA não seria possível, optou-se pela utilização da câmera 360°. Com a câmera 360° é possível obter fotografias e vídeos imersivos em 360° que permitem a visualização de todo o ambiente ao redor do local onde houve a coleta. As fotografias em 360° também

podem ser processadas para geração de nuvens de pontos, tendo como vantagem, nesse caso, a obtenção de uma representação tridimensional do estado atual da obra.

Durante as primeiras coletas realizadas utilizou-se a câmera em um tripé. No entanto, percebeu-se que muito tempo era perdido durante a coleta para posicionar o tripé em cada ponto em que seriam realizadas as capturas. Posteriormente, visando obter maior praticidade, rapidez e economia da bateria durante a coleta, substituiu-se o tripé por um acessório para fixação da câmera em capacetes, como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Câmera 360 e acessório para capacete



Fonte: a autora

Nas coletas de dados em campo foi utilizado o aplicativo Insta360 ONE X de controle da câmera para smartphone, permitindo, dentre outras funcionalidades, a configuração do modo de captura desejado e visualização das imagens coletadas. Na etapa de processamento das imagens, visando converter as fotografias coletadas para sua qualidade final no formato .jpg, foi utilizado o software da câmera para desktop (Insta360 Studio). Utilizou-se também o software Agisoft Metashape para processamento fotogramétrico, como justificado anteriormente na seção 3.4.3. O Quadro 5 a seguir mostra alguns dados relativos à coleta de fotografias com a câmera 360° ao longo das visitas à obra realizadas no estudo empírico.

Quadro 5 – Dados das coletas de imagens com a câmera 360° no estudo empírico na Obra A

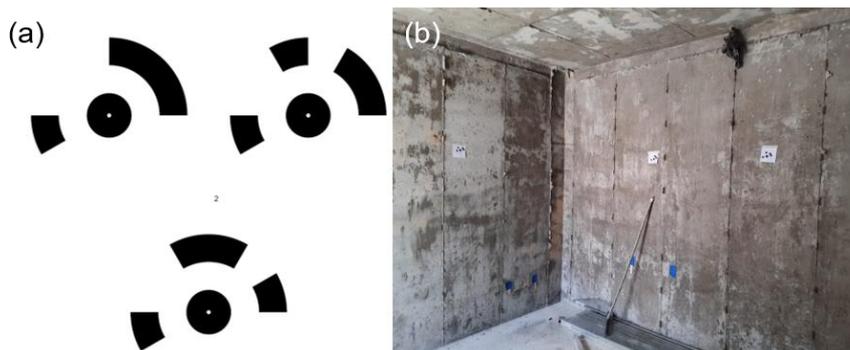
Data	Acessórios	Fotos por minuto (por apartamento)
05/02/2020	Tripé	2,19
26/03/2021	Tripé	2,58
13/04/2021	Capacete	9,48
26/04/2021	Capacete	6,18
18/05/2021	Capacete	7,57

Fonte: a autora

A primeira etapa para a coleta de fotografias em 360° de ambientes internos da obra para geração de produtos fotogramétricos consistiu em planejar a coleta. Para isso, utilizou-se a planta baixa dos pavimentos para distribuir os pontos onde seriam feitas as capturas com a câmera. Além disso, no planejamento da coleta também é estimada a quantidade e os locais para colocação de marcadores nos ambientes que se deseja mapear.

Os marcadores (Figura 29) são alvos posicionados no ambiente físico que ajudam o software Metashape a alinhar e identificar correspondências entre imagens nos casos em que a correspondência automática apresenta falhas (AGISOFT, 2021). Cada marcador possui um código que permite que o software o identifique nas diversas imagens de forma automática. Seu uso foi necessário nos ambientes internos devido à dificuldade do software em alinhar fotografias com texturas lisas e repetitivas, como aquelas encontradas em paredes e pisos, e pelo fato de as imagens 360 não serem georreferenciadas, o que leva à geração de nuvens de pontos fora de escala. Nesse estudo foram utilizados marcadores circulares de 12 bits fornecidos pelo Metashape e impressos em papel sulfite branco.

Figura 29 – (a) Exemplos de marcadores utilizados pelo software Metashape; (b) marcadores colocados no ambiente



Fonte: a autora

A segunda etapa consiste no preparo para a coleta de imagens no local, que envolve além da colocação de marcadores nos ambientes, a medição de uma distância de referência entre dois marcadores, necessária para colocar a nuvem de pontos em escala na etapa de processamento. Em seguida, a câmera é conectada ao seu aplicativo para dispositivos móveis e posicionada no capacete. O tempo médio de preparo para realização da coleta (tempo de setup) encontrado foi de 7min 30s.

No aplicativo é feita a escolha do modo de captura, sendo o modo HDR recomendado pelo fabricante para utilização da câmera em ambientes internos. Uma outra opção é utilizar o modo de captura automática em intervalos de 5 segundos, que foi o escolhido para este estudo por proporcionar maior rapidez e praticidade em comparação com o modo HDR, além de não se ter observado diferenças significativas na qualidade das fotografias. O Quadro 6 mostra a diferença em termos do tempo de coleta e quantidade de fotografias obtidas utilizando-se o modo HDR e o modo automático a cada 5 segundos.

Em seguida é realizada a coleta de imagens caminhando pelo ambiente e parando nos pontos previamente estabelecidos para a realização da captura. O Quadro 6 apresenta o tempo médio de coleta de imagens para um apartamento da Obra A. As imagens coletadas são, então, automaticamente transmitidas via Wi-Fi ou Bluetooth para o aplicativo da câmera no smartphone, no qual é possível ter uma primeira visualização da fotografia.

Quadro 6 – Média de fotos coletadas e tempo de coleta para um apartamento nos modos HDR e modo automático a cada 5 segundos

Modo de captura	Média de fotos	Média do tempo de coleta	Tempo total (coleta + setup)
HDR	37	00:07:48	00:15:18
5 segs.	39	00:04:10	00:11:40

Nota: tempo médio de setup = 00:07:30. A área dos apartamentos varia entre 54,03 m² e 58,41 m².

Fonte: a autora

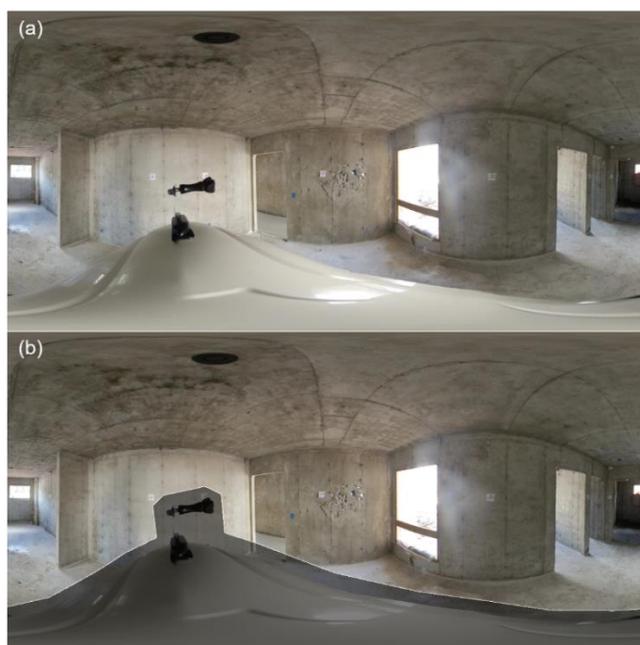
Na etapa de processamento, as imagens são primeiramente enviadas para o software Insta360 Studio da câmera para desktop, que realiza a costura³ das fotografias (processo de unir as duas fotografias 180° adquiridas pelos dois sensores

³ O termo “costura” refere-se ao processo de combinar as imagens adquiridas por cada sensor da câmera 360° em uma única fotografia 360°.

da câmera) e as exporta em sua qualidade final no formato .jpg. As fotografias são então inseridas no Metashape, que inicialmente faz a detecção automática de marcadores nas imagens. O valor de uma distância previamente conhecida ou medida in loco entre dois marcadores é utilizada nessa etapa para garantir que a nuvem de pontos e os demais produtos derivados dela estejam na escala correta.

Além disso, é aplicada uma máscara para excluir regiões das fotografias que não devem fazer parte do processamento. Máscaras são usadas no Metashape para especificar áreas nas fotografias que podem ser confusas para o programa ou levar a resultados de reconstrução incorretos (AGISOFT, 2021). Exemplos de áreas que devem receber a máscara são as regiões do tripé ou do capacete, que ficam visíveis nas fotografias 360°, como mostra a Figura 30.

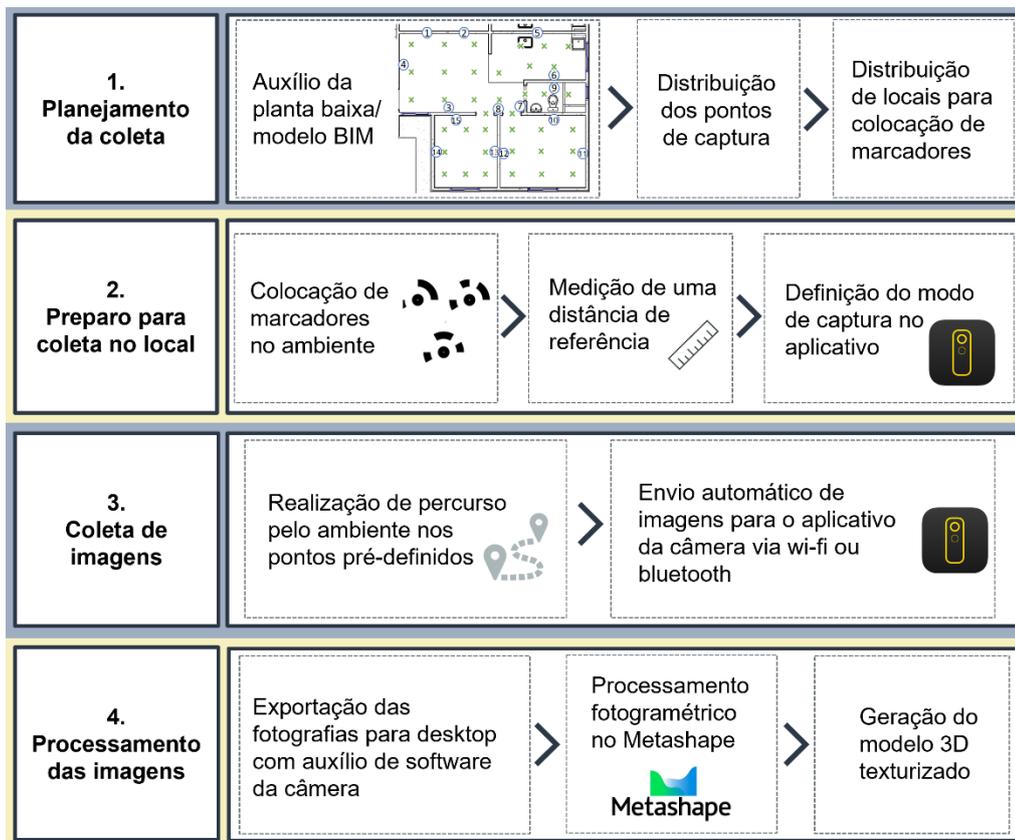
Figura 30 – Fotografia 360° (a) Antes de aplicar a máscara; (b) Com a área de aplicação da máscara delimitada no Metashape



Fonte: a autora

Em seguida é feito o processamento fotogramétrico automático das fotografias no Metashape com o alinhamento e geração da nuvem de pontos esparsa, geração da nuvem de pontos densa, seguido pela geração da malha de superfícies e do modelo 3D texturizado. Com os testes realizados no estudo empírico na Obra A e apresentados nesta seção, foi possível estabelecer o procedimento para coleta e processamento de fotografias 360° de ambientes internos, como mostra a Figura 31 a seguir.

Figura 31 – Procedimento adotado para coleta de imagens com câmera 360° e processamento fotogramétrico



Fonte: a autora

A partir do teste das tecnologias e da rotina para coleta de imagens com a câmera 360° em canteiro e processamento fotogramétrico, os seguintes produtos de suporte à estruturação da proposta preliminar do método foram obtidos:

- Definição e estudo das possíveis formas (fotografias 360° ou modelos 3D texturizados) de representação do estado atual da obra em ambientes internos com uso de câmera 360°;
- Estudo e definição das configurações de captura ideais para o contexto do canteiro estudado;
- Desenvolvimento de um protocolo (checklist) para captura de fotografias 360° para geração de nuvens de pontos e modelos 3D texturizados de ambientes internos de obras (Apêndice 2);
- Definição dos parâmetros para processamento das fotografias 360° internas no Metashape, em função do tempo de processamento e qualidade de visualização das informações.

3.4.4 Testes de ferramentas e processos para geração de modelo BIM 4D e sobreposição com modelo 3D texturizado

No estudo empírico realizado na Obra A foram realizados testes com ferramentas computacionais para comparação do estado atual da obra com o modelo BIM 4D do seu estado planejado. Para isso, os modelos BIM 3D e 4D desenvolvidos e disponibilizados pela empresa construtora da obra A foram utilizados com adaptações para atender à proposta do estudo.

A empresa A desenvolve os modelos BIM 3D no software Revit. O Revit é um software BIM que permite o desenvolvimento de projetos com base em modelos paramétricos tridimensionais interoperáveis, integrando principalmente as disciplinas de arquitetura, estrutura e instalações prediais (AUTODESK, 2021b). O planejamento da obra é desenvolvido pela empresa no MS Project, software voltado para programação de atividades e gerenciamento de projetos, com base na lógica das técnicas de planejamento com uso de redes (MICROSOFT, 2021). A geração de modelos BIM 4D é feita através do Synchro Pro, uma ferramenta de software avançada para planejar, programar e gerenciar projetos de construção em um ambiente 4D (BENTLEY, 2021). Os softwares utilizados para modelagem 3D e 4D BIM são apresentados no Quadro 7 a seguir.

Quadro 7 – Softwares utilizados para modelagem 3D e BIM 4D

Software	Objetivo	Desenvolvedor
Revit	Modelagem 3D	Autodesk
MS Project	Desenvolvimento do planejamento	Microsoft
Synchro	Geração de modelo BIM 4D	Bentley

Fonte: a autora

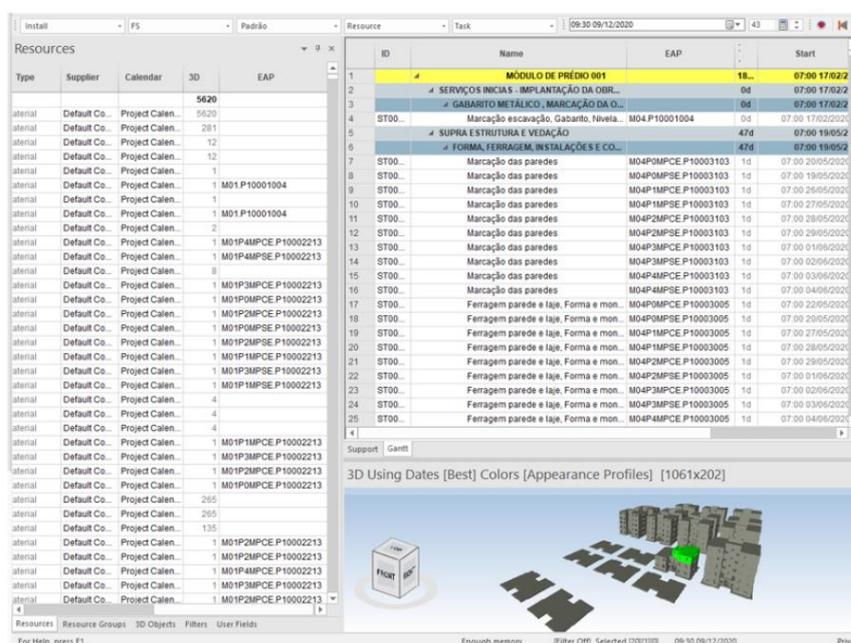
Para realização da comparação entre o modelo 3D texturizado e o modelo BIM 4D, primeiramente foi necessário fazer ajustes nos modelos 3D e 4D desenvolvidos e disponibilizados pela Obra A para corrigir os níveis de implantação dos edifícios no terreno. Foi necessário que os pesquisadores envolvidos⁴ realizassem essa etapa, pois a empresa da Obra A desenvolveu os modelos com todos os edifícios implantados em um único nível, o que não corresponde à realidade capturada e representada no modelo 3D texturizado.

⁴ Pesquisadores do GETEC envolvidos na modelagem BIM 3D da Obra A: Amanda Barbosa e Gustavo Barretto

O modelo 3D BIM foi elaborado pela empresa em um nível de informação representando de fato a maneira como cada elemento seria executado e monitorado em canteiro. Por exemplo, a espessura das camadas de revestimento (chapisco, gesso raspado, contrapiso, entre outros) foram modeladas de acordo com o padrão da empresa. Além disso, a empresa compatibiliza os modelos 3D BIM com códigos definidos durante a elaboração da EAP da obra. Assim, o mesmo código que está nos elementos do modelo 3D referente a um serviço específico está igualmente presente no planejamento no MS Project, o que atribui agilidade na geração das simulações BIM 4D no Synchro.

Na Figura 32, é possível verificar um exemplo da sincronização dos dados presentes no MS Project e no modelo 3D BIM no ambiente do Synchro para geração do modelo 4D. Na esquerda da imagem estão os elementos do modelo 3D com o campo da chave para cada um deles e, na direita, a planilha importada do MS Project com as informações de datas e o campo da chave para associar ao elemento do modelo 3D.

Figura 32 – Ambiente do Synchro com elementos do modelo 3D e planilha de planejamento



Fonte: empresa construtora

O modelo 3D texturizado fotogramétrico foi utilizado como representação do estado atual da obra pelo fato da ferramenta Synchro não ter suporte para a importação de nuvens de pontos. Em relação aos testes de sobreposição do modelo 3D texturizado ao BIM, foi realizada a sobreposição e alinhamento dos modelos no

Synchro. No entanto, constatou-se que a melhor forma de visualização encontrada foi com os modelos lado a lado para comparação no Synchro. Para tal, os modelos 3D texturizado exportados do Metashape foram importados para o modelo BIM 4D no Synchro. Na plataforma Synchro, os modelos 3D texturizados foram alinhados manualmente ao modelo BIM e inseridos como uma atividade no cronograma, para sua visualização na simulação 4D.

A partir dos processos desenvolvidos, apresentados nesta seção, foi possível se obter o procedimento para inserção, sobreposição e visualização do modelo 3D texturizado com o modelo BIM 4D, tanto de forma sobreposta como também lado a lado com auxílio da ferramenta Synchro.

3.5 ETAPA DE DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO – ESTUDO EMPÍRICO NA OBRA B

Esta etapa de pesquisa consiste na estruturação e refinamento do escopo do método proposto, a partir de sua implementação e avaliação em um estudo empírico na Obra B. Como ponto inicial para desenvolvimento desta etapa, a implementação terá como referência a proposta preliminar do método, idealizada a partir da etapa de sugestão do artefato com suporte do primeiro estudo empírico realizado.

A implementação do método proposto através do estudo na Obra B teve início em agosto de 2021, sendo finalizado em fevereiro de 2022. As atividades desenvolvidas nesse período e a caracterização da Obra B serão apresentados ao longo desta seção.

3.5.1 Caracterização geral da Obra B

A Obra B, na qual foi realizado o estudo, é executada pela mesma empresa construtora da Obra A, na qual foi realizado o segundo estudo empírico. A Obra B corresponde a uma obra de edificações residenciais, localizada no município de Lauro de Freitas – BA (região metropolitana de Salvador). O empreendimento consiste em um conjunto residencial multifamiliar com 23 edifícios de 5 pavimentos (térreo e mais 4 pavimentos tipo) e 4 unidades por pavimento, totalizando 460 apartamentos.

No período em que se iniciou o estudo, a primeira etapa da obra (construção dos 10 primeiros blocos e parte da área comum) já havia sido finalizada e entregue. Com isso, a obra em andamento consiste nos 13 blocos restantes e a área de lazer comum,

como mostra a Figura 33a. O empreendimento possui um apartamento tipo com área privativa de 46,29 m², como mostra a Figura 33b.

Figura 33 – (a) Implantação da Obra B e (b) apartamento tipo da Obra B



Fonte: empresa construtora da Obra B

O empreendimento tem suas fundações em estrutura de concreto armado do tipo radier. O sistema estrutural dos blocos de apartamentos é em paredes de concreto. O empreendimento também conta com áreas de uso comum, como áreas de lazer, casa de lixo e guarita, construídos em alvenaria estrutural. A obra teve início em março de 2021 e o seu fim está previsto para julho de 2022.

3.5.2 Implementação do método proposto na Obra B

A proposta preliminar do método que foi implementado na Obra B com os seus procedimentos e ferramentas para coleta, processamento e análise de dados relativos ao progresso da obra é apresentada no Item 4.2 do capítulo de resultados (Capítulo 4).

A primeira atividade desenvolvida foi a definição das modalidades e parâmetros do voo com RPA no canteiro da Obra B, e dos parâmetros para processamento das imagens no Metashape. No total, foram realizados 14 voos manuais com RPA na Obra B seguindo os mesmos protocolos adotados no primeiro estudo empírico. Deste total, os dois primeiros voos foram realizados como testes, ajudando a definir os parâmetros para coleta das imagens aéreas sobrepostas. Assim, os voos que possibilitaram a coleta de imagens com quantidade, qualidade e sobreposição suficiente para a geração de mapeamentos 3D da Obra B foram os demais realizados. O Quadro 8 apresenta o resumo dos dados dessas visitas.

Quadro 8 – Dados das coletas em campo com RPA na Obra B

Período	Número de voos realizados	Modalidade dos voos	Média de fotos por voo	Total de mapeamentos 3D
30/07/2021 a 11/08/2021	2	Manual	83	0
24/08/2021 a 17/02/2022	12	Manual	181	12 nuvens de pontos

Fonte: a autora

Paralelamente às coletas de imagens com RPA, foram realizadas as coletas de fotografias 360° internas na Obra B. Enquanto no estudo da Obra A utilizou-se estas imagens para geração de um modelo 3D texturizado dos ambientes internos, o estudo empírico na Obra B teve como foco a utilização somente das fotografias 360°, sem a realização do processamento fotogramétrico. O Quadro 9 apresenta o resumo dos dados das coletas de fotografias 360° do interior da Obra B.

Quadro 9 – Dados das coletas em campo com câmera 360° na Obra B

Período	Número de visitas para coleta	Modo de captura	Média de fotos por apartamento	Média do tempo de coleta por apartamento
11/08/2021 a 17/02/2022	13	HDR	3,6	1 min. E 17 seg.

Fonte: a autora

Assim como na Obra A, a empresa da Obra B desenvolveu e disponibilizou para o estudo o modelo 3D BIM de um edifício. Dessa forma, utilizou-se esse modelo para desenvolver o modelo 3D completo do empreendimento, com as 13 unidades de edifícios inseridas como vínculo e a área externa, como mostra a Figura 34. Em seguida, para cada elemento do modelo utilizou-se um parâmetro para inserir o código correspondente à atividade do elemento no planejamento de longo prazo da obra.

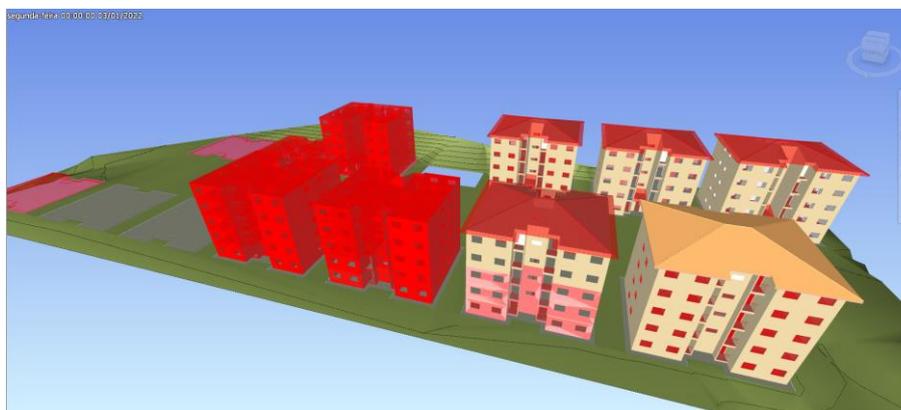
Figura 34 – Modelo 3D BIM da Obra B



Fonte: pesquisadores do GETEC⁵

Diferentemente da Obra A, a empresa parceira não havia desenvolvido o modelo 4D para a Obra B, sendo necessário o seu desenvolvimento pela equipe do GETEC envolvida no estudo. Para isso foi utilizado o software Navisworks da Autodesk, por ser mais familiar para os envolvidos na pesquisa. Assim, através dos códigos referentes à EAP inseridos nos elementos na etapa de modelagem 3D, foi possível desenvolver o modelo 4D através da vinculação entre os elementos e suas respectivas atividades no planejamento de longo prazo, como mostra a Figura 35 a seguir.

Figura 35 – Modelo 4D BIM da obra B desenvolvido no Navisworks



Fonte: pesquisadores do GETEC

O planejamento de longo prazo desenvolvido pela empresa possui um nível de detalhamento da EAP relativamente alto, com o desmembramento das atividades por edifício, e as atividades em cada edifício sendo divididas por pavimento. Dessa forma, conforme informações passadas por funcionários, o planejamento de médio prazo da

⁵ Pesquisadores do GETEC envolvidos na modelagem BIM 3D e 4D da Obra B: Amanda Barbosa e Kayan Santana

obra consistia no planejamento de longo prazo no MS Project com a aplicação de um filtro para exibir apenas as atividades do mês.

Para a identificação de desvios de progresso na área externa da obra, foi realizada a sobreposição manual da nuvem de pontos na simulação 4D no Navisworks. Já para as atividades internas, foi realizada a estimativa manual da pose da câmera no modelo, com a associação de um link para a fotografia 360° do local armazenada em nuvem. Dessa forma, após a avaliação dos dados visuais coletados no estudo, os elementos das atividades atrasadas foram exibidos em vermelho, enquanto elementos das atividades adiantadas foram exibidos em verde.

Para as atividades internas classificadas como concluídas pela obra, foi realizada uma análise da sua terminalidade. Para isso, foram utilizadas as fotografias 360° para analisar visualmente a existência de reparos pendentes nos serviços realizados. Para cada pendência identificada, foi salva uma tag no Navisworks contendo um ponto de vista (viewpoint) do ambiente com uma nuvem de revisão no local específico em que o problema foi encontrado, um comentário com uma breve descrição do problema que levou à não conclusão do serviço e o status do problema (novo, resolvido ou pendente), como mostra a Figura 36 a seguir.

Figura 36 – Modelo 4D com atividades atrasadas em vermelho e problema de terminalidade destacado através do uso de tag, nuvem de revisão e comentário



Fonte: a autora

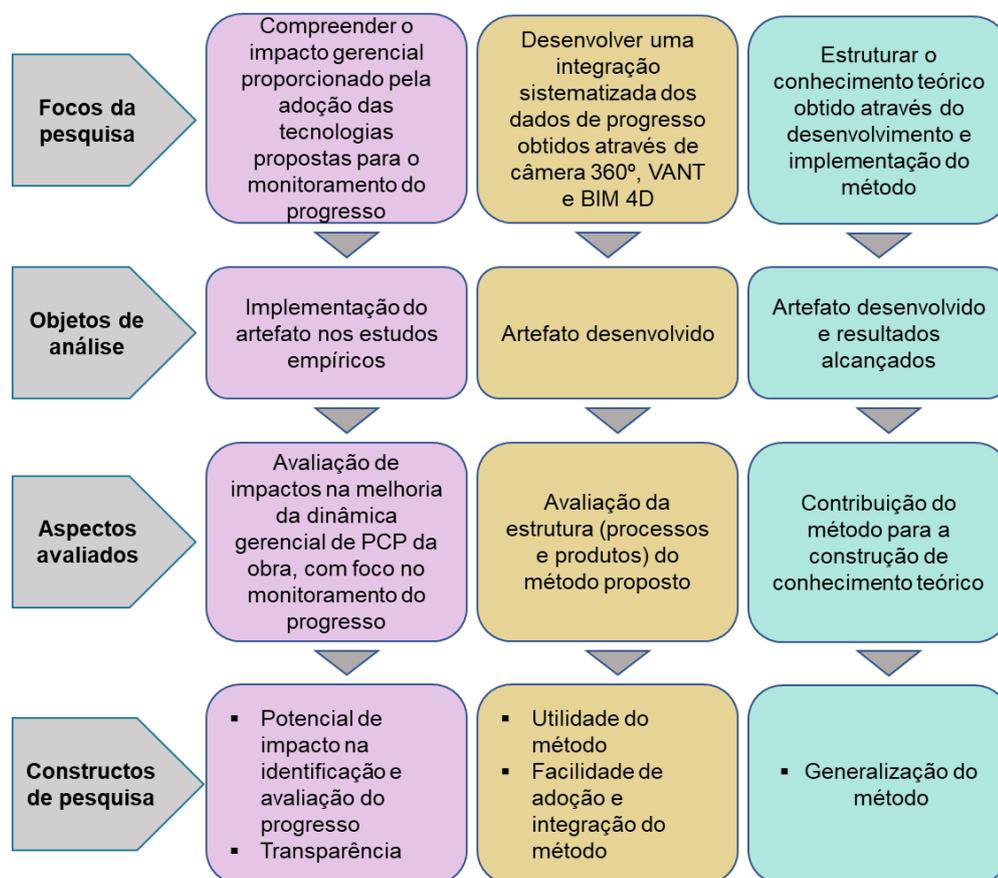
Após a realização das análises dos dados, foram desenvolvidos relatórios quinzenais de progresso e terminalidade, que foram posteriormente enviados ao engenheiro da obra. Pela grande quantidade de informações visuais, os relatórios foram desenvolvidos em PowerPoint e enviados em formato pdf, diferentemente do que havia sido proposto no método, no qual sugeriu-se o uso de ferramentas de BI para apresentação dos dados. Um exemplo do relatório desenvolvido para o estudo empírico na Obra B encontra-se no Apêndice 4.

3.6 ETAPA DE AVALIAÇÃO DO ARTEFATO

A etapa de avaliação tem por objetivo avaliar o comportamento do artefato quanto ao atendimento das soluções esperadas. A primeira atividade que compõe esta etapa é a definição dos critérios de avaliação, ou seja, os constructos de pesquisa. Para a definição dos constructos foi levado em consideração a necessidade de integrar os dados obtidos através das tecnologias de câmera 360°, RPA e BIM 4D para monitoramento do progresso e as necessidades de compreender o impacto gerencial proporcionado pela adoção de tais tecnologias e de estruturar o conhecimento teórico obtido através da implementação do método.

Dessa forma, foram definidos constructos relacionados à dois principais objetos de análise: o artefato desenvolvido (método proposto), e a implementação do artefato no estudo empírico na Obra B (resultados obtidos a partir da implementação do método). A Figura 37 apresenta o fluxo da estrutura analítica simplificada do presente trabalho, na qual é apresentada as principais conexões entre os focos do problema de pesquisa, objetos de análise, aspectos avaliados no estudo e constructos de pesquisa definidos.

Figura 37 – Estrutura analítica simplificada da pesquisa



Fonte: a autora

A seguir são apresentadas as definições dos constructos selecionados para o presente estudo:

- **Potencial de impacto na identificação e avaliação do progresso da obra:** este constructo visa avaliar o impacto das informações obtidas a partir da implementação do método proposto, para a melhoria de processos gerenciais ligados à identificação, avaliação e controle de possíveis desvios de progresso da obra, de forma a minimizar os desvios negativos;
- **Transparência:** a transparência está associada 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); Esse constructo visa avaliar o potencial das tecnologias digitais propostas em fornecerem informações visuais que auxiliem na comunicação e tomada de decisão no canteiro de obras.

- **Utilidade do método proposto:** a utilidade está associada à avaliação do método (tanto dos seus processos – sistemática, quanto dos seus produtos e ferramentas) em relação ao atendimento dos objetivos propostos, a partir de sua implementação prática em contextos reais;
- **Facilidade de adoção e integração do método proposto aos processos de planejamento e controle da obra:** este constructo está associado à avaliação da adequação da sistemática e dos produtos propostos pelo método, aos fluxos gerenciais e de informações já adotado pelas obras. A facilidade de adoção e integração do método está relacionada, por exemplo, aos pré-requisitos necessários à sua implementação e aos níveis de compreensão e utilização dos elementos proposto pelo método, por parte da equipe gerencial da obra.
- **Generalização do método para outras empresas e contextos:** esse constructo visa avaliar se o método proposto é capaz de ser aplicado em outros tipos de projetos com características distintas.

As fontes de evidência para avaliação do artefato por meio dos constructos foram observação participante, entrevistas estruturadas, fotografias 360°, produtos dos mapeamentos 3D e as comparações do modelo BIM 4D com nuvens de pontos ou fotografias 360° para identificação de desvios do progresso.

As entrevistas foram realizadas de forma presencial em maio e início de junho de 2022. As entrevistas tiveram por objetivo registrar e avaliar a percepção da equipe da obra e gestores da empresa em relação ao método proposto e ao seu processo de implementação na Obra B. Para tal, foram entrevistados membros da equipe gerencial que estiveram ligados ao desenvolvimento do estudo empírico na Obra B ou que atuam na área de planejamento da empresa, conforme caracterizados no Quadro 10.

Quadro 10 – Caracterização da equipe gerencial da empresa construtora entrevistada no segundo estudo empírico

Função/ cargo	Tempo de experiência na construção civil	Código de identificação na entrevista	Data da entrevista
Gerente de SGI e ADM	12 anos	GSA	06/05/2022
Trainee gerencial (engenheiro responsável pela Obra B)	6 anos	TG	20/05/2022
Técnico em planejamento	11 anos	TP	20/05/2022
Coordenadora de planejamento	20 anos	CP	08/06/2022
Analista de custo e planejamento	4 anos	ACP	08/06/2022

Fonte: a autora

Para desenvolvimento das entrevistas foi elaborado um protocolo estruturado, que possui questões organizadas em seções de acordo com os constructos de pesquisa definidos. O protocolo completo de entrevistas para avaliação do método é apresentado no Apêndice 5. Para facilitar as entrevistas, as questões do protocolo de entrevistas foram passadas para o Google Formulários e as respostas dos entrevistados foram registradas pela autora com auxílio dessa ferramenta. As questões se dividem em dois tipos:

- **Questões objetivas qualitativas (escala Likert):** avaliam o grau de impacto em relação às principais variáveis. Nessas questões utilizou-se uma escala de impacto com cinco níveis, com nota de 1 a 5, onde o 1 representava o nível mais baixo e 5 o nível mais alto de acordo com o nível de concordância dado pelos entrevistados a cada pergunta.
- **Questões subjetivas:** para os constructos selecionados, foram elaboradas questões subjetivas para que o entrevistado pudesse se aprofundar melhor em determinados pontos e detalhar as razões das notas atribuídas nas questões objetivas.

O Quadro 11 a seguir apresenta o resumo dos componentes da estrutura analítica completa do trabalho, incluindo constructos, variáveis e fontes de evidência.

Quadro 11 – Constructos e variáveis para avaliação do artefato

Constructo	Variáveis	Fontes de evidência
Potencial de impacto na identificação e avaliação do progresso da obra	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação visual do progresso real da obra com uso de RPA e câmara 360º • Identificação e análise geral de desvios de progresso da obra • Mitigação dos desvios negativos de progresso pelo planeamento e implementação de ações corretivas 	<ul style="list-style-type: none"> • Observação participante • Entrevistas estruturadas • Fotografias 360º e produtos dos mapeamentos 3D • Comparação do modelo BIM 4D com nuvens de pontos ou fotografias 360º para identificação de desvios de progresso
Transparência	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade da comunicação do status do progresso a partir do uso de tecnologias de dados visuais • Simplicidade e rapidez no entendimento das informações relacionadas ao progresso 	<ul style="list-style-type: none"> • Observação participante • Entrevistas estruturadas • Fotografias 360º e produtos dos mapeamentos 3D • Comparação do modelo BIM 4D com nuvens de pontos ou fotografias 360º para identificação de desvios de progresso
Utilidade do método proposto	<ul style="list-style-type: none"> • Importância das atividades e produtos do método para um monitoramento efetivo do progresso • Adequação das atividades e produtos do método às necessidades do monitoramento do progresso • Benefícios e dificuldades associados à implementação do método 	<ul style="list-style-type: none"> • Observação participante • Entrevistas estruturadas
Facilidade de adoção e integração do método proposto aos processos de planeamento e controle da obra	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidade de aplicação dos produtos do método na obra estudada • Facilidade de integração entre os processos gerenciais da empresa e as atividades do método 	<ul style="list-style-type: none"> • Observação participante • Entrevistas estruturadas
Generalização	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptação do método e das ferramentas propostas a obras de outras empresas e de outras tipologias 	<ul style="list-style-type: none"> • Observação participante • Entrevistas estruturadas

Fonte: a autora

3.7 ETAPA DE CONCLUSÃO – FORMATAÇÃO FINAL DO MÉTODO

A última etapa da pesquisa contempla a formalização da estrutura final do método proposto (artefato de pesquisa), definida após as implementações, avaliações e refinamentos durante os estudos empíricos, bem como desenvolvimento de um

conjunto de recomendações e protocolo para sua implementação. Faz parte também da etapa de conclusão a reflexão acerca dos resultados culminando nas contribuições teóricas e práticas da pesquisa.

4 APRESENTAÇÃO E DICUSSÃO DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a realização das fases de conscientização, sugestão, desenvolvimento e avaliação do artefato. Os resultados obtidos incluem recomendações para coleta e processamento de fotografias 360° internas da obra, proposta preliminar do método para monitoramento do progresso de obras com uso de BIM, RPA e câmera 360°, resultados da implementação do método e avaliação da sua implementação com base nos constructos de pesquisa. Ao final desta seção, é apresentada a estrutura final do método com recomendações e um protocolo para sua implementação. Por fim, é realizada a discussão dos resultados obtidos.

4.1 PROTOCOLO PARA COLETA E PROCESSAMENTO DE FOTOGRAFIAS 360° DE AMBIENTES INTERNOS DA OBRA

Nesta seção são apresentados os requisitos práticos mais relevantes, levantados a partir dos testes de ferramentas e processos preparatórios à elaboração e implementação do método realizados na Obra A.

4.1.1 Coleta de fotografias 360° de ambientes internos da obra

Foram realizados testes para a coleta de fotografias 360° internas da obra, tanto para fins de posterior processamento dessas imagens visando a geração do modelo 3D texturizado, como também visando a utilização das próprias fotografias como forma de representação do estado atual, como será mostrado a seguir.

4.1.1.1 Coleta de fotografias 360° visando a geração de modelos 3D texturizados de ambientes internos

A utilização da câmera 360° acoplada ao capacete de segurança possibilitou uma série de benefícios em comparação com a sua utilização no tripé. A câmera 360° utilizada no capacete reduz o tempo de coleta das imagens, uma vez que para isso é necessário apenas que uma pessoa caminhe pelo ambiente, enquanto as capturas podem ser realizadas automaticamente. A maior rapidez da coleta leva a um melhor aproveitamento da bateria da câmera e, conseqüentemente, possibilita o registro de mais ambientes da obra.

De modo geral, observou-se que as superfícies encontradas nos ambientes internos da obra estudada, tais como, paredes, pisos e tetos possuem uma textura lisa que não é a ideal para a reconstrução fotogramétrica pelo software Metashape.

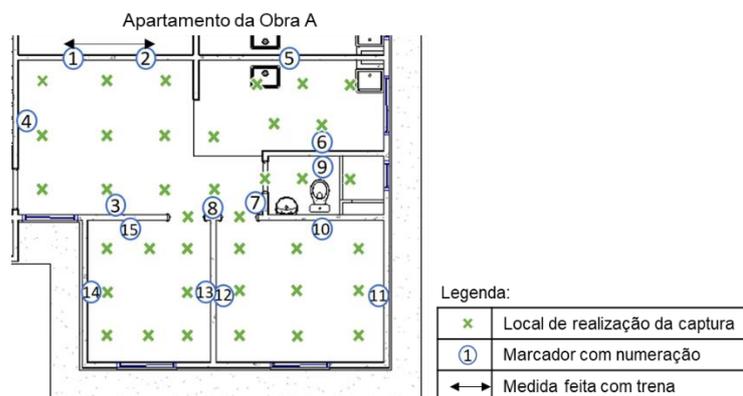
Devido a isso, a utilização de marcadores nos ambientes se mostrou uma das práticas mais importantes durante a coleta das fotografias internas da obra, facilitando o posterior alinhamento das imagens pelo software.

O Metashape suporta quatro tipos de marcadores circulares codificados. Enquanto o padrão de 12 bits (utilizado do estudo) é decodificado com mais precisão, os padrões de 14 bits, 16 bits e 20 bits permitem que um número maior de marcadores seja utilizado em um mesmo projeto. Quanto maior o ambiente a ser mapeado, maior deve ser o tamanho dos marcadores, caso contrário, poderá acarretar na não identificação automática pelo software na fase de processamento das imagens. Nos estudos realizados, em apartamentos com área variando entre 46,29 m² e 58,41 m², o uso de marcadores circulares com 15 mm de raio central se mostrou o ideal.

Recomenda-se a colocação de marcadores centralizados nas paredes do ambiente, de preferência na altura do capacete e de modo que possam ser vistos em diferentes pontos de captura. Os marcadores podem ser impressos em folhas de papel sulfite comum, e podem ser reutilizados, desde que estejam em estado íntegro. Após a colocação de marcadores no ambiente, a medição de uma distância entre eles é importante para estabelecer uma escala correta na geração da nuvem de pontos e produtos fotogramétricos derivados. O tempo médio de setup (tempo necessário para a preparação da coleta no local) obtido foi de 7 minutos e 30 segundos.

Com os testes realizados no primeiro estudo empírico, observou-se que, para uma sobreposição adequada entre as fotografias 360°, a distância entre um ponto de captura e outro não deve ultrapassar 2 metros. Além disso, para conectar dois ambientes dentro de um mesmo apartamento, como por exemplo, uma sala e um quarto, recomenda-se a realização de capturas nos vãos de portas entre os ambientes. Deve-se evitar, sempre que possível, a realização de capturas em locais onde o sol incide diretamente, como de frente para janelas, por exemplo, pois resultam em fotografias com uma condição de iluminação diferente das demais. A Figura 38 a seguir apresenta o plano utilizado para a realização das capturas na obra A.

Figura 38 – Plano de captura para o apartamento da obra A



Fonte: a autora

Embora o modo de captura em HDR seja o recomendado pelo fabricante da câmera 360° para fotografias realizadas em ambientes internos, na prática não se observou uma diferença significativa na qualidade das fotografias coletadas em modo HDR e em modo automático. Devido a isso, a realização de capturas no modo automático a cada 5 segundos pode ser mais vantajosa para a câmera utilizada, pois provou ser mais rápida e menos manual em comparação com o modo HDR. Dessa forma, utilizando o modo de captura automática, a média do tempo de coleta obtida foi de 4 minutos e 10 segundos.

Uma das dificuldades encontradas para a coleta de fotografias 360° para fins de processamento fotogramétrico esteve relacionada com a necessidade do ambiente se apresentar estável, ou seja, sem alterações físicas no momento da coleta. Isso significa que se deve evitar locais com movimentação de pessoas ou equipamentos, uma vez que estas condições afetam o reconhecimento de feições homólogas entre as imagens durante o processamento. Esta necessidade implica, portanto, na escolha apenas de locais com pouco ou nenhum serviço sendo executado no momento da coleta, o que restringe a quantidade de ambientes que podem ser mapeados.

4.1.1.2 Coleta de fotografias 360° visando a sua utilização como forma de representação do estado atual de ambientes internos

Uma outra forma de representação e documentação do estado atual de ambientes internos consiste na utilização das próprias fotografias 360° coletadas, sem a realização do processamento fotogramétrico para geração do modelo 3D texturizado. Deve-se ressaltar que para uma melhor utilização das fotografias 360°

coletadas é preciso garantir a sua visualização em formato imersivo, sendo necessário para tanto a utilização de um visualizador compatível com esse tipo de imagem.

Para otimizar o uso da bateria da câmera e possibilitar a captura do maior número de espaços possível, recomenda-se a coleta de imagens em um apartamento por andar, além da captura no hall de cada pavimento. Para evitar a coleta de imagens em excesso, o que posteriormente irá demandar um grande espaço de armazenamento, pode-se priorizar a coleta nos cômodos onde é possível monitorar uma maior variedade de serviços. Como exemplo, nas obras visitadas os serviços realizados nas salas e quartos eram praticamente os mesmos (contrapiso, chapisco, reboco, pintura etc.), necessitando da realização da coleta em apenas um desses cômodos para verificação do status dessas atividades.

Para a realização da coleta das imagens, a pessoa que porta a câmera deve se posicionar preferencialmente no centro do cômodo e realizar a captura. Neste caso, pode se utilizar o modo HDR recomendado pelo fabricante, pois o tempo de coleta por apartamento é reduzido, sendo em média de 2 minutos e 19 segundos, incluindo o tempo de preparo.

4.1.2 Processamento fotogramétrico de fotografias 360° de ambientes internos da obra

Ao longo dos testes realizados, observou-se que um dos desafios para o processamento de fotografias internas da obra está na textura lisa e repetitiva das superfícies encontradas, principalmente no interior de apartamentos que já possuíam pintura e revestimentos de pisos e paredes. Para estes casos em que os ambientes estão em fase de acabamentos, as nuvens de pontos geradas não obtiveram um resultado satisfatório, pois apresentaram diversas áreas com falhas de reconstrução, principalmente na região central das paredes e pisos. Nos casos em que os revestimentos internos ainda não haviam sido executados, a utilização de marcadores nos ambientes ajudou ao software a alinhar corretamente as imagens, resultando na geração de nuvens de pontos de melhor qualidade para o propósito do estudo.

Uma das diferenças entre o processamento das fotografias 360° no Metashape e o processamento das fotografias coletadas através de RPA está na necessidade de especificação do tipo de câmera utilizada, que neste caso é câmera esférica com projeção equirretangular. Além disso, antes de se realizar a primeira etapa do

processamento, que consiste no alinhamento das imagens, é necessário que o software realize a identificação automática dos marcadores nas imagens, e que uma máscara seja aplicada em regiões das fotografias que não se deseja incluir no processamento, como a região do tripé ou do capacete. A utilização do recurso da máscara é necessária, pois evita a presença destes objetos na reconstrução final dos ambientes, e embora seja uma etapa manual, a remoção dessas regiões nas imagens reduz o tempo de processamento. A Figura 39 a seguir mostra uma fotografia no Metashape com os marcadores identificados e a máscara aplicada.

Figura 39 – Fotografia em formato equirretangular no Metashape com máscara aplicada na região do capacete e marcadores automaticamente identificados pelo software



Fonte: a autora

Um outro aspecto que precisa ser considerado no processamento de fotografias obtidas com a câmera 360° está relacionado à escala da nuvem de pontos gerada. Diferentemente das imagens coletadas com RPA que são georreferenciadas, as fotografias 360° não possuem informação das coordenadas do local. Embora a câmera 360° possa utilizar o GPS do celular que contém o aplicativo, essa utilidade é limitada em ambientes internos. Devido a isso, no processamento das imagens é necessário que se especifique uma distância conhecida que será utilizada pelo software como referência para que a nuvem de pontos tenha suas dimensões na escala correta.

Após a detecção automática dos marcadores nas imagens e aplicação de máscaras, é realizado o processamento automático das fotografias coletadas. O primeiro produto obtido através dessa etapa consiste na nuvem de pontos esparsa,

gerada após o processo de alinhamento das imagens, no qual se calcula a posição da câmera no momento da captura. Com base em tais parâmetros calculados e na técnica de *dense stereo matching* utilizada pelo Metashape, são gerados mapas de profundidade que dão origem à nuvem de pontos densa. Em seguida, com base nas informações da nuvem de pontos densa, pode-se gerar uma malha poligonal de superfície, que por fim recebe uma textura, originando o modelo 3D texturizado.

O número de pontos da nuvem de pontos é um dos parâmetros fundamentais para a determinação do seu nível de visibilidade. Quanto mais densa a nuvem de pontos, mais completa e clara será a representação da superfície mapeada e, por consequência, maior o seu nível de visibilidade (ÁLVARES, 2019). Uma nuvem de pontos mais densa e com um nível maior de qualidade também tende a gerar um modelo 3D texturizado mais detalhado. Dentre os fatores que influenciam na densidade da nuvem de pontos estão a quantidade de fotografias utilizadas, o nível de sobreposição entre elas, a textura das superfícies mapeadas e o nível de qualidade definido para o processamento. Quanto maior o nível da qualidade de reconstrução, maior a densidade do modelo gerado, porém também será maior o tempo necessário para processamento. O Quadro 12 a seguir apresenta os dados relativos às nuvens de pontos e modelos 3D texturizados gerados para um único apartamento das obras A e B.

Quadro 12 - Dados da reconstrução 3D fotogramétrica para um único apartamento das obras A e B

Obra	Nuvem de pontos densa		Modelo 3D texturizado		Média do tempo total de processamento
	Qualidade	Média do nº de pontos	Média do nº de vértices	Média do nº de faces	
A	Média	1.481.710	148.104	296.112	00:37:56
B	Média	4.229.318	413.112	822.057	01:05:00

Fonte: a autora

A Figura 40 a seguir mostra a diferença entre a nuvem de pontos e o modelo 3D texturizado para um apartamento da Obra A. Observa-se que, para ambientes internos, o modelo 3D texturizado proporciona uma melhor visualização do local em comparação com a nuvem de pontos, sendo possível identificar detalhes como tubulações das instalações hidrossanitárias, pontos das instalações elétricas, contramarcos das esquadrias e o tratamento realizado nas paredes de concreto. Apesar do potencial de visualização, o tempo de processamento alcançado para um

único apartamento é considerado alto para o propósito do estudo, de modo que pode inviabilizar a realização do monitoramento do progresso em tempo hábil para uma quantidade maior de unidades.

Figura 40 – Visualização no ambiente do Metashape de (a) nuvem de pontos interna da Obra A, e (b) modelo 3D texturizado do mesmo local



Fonte: a autora

A título de comparação, o Quadro 13 a seguir apresenta os dados relativos ao processamento das nuvens de pontos e modelos 3D texturizados da área externa das obras A e B, enquanto a Figura 41 mostra a diferença entre esses dois produtos para a Obra A.

Quadro 13 - Dados da reconstrução 3D fotogramétrica para a área externa das obras A e B

Obra	Nuvem de pontos densa		Modelo 3D texturizado		Média do tempo total de processamento
	Qualidade	Média do nº de pontos	Média do nº de vértices	Média do nº de faces	
A	Média	18.701.565	1657153	3307005	09:17:45
B	Média	4.160.846	419.665	832.088	03:36:02

Fonte: a autora

Figura 41 – Visualização no ambiente do Metashape de (a) nuvem de pontos externa da Obra A, e (b) modelo 3D texturizado do mesmo local



Fonte: a autora

4.1.3 Integração de dados visuais do estado atual da obra ao modelo BIM 4D para identificação e visualização do progresso

4.1.3.1 Modelo 3D texturizado

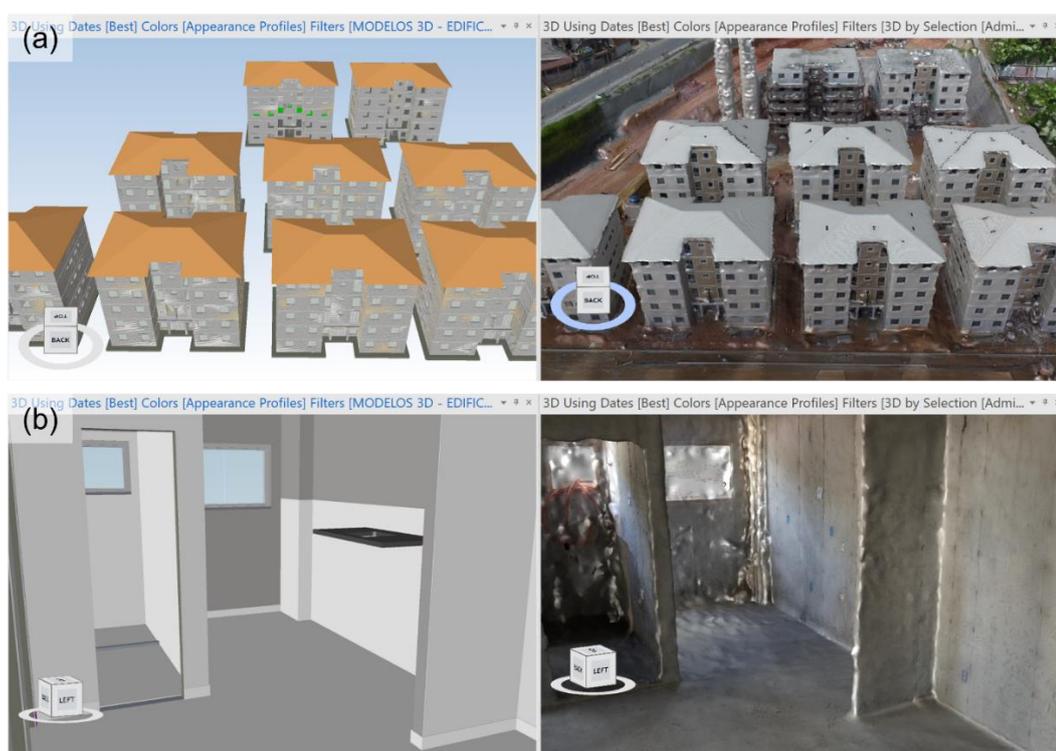
Visando a utilização do modelo 3D texturizado e do modelo BIM 4D como ferramentas para comparação visual do progresso real e progresso planejado da obra, a partir da utilização de softwares comerciais, de fácil acesso e amplamente difundidos no mercado, no presente trabalho foi estruturado um procedimento para sobreposição e uso desses modelos em simulação 4D, no software Synchro Pro.

No presente estudo, a nuvem de pontos não foi utilizada como representação do estado atual da obra devido a incompatibilidades com o Synchro. Em substituição, utilizou-se o modelo 3D texturizado obtido a partir da nuvem de pontos. Para sobreposição e alinhamento dos modelos, o modelo 3D fotogramétrico é exportado do Metashape para o formato .obj, sendo então importado para o arquivo do modelo

BIM 4D no Synchro. A sobreposição dos modelos foi realizada manualmente com auxílio de ferramentas do Synchro para translação e rotação de objetos 3D.

No Synchro é possível obter uma visualização tanto dos dois modelos sobrepostos como também uma visualização dos modelos lado a lado em duas janelas. Para o modelo 3D texturizado, que possui superfícies com cores sólidas, a visualização lado a lado proporcionou um melhor entendimento das diferenças entre os dois modelos, como mostra a Figura 42.

Figura 42 – Exemplo de visualização no Synchro do modelo BIM 4D ao lado do modelo 3D texturizado (a) da área externa da obra e (b) internamente em um dos apartamentos



Fonte: a autora

A partir da simulação 4D com os modelos lado a lado, é possível a identificação visual pelo usuário de atividades externas e internas que estão de acordo com o planejamento e dos desvios de progresso (atividades atrasadas ou adiantadas). Nessa simulação 4D, as atividades em conformidade são visualmente identificadas em ambos os modelos (modelo texturizado e BIM), aquelas atrasadas são visualizadas apenas no modelo BIM, e as adiantadas somente visualizadas no modelo texturizado. No entanto, é possível observar uma perda de qualidade significativa do modelo 3D texturizado interno importado no Synchro, impactando na visualização de

detalhes do ambiente. Apesar disso, não se conseguiu identificar nesse estudo as causas para este fato.

Testes realizados no software Navisworks da Autodesk mostraram que neste software é possível utilizar tanto o modelo 3D texturizado (em formato fbx, por exemplo) como também as nuvens de pontos em formato rcp. A diferença é que o Navisworks não permite a visualização lado a lado entre os estados planejado e executado da obra, como pôde ser feito no Synchro. Dessa forma, a utilização de nuvens de pontos ou modelos 3D texturizados no Navisworks requer que estes produtos sejam visualizados sobrepostos ao modelo BIM 4D.

4.1.3.2 Fotografias 360°

O teste para realização da integração entre as fotografias 360° e o modelo BIM 4D foi realizado no software Navisworks utilizando dados do estudo empírico na Obra B. A escolha pelo Navisworks se deu pelo fato de a Obra B não estar utilizando o Synchro e pela maior familiaridade da equipe envolvida no estudo com o Navisworks.

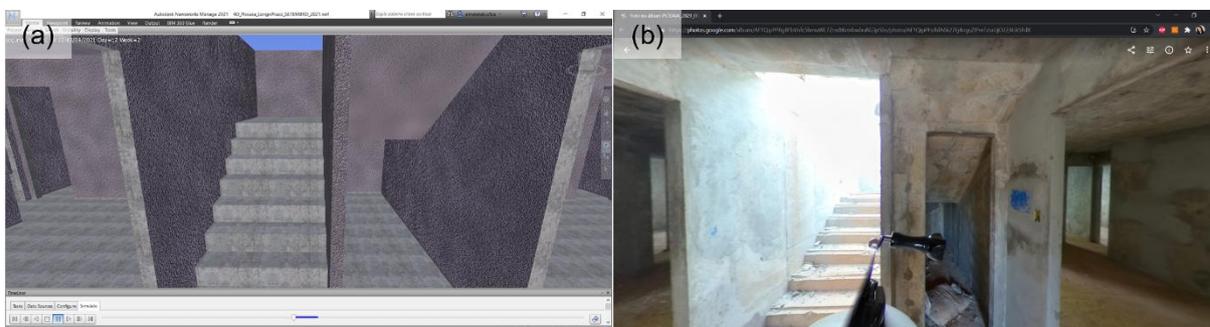
Através dos testes realizados, verificou-se que o Navisworks não possui uma funcionalidade que permita importar fotografias 360° visando a sua utilização dentro da própria plataforma. Devido a isso, uma solução encontrada foi a realização de um link entre o Navisworks e uma plataforma de armazenamento de arquivos em nuvem que permita a visualização imersiva de fotografias 360°. Para esse estudo, a plataforma de armazenamento testada foi o Google Photos, devido a sua facilidade de uso e possibilidade de uso gratuito para alunos da UFBA.

Dessa forma, para a realização do link, primeiramente é necessário encontrar uma pose estimada da câmera no modelo, ou seja, encontrar no modelo a posição aproximada em que a foto foi tirada na obra. Essa etapa pode ser realizada de forma manual, navegando pelo modelo até encontrar a posição mais parecida com aquela da foto, ou de uma forma mais automatizada, caso se tenha os dados da pose da câmera no mesmo sistema de coordenadas do modelo BIM. Nos testes realizados a pose da câmera foi estimada de forma manual e o ponto de vista encontrado foi salvo no Navisworks como uma *viewpoint*.

Para cada *viewpoint* salva foi criado um link para a fotografia 360° do mesmo local armazenada em nuvem. Desse modo, o usuário pode clicar no link e visualizar as diferenças entre o estado planejado e executado da obra em duas janelas: uma

com o estado planejado representado no modelo BIM 4D, e a outra com o estado real da obra, visualizado na fotografia 360°, como mostra a Figura 43 a seguir.

Figura 43 – Visualização em duas janelas (a) do estado planejado da obra no modelo BIM 4D, e (b) do estado real na fotografia 360°



Fonte: a autora

Dessa forma, após a realização dos testes para coleta, processamento e integração de dados visuais obtidos com câmera 360° ao modelo BIM 4D, os seguintes pontos foram observados:

- a) O modelo 3D texturizado gerado a partir das fotografias 360° proporciona a representação do estado atual de um ambiente interno da obra na forma de um modelo tridimensional. Este modelo pode ser exportado para diversos formatos compatíveis com os softwares BIM 4D testados. Uma vez integrado ao modelo BIM 4D, é possível associar o modelo 3D texturizado a uma data específica, visualizá-lo em conjunto com o modelo do estado planejado, realizar medições etc. No entanto, a baixa qualidade de visualização desse modelo fotogramétrico após ser importado para a plataforma BIM 4D e a quantidade de etapas necessárias, desde o planejamento da coleta até o resultado do processamento, dificultam a utilização desse produto para fins de monitoramento do progresso de ambientes internos.
- b) As fotografias 360° possuem valor agregado de forma intrínseca, mesmo sem a realização de processamentos adicionais. A sua coleta em campo é simples e proporciona uma visualização detalhada e em boa qualidade do local da captura em 360 graus. Como desvantagens, a aquisição de um grande número de fotografias, especialmente em canteiros de obras grandes, representa um desafio para o gerenciamento desses dados. Além disso, a impossibilidade da sua integração direta aos softwares BIM 4D, a menos que se utilize uma solução comercial paga, pode ser um empecilho para a comunicação e documentação do progresso de forma mais eficiente.

Analisando as ponderações feitas acima, optou-se por utilizar na proposta preliminar do método (apresentada na próxima seção) as próprias fotografias 360° coletadas para visualização do estado atual de ambientes internos da obra, por apresentarem melhor custo-benefício para o objetivo do estudo. O Quadro 14 a seguir apresenta um resumo das diferenças observadas relacionadas à utilização do modelo 3D texturizado e das fotografias 360° como dados visuais do estado atual da obra.

Quadro 14 – Principais diferenças observadas com relação à utilização do modelo 3D texturizado e das fotografias 360° para representação do estado atual de ambientes internos da obra

Características	Modelo 3D texturizado/ nuvem de pontos	Fotografias 360°
Maior facilidade na aquisição dos dados em campo		X
Representação do estado atual da obra na forma de um modelo 3D	X	
Visualização detalhada do ambiente		X
Menos etapas de processamento após a coleta		X
Maior facilidade de integração aos softwares de modelagem BIM 4D	X	

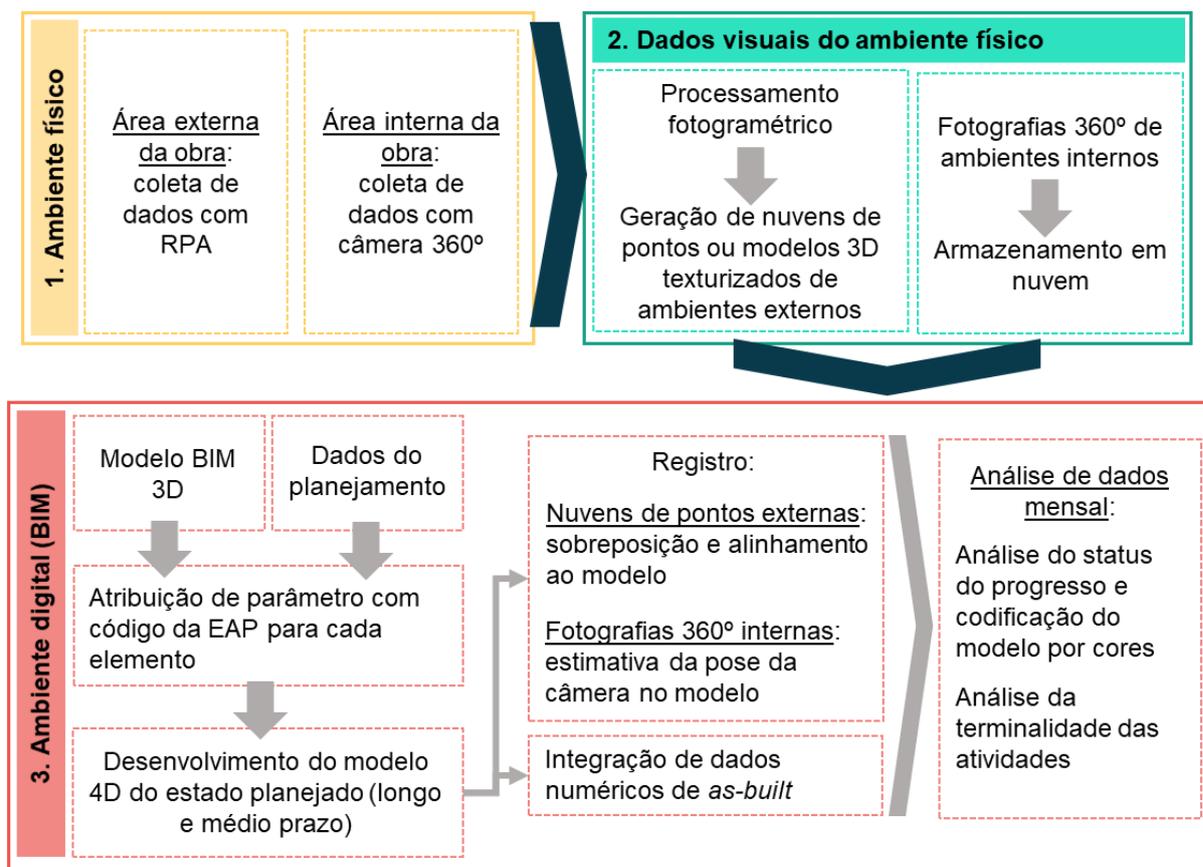
Fonte: a autora

4.2 PROPOSTA PRELIMINAR DE MÉTODO PARA MONITORAMENTO VISUAL DO PROGRESSO DE OBRAS COM USO DE BIM, RPA E CÂMERA 360°

A proposta de método desenvolvido tem por objetivo principal sistematizar o uso dos dados visuais coletados por RPA, câmera 360° e BIM 4D, de modo a complementar outros dados não visuais já adquiridos nos processos de planejamento e controle da produção. A proposta do método foi desenvolvida levando em consideração os testes realizados na Obra A, através dos quais foi possível estabelecer os procedimentos para coleta de dados, os tipos de representação do estado atual da obra mais adequados para cada ambiente, as informações possíveis de serem obtidas através das tecnologias propostas, dentre outros aspectos.

Dessa forma, a proposta do método inclui uma sistemática com procedimentos de preparação, coleta, processamento, análise de dados e tomada de decisão em relação ao avanço da obra e possíveis desvios de progresso. A Figura 44 apresenta o esquema do método proposto, com a explicação de cada um dos seus passos sendo realizada em seguida.

Figura 44 – Representação esquemática do método proposto



Fonte: a autora

A primeira etapa para a realização do monitoramento do progresso da obra com uso das tecnologias propostas constitui a coleta de dados do ambiente físico. Para isso, propõe-se a utilização de RPA para o registro de imagens aéreas externas da obra e o uso de câmera 360° para a coleta de fotografias 360° dos ambientes internos. A coleta de dados com a câmera 360° pode ser realizada no hall de cada pavimento e em um apartamento por andar de cada edifício. No interior dos apartamentos os cômodos em que se prioriza a coleta de dados são sala, cozinha e banheiro, pois são os locais onde se concentram a maior parte dos serviços. O cadastro dos dados coletados é realizado em campo com o auxílio das tabelas presentes no Apêndice 3.

Após a coleta de dados, utiliza-se as fotografias aéreas coletadas da área externa para o processamento fotogramétrico com a geração da nuvem de pontos ou do modelo 3D texturizado da obra, dependendo do software no qual será desenvolvido o modelo BIM 4D. Para o segundo estudo empírico desenvolvido será utilizado o Navisworks, portanto, a nuvem de pontos será o produto utilizado para representação do *as-built* da área externa da obra. Caso fosse utilizado o Synchro como a plataforma

de desenvolvimento de modelos BIM 4D, seria necessário usar o modelo 3D texturizado.

Já as fotografias 360° de ambientes internos serão, primeiramente, costuradas e exportadas para o formato jpg utilizando o software da câmera para desktop. Em seguida, essas imagens serão organizadas e armazenadas em uma plataforma em nuvem que permita a visualização imersiva das fotografias 360° para posterior integração ao modelo digital.

No ambiente digital propõe-se a integração do modelo BIM do estado planejado aos dados visuais coletados, processados e armazenados nas etapas anteriores, podendo incluir também dados não visuais de *as-built* gerados ao longo dos processos de controle da produção. Para isso, inicialmente utiliza-se os dados do planejamento de longo prazo da obra para atribuir aos elementos do modelo BIM 3D um parâmetro com o código correspondente à sua atividade no planejamento. A partir disso, desenvolve-se o modelo 4D do estado planejado, integrando, de forma automática, os elementos do modelo às suas respectivas atividades no longo prazo. Em seguida, será desenvolvido também o modelo 4D do médio prazo para o acompanhamento do progresso das atividades do mês.

A integração dos dados visuais do estado atual da obra no modelo 4D desenvolvido é realizada na etapa de registro. Para isso, é realizada a sobreposição e alinhamento manual da nuvem de pontos externa ao modelo 4D, enquanto para as fotografias 360° internas é feita a estimativa da pose da câmera, com a geração de um link para visualização da fotografia armazenada em nuvem. Além dos dados visuais, serão utilizados também dados relativos às datas reais de início e término das atividades planejadas, obtidos pela equipe de produção da obra.

Com a integração de tais dados ao modelo BIM 4D, será possível documentar e verificar o real status das atividades, comparando os dados visuais com as informações acerca do *as-built* produzidas pela obra. Pretende-se, dessa forma, realizar a análise mensal não somente do progresso, como também da terminalidade das atividades da obra, identificando se pacotes de trabalho tidos como executados realmente preenchem os requisitos para a obtenção desse status.

Para apresentação dos resultados das simulações 4D com a identificação visual do progresso e da terminalidade das atividades, propõe-se a formatação e

disponibilização online de um relatório visual em formato de dashboard digital, com uso da plataforma sugerida Power BI da Microsoft. A ferramenta Power BI funciona como uma plataforma web para elaboração de painéis de dados virtuais customizáveis (com formato de dashboard), sendo capaz de conectar diferentes tipos de dados, gerados e armazenados a partir de diferentes softwares ou ferramentas digitais (MICROSOFT, 2021).

De maneira complementar às informações da Figura 44, é apresentado no Quadro 15 a seguir, as principais ferramentas sugeridas para apoio à implementação do método, incluindo softwares, aplicativos móveis, RPA e câmera 360° utilizados e outras ferramentas digitais.

Quadro 15 – Ferramentas sugeridas para apoio à implementação do método

Ferramenta	Função no método proposto	Fonte para uso no estudo
Autodesk Revit 	Utilizado para o desenvolvimento dos projetos em BIM	Licença educacional da Autodesk
Autodesk Navisworks 	Utilizado para modelagem 4D conforme o planejamento de médio prazo da obra, registro de nuvens de pontos e fotografias 360° e codificação do progresso por cores	Licença educacional da Autodesk
Microsoft Power BI 	Usado para divulgação dos gráficos com os resultados obtidos	Versão gratuita do Microsoft Power BI Desktop
RPA DJI Phantom 4 	Uso para voos com a coleta de imagens aéreas georreferenciadas da obra	Equipamentos adquiridos por projeto de pesquisa
Aplicativos Pix4D Capture e DJI Go 4 	Uso para controle manual (DJI Go) ou automático (Pix 4D Capture) da RPA	Aplicativos gratuitos disponíveis na Apple Store ou Play Store
Agisoft Metashape 	Uso para mapeamentos 3D do canteiro, com geração de nuvem de pontos e modelos 3D texturizados	Licença adquirida por projeto de pesquisa
Câmera Insta360 One X 	Uso acoplado no capacete de segurança para coleta de fotografias 360° de ambientes internos da obra	Equipamentos adquiridos por projeto de pesquisa

Ferramenta	Função no método proposto	Fonte para uso no estudo
Aplicativo Insta360 One X 	Permite a configuração do modo de captura desejado, visualização e armazenamento das fotografias 360° coletadas	Aplicativo gratuito disponível na Apple Store ou Play Store
Insta360 Studio 2021 	Realiza a conversão das fotografias 360° coletadas para sua qualidade final no formato .jpg em desktop	Software gratuito
Google Drive 	Utilizado para armazenar as fotografias 360° coletadas, possibilitando a criação de um link para as fotografias no Navisworks	Armazenamento gratuito utilizando conta de email UFBA

Fonte: a autora

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO NA OBRA B

Nesta seção serão apresentados os resultados da implementação do método proposto no estudo empírico na Obra B. Para a implementação do método proposto foi necessário adaptar sua proposta, ajustando os processos e produtos do método ao nível de intervenção possibilitado ao estudo. Nesse sentido, ressalta-se que a implementação do método proposto no estudo foi realizada com poucas intervenções nos processos gerenciais da obra, tendo a autora atuado de forma mais observacional.

4.3.1 Coleta de dados visuais do ambiente físico

A coleta de dados do ambiente físico foi realizada conforme descrito na proposta preliminar do método, geralmente com a frequência de uma visita para coleta de dados a cada quinze dias. Apenas nos dois últimos meses de implementação do método optou-se por realizar visitas semanais à obra visando coletar mais informações necessárias para finalização do estudo.

No período em que o estudo foi realizado, a Obra B possuía um ritmo de concretagem de, em média, um pavimento a cada 15 dias. Para o ritmo de execução das atividades nessa obra, a coleta de dados em uma frequência quinzenal a semanal para monitoramento do progresso através do método proposto foi considerada adequada. Como mostra o Quadro 16 a seguir, os voos com RPA para coleta de fotografias externas tiveram uma duração média de 14 minutos na obra estudada, o que contribuiu para a praticidade e rapidez da coleta.

Quadro 16 – Dados relativos à coleta de fotografias externas com RPA no segundo estudo empírico

Equipamento	Média do número de fotos por visita	Média do tempo de coleta por visita
RPA	168	14 minutos

Fonte: a autora

A coleta de fotografias com a câmera 360° foi realizada no hall de cada pavimento dos edifícios em construção, e em um apartamento por pavimento, escolhido de forma aleatória. Dessa forma, além do hall, no interior dos apartamentos foram coletadas fotografias na sala, cozinha e banheiro, totalizando uma média de 4 fotografias 360° por pavimento. A média obtida do tempo de coleta por pavimento foi de 1 minuto e 17 segundos, como mostra o Quadro 17 a seguir. Para que posteriormente fosse possível separar as fotografias 360° de acordo com o local em que foram coletadas (ou seja, o seu edifício, pavimento e apartamento) foi realizado o registro do horário em que a coleta começou e terminou em cada um desses locais.

Quadro 17 – Dados relativos à coleta de fotografias internas com câmera 360° no segundo estudo empírico

Equipamento	Média do número de fotos	Média do tempo de coleta por pavimento	Média do tempo total de coleta no último mês do estudo *
Câmera 360°	4 por pavimento	1 min e 17 seg	34 minutos

*Nota: mês de fevereiro de 2022, no qual existiam 6 edifícios em construção na Obra B.

Fonte: a autora

No período em que se realizou o estudo, o número máximo de edifícios em construção na Obra B foi de 6 edifícios, situação encontrada em fevereiro de 2022. Vale ressaltar que a Obra B compreende a construção de 13 edifícios no total, mas isso não necessariamente significa que nos meses finais da obra a coleta de fotografias internas seria realizada nos 13 edifícios. Isso porque em obras que possuem pequenos lotes de produção é possível que alguns edifícios tenham a sua execução finalizada antes mesmo do prazo limite para a conclusão total da obra.

4.3.2 Processamento de dados visuais do ambiente físico

O processamento das fotografias externas da obra coletadas por RPA foi realizado conforme descrito na proposta do método. A Figura 45 a seguir mostra a evolução externa da obra, representada através das nuvens de pontos, ao longo dos meses em que o segundo estudo empírico foi realizado. É possível observar nas nuvens de pontos os avanços nas atividades de execução das fundações em radier,

concretagem de paredes e lajes, realização de tratamento e reboco externo, execução da textura nas fachadas e execução do madeiramento e telhamento das coberturas.

Figura 45 – Nuvens de pontos da Obra B ao longo dos meses em que o segundo estudo empírico foi realizado



Fonte: a autora

Com relação às fotografias 360° internas, estas foram primeiramente separadas de acordo com o local (edifício, pavimento e apartamento) em que foram coletadas, o que foi possível analisando-se o horário das capturas. Em seguida, foram armazenadas e organizadas em nuvem utilizando-se a plataforma Google Fotos, na qual é possível visualizar esse tipo de imagem de forma imersiva. Foram utilizados cerca de 6,83 GB dessa plataforma para armazenamento das fotografias 360° coletadas.

A Figura 46 a seguir mostra, através de um enquadramento das fotografias 360°, a evolução interna da obra nos apartamentos do segundo pavimento do Bloco 18 (um dos edifícios mais avançados da Obra B). Através das fotografias 360° é possível observar os avanços nas atividades de tratamento interno, reenquadramento de vãos, chapisco, reboco de gesso e início da execução de revestimentos cerâmicos.

Figura 46 – Fotografias 360° dos apartamentos do 2º pavimento do Bloco 18 ao longo dos meses na Obra B



Fonte: a autora

4.3.3 Integração dos dados no ambiente digital

No ambiente digital foi realizada a integração do modelo BIM do estado planejado aos dados visuais coletados, processados e armazenados nas etapas anteriores. Para isso, no software Navisworks foi desenvolvido o modelo BIM 4D a partir do planejamento de longo prazo da obra oferecido pela construtora, como descrito na proposta do método. Assim, para cada coleta de dados quinzenal na obra

foram realizadas comparações visuais com uso da nuvem de pontos sobreposta ao modelo 4D e um código de cores para indicar o status do progresso externo.

Com relação à análise do progresso de atividades internas, para cada local em que as fotografias 360° foram coletadas foi criado um link no modelo BIM 4D para acesso às fotografias, assim como descrito na proposta do método. Assim, com o decorrer do estudo foi possível criar diversos links, de modo a permitir que o usuário tenha a opção de visualizar fotografias 360° de um mesmo ambiente em diferentes estágios da execução da obra.

Como exemplo, a Figura 47a a seguir mostra o estado planejado no modelo BIM 4D para o dia 27/01/2022 do hall de um dos edifícios do estudo. Neste local do modelo foram inseridos links para fotografias 360° coletadas em 5 diferentes datas: 17/11/2021, 06/12/2021, 20/01/2022, 27/01/2022 e 17/02/2022. Na Figura 47b é possível visualizar a fotografia 360° deste local no dia 27/01/2022. Identifica-se, através da comparação visual, o atraso em atividades como revestimento cerâmico, textura acrílica interna e instalação de esquadrias. Segundo o código de cores adotado, essas atividades apareceriam na simulação em vermelho. No entanto, para facilitar a visualização, nos últimos meses do estudo optou-se por dispensar o uso do código de cores, uma vez que uma quantidade significativa das atividades se encontrava atrasada.

Figura 47 – (a) Hall de um dos edifícios da obra no modelo BIM 4D; (b) Fotografia 360° do mesmo local



Fonte: a autora

Embora no método proposto na seção 4.2 tenha sido previsto a integração de dados não visuais gerados pelo sistema de PCP da Obra B, tais como datas reais de início e término das atividades e a indicação do status para cada atividade (atrasada, adiantada ou atividade futura), não se conseguiu realizar essa etapa no segundo estudo empírico. Isso ocorreu devido ao fato de a empresa realizar o processo de geração das datas reais de início de término das atividades de forma automática no MS Project, ou seja, considerando que as datas reais de início e término para todas as atividades finalizadas eram iguais às datas planejadas, o que não ocorria na prática. Além disso, constatou-se que a frequência de atualização desses dados por parte da empresa não era compatível com as necessidades do estudo, dificultando assim o seu uso.

A etapa de realização da análise da terminalidade das atividades no segundo estudo empírico ocorreu ao longo dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Durante esses três meses foram encontrados no total 33 problemas de falta de terminalidade associados principalmente às paredes e lajes de concreto e ao reboco de gesso. Embora no sistema construtivo de paredes de concreto as instalações possam ser executadas embutidas, o problema mais observado foi a quebra de paredes e lajes para execução de instalações elétricas e hidrossanitárias, como mostra o Quadro 18 a seguir. Observou-se que os locais em que os rasgos no concreto estavam sendo feitos eram os mesmos ao longo dos pavimentos, o que sugere um problema recorrente com a montagem dessas instalações.

Quadro 18 – Problemas identificados nas imagens da câmera 360º que impactam na falta de terminalidade das atividades

Descrição da falta de terminalidade	Principais atividades impactadas	Quantidade de vezes que foi identificado	Exemplo
Faquetas das formas não retiradas após a concretagem	Tratamento interno e atividades subsequentes	2	
Buracos nas paredes de concreto não tampados após remoção das formas	Tratamento interno, chapisco, reboco de gesso e atividades subsequentes	5	

Descrição da falta de terminalidade	Principais atividades impactadas	Quantidade de vezes que foi identificado	Exemplo
Regiões nas paredes sem gesso ou com falhas após o reboco de gesso	Reboco de gesso e atividades subsequentes	8	
Quebra de paredes ou lajes de concreto para execução de instalações	Tratamento interno, chapisco, contrapiso, reboco de gesso e atividades subsequentes	16	
Defeitos nas paredes após concretagem	Tratamento interno e atividades subsequentes	2	

Fonte: a autora

A segunda atividade com mais problemas de falta de terminalidade foi o reboco de gesso. Essa atividade foi uma das mais impactadas por buracos e quebras nas paredes para passagem de instalações, fazendo com que a atividade de reboco ficasse com pendências a serem finalizadas nos locais onde houve a quebra. Além disso, ao longo da execução dessa atividade também eram deixados alguns locais sem a aplicação do reboco, de modo que esses locais só eram finalizados após a conclusão da atividade seguinte, de assentamento de piso em paredes. Portanto, essa prática também contribui para a falta de terminalidade do reboco de gesso nos apartamentos.

4.4 AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO COM BASE NOS CONSTRUCTOS DE PESQUISA

Nesta seção serão apresentadas as avaliações dos resultados, obtidos a partir da implementação do método proposto na Obra B. Tais avaliações foram realizadas com base nos constructos definidos, e estão agrupadas conforme os seguintes aspectos:

- Avaliação do impacto proporcionado pela adoção das tecnologias propostas para o monitoramento do progresso (constructos de Impacto da identificação e avaliação do progresso e Transparência);
- Avaliação da estrutura do método proposto (constructos de Utilidade do método e Facilidade de adoção e integração do método);

4.4.1 Avaliação do impacto proporcionado pela adoção das tecnologias propostas para o monitoramento do progresso

Nesta seção são apresentados resultados relacionados à avaliação do Impacto na identificação e avaliação do progresso e Transparência nas dinâmicas de gerenciamento das obras. Para tais avaliações foram analisados, principalmente, os resultados das entrevistas realizadas com gestores e equipe gerencial da Obra B.

4.4.1.1 Potencial de impacto na identificação e avaliação do progresso da obra

A partir das entrevistas realizadas, foram avaliadas qualitativamente as seguintes variáveis relacionadas ao potencial do método de impactar na identificação e avaliação do progresso: (1) Avaliação visual do progresso real da obra com uso de RPA e câmera 360°; (2) Identificação e análise geral de desvios de progresso da obra; e (3) Mitigação dos desvios negativos de progresso pelo planejamento e implementação de ações corretivas. No Quadro 19 são apresentadas as avaliações dos entrevistados da Obra B quanto ao nível de impacto do método nestas variáveis.

Quadro 19 – Resultado das entrevistas para avaliação do constructo de impacto na identificação e avaliação do progresso da obra

Variável avaliada	1	2	3	4	5	Média
1 – Avaliação visual do progresso real da obra com uso de RPA e câmera 360°				TG, CP, ACP	GSA, TP	4,40
2 – Identificação e análise geral de desvios de progresso da obra				GSA, TG, ACP	TP, CP	4,40
3 – Mitigação dos desvios negativos de progresso pelo planejamento e implementação de ações corretivas				GSA, TG, CP, ACP	TP	4,20

Nota: GSA – Gerente de SGI e ADM; TG – Trainee Gerencial (engenheiro responsável pela Obra B); TP – Técnico em Planejamento; CP – Coordenadora de Planejamento; ACP – Analista de Custo e Planejamento.

Fonte: a autora

No geral, a maioria dos entrevistados consideraram como alto (nota 4) o potencial de impacto para as três variáveis analisadas. Os entrevistados em sua maioria relataram que o uso de dados visuais facilita a identificação e avaliação do progresso, de modo que apenas algumas atividades específicas como enfição não são possíveis de serem vistas com as ferramentas propostas.

A gerente de SGI e ADM, a coordenadora de planejamento e o analista de custo e planejamento compartilharam a opinião de que existe oportunidade para aumentar o potencial do método complementando os dados visuais com informações numéricas que auxiliem na tomada de decisão. Dessa forma, para esses entrevistados seria importante utilizar os dados visuais para responder perguntas como “Em quantos dias o atraso observado está impactando no prazo final da obra?” e “O quanto ainda falta ser feito de uma determinada atividade para que ela seja concluída?”.

4.4.1.2 Transparência

A partir das entrevistas realizadas, foram avaliadas qualitativamente as seguintes variáveis relacionadas ao aumento da transparência: (1) Qualidade na comunicação do status do progresso a partir do uso de tecnologias de dados visuais, e (2) Simplicidade e rapidez no entendimento das informações relacionadas ao progresso. No Quadro 20 são apresentadas as avaliações dos entrevistados da Obra B quanto ao nível de impacto do método nestas variáveis.

Quadro 20 – Resultado das entrevistas para avaliação do constructo Transparência

Variável avaliada	1	2	3	4	5	Média
1 – Qualidade na comunicação do status do progresso a partir do uso de tecnologias de dados visuais				TG	GSA, TP, CP, ACP	4,75
2 – Simplicidade e rapidez no entendimento das informações relacionadas ao progresso				TG	GSA, TP, CP, ACP	4,75

Nota: GSA – Gerente de SGI e ADM; TG – Trainee Gerencial (engenheiro responsável pela Obra B); TC – Técnico em Planejamento; CP – Coordenadora de Planejamento; ACP – Analista de Custo e Planejamento.

Fonte: a autora

Como é possível observar, o constructo transparência foi o que obteve melhor avaliação pelos entrevistados. Em todas as entrevistas os participantes opinaram de forma positiva sobre a simplicidade, rapidez e facilidade de comunicação e

entendimento das informações do progresso da obra através das ferramentas utilizadas. Segundo o engenheiro responsável pela obra B, o uso de BIM 4D, RPA e câmera 360° de forma isolada pode não ser tão eficaz para aumentar a transparência no processo de monitoramento do progresso. No entanto, para esse entrevistado a utilização dessas ferramentas de forma conjunta trouxe maior clareza para a visualização e entendimento do status das atividades.

4.4.2 Avaliação da estrutura do método proposto

Nesta seção são apresentados os resultados relacionados à avaliação dos constructos de Utilidade e Facilidade de adoção do método proposto aos processos de planejamento e controle da Obra B. Para tais avaliações foram analisados, principalmente, os resultados das entrevistas realizadas com gestores e equipe gerencial da Obra B.

4.4.2.1 Utilidade do método proposto

A partir das entrevistas realizadas, foram avaliadas qualitativamente as seguintes variáveis relacionadas à utilidade do método: (1) Importância dos produtos do método para um monitoramento efetivo do progresso e tomada de decisão; e (2) Adequação dos produtos do método às necessidades do monitoramento do progresso. No Quadro 21 são apresentadas as avaliações dos entrevistados da Obra B quanto ao nível de impacto do método nestas variáveis.

Quadro 21 – Resultado das entrevistas para avaliação do constructo Utilidade

Variável avaliada	1	2	3	4	5	Média
1 – Importância dos produtos do método para um monitoramento efetivo do progresso e tomada de decisão				GSA, TG, CP, ACP	TP	4,25
2 – Adequação dos produtos do método às necessidades do monitoramento do progresso			ACP	TG, CP	GSA, TP	4,20

Nota: GSA – Gerente de SGI e ADM; TG – Trainee Gerencial (engenheiro responsável pela Obra B); TC – Técnico em Planejamento; CP – Coordenadora de Planejamento; ACP – Analista de Custo e Planejamento.

Fonte: a autora

Nesta avaliação a maioria dos entrevistados relatou que considera importante o uso dos produtos do método para o monitoramento do progresso, por facilitar a análise e comparação entre o que foi realizado e o planejado. Na opinião do Técnico em

Planejamento, a falta de dados atualmente é o maior empecilho para o processo de acompanhamento do progresso da obra, e por isso ele considera que o uso das ferramentas propostas é muito importante para um monitoramento efetivo. Por outro lado, os demais entrevistados afirmaram que atualmente as análises de progresso podem ser feitas sem o uso dos produtos gerados a partir do método, ainda que de uma forma mais subjetiva. Por esta razão, estes entrevistados não atribuíram a nota máxima para o quesito importância do método para um monitoramento efetivo do progresso.

Como complemento à avaliação da utilidade, foi também pedido que os entrevistados citassem os principais benefícios e barreiras ou oportunidades de melhoria relacionados ao método proposto. O Quadro 22 apresenta a compilação desses benefícios e dificuldades gerais levantados nas entrevistas.

Quadro 22 – Benefícios, barreiras e oportunidades de melhoria levantados pelas entrevistas realizadas

Benefícios	Barreiras / oportunidades de melhoria
<ul style="list-style-type: none"> • Simplicidade de enxergar os desvios de progresso, inclusive evidenciando os problemas de terminalidade; • É mais fácil visualizar o progresso através das imagens do que através de textos, documentos e relatórios; • Bom custo-benefício da câmera 360°; • A clareza em visualizar os problemas de progresso facilita criar um plano para tratar os desvios; • O método auxilia no acompanhamento da execução da obra, permitindo a comparação entre o que já foi executado e o planejado; • A análise de terminalidade ajuda a evitar problemas futuros relacionados à execução dos serviços; • O relatório com uso de imagens é objetivo e fácil de entender; • Ter informações e dados sobre o progresso da obra é importante para o seu acompanhamento; • Evidenciar as atividades que não foram 100% concluídas é um grande benefício, pois na medida em que a obra avança o número de pendências nas atividades se torna cada vez maior. 	<ul style="list-style-type: none"> • Buscar uma forma de reduzir o tempo de coleta para que seja possível fazer a coleta de fotografias 360° em todos os apartamentos; • Como sugestão, avançar no estudo utilizando um robô terrestre com a câmera 360° acoplada para que não seja necessário ter uma pessoa fazendo as vistorias; • O planejamento mais atualizado que foi utilizado para fazer as comparações já se encontrava defasado; • A obra não deveria ser a única a usar os produtos gerados. Estes deveriam ser compartilhados também com o setor de planejamento da empresa; • Adicionar ao método uma etapa que envolva a realização de um plano de ação para reduzir os desvios de progresso; • Compartilhar os produtos gerados com o setor de qualidade da empresa, envolvendo-o no método; • Complementar o método com informações que quantifiquem o impacto das atividades atrasadas no planejamento e como recuperar o atraso.

Fonte: a autora

Com relação aos benefícios listados pelos entrevistados, observa-se que grande parte está relacionado com a clareza, facilidade e simplicidade de visualização e análise do progresso, como também pôde ser visto na avaliação do constructo Transparência. Os relatórios de análises de terminalidade com uso de fotografias 360° foi um dos produtos que mais geraram comentários positivos por parte dos entrevistados. Com relação a isso, o engenheiro responsável pela Obra B afirmou que alguns problemas que afetam a terminalidade dos serviços não tinham sido vistos até então, pois muitas vezes a equipe da obra já tem um olhar viciado para o que está sendo construído e não consegue perceber as falhas.

Com relação às dificuldades encontradas, o engenheiro responsável pela Obra B destacou que o método poderia ter sido mais útil se o planejamento de linha de base estivesse mais atualizado e condizente com a realidade atual da obra. Por essa razão, esse entrevistado acredita que a aplicação do método deveria se expandir para o setor de planejamento da empresa. A coordenadora de planejamento explicou durante a entrevista que a Obra B ficou um período sem replanejamento por decisões internas da empresa e reiterou a importância da participação e envolvimento dos setores de planejamento e qualidade no método proposto. Os entrevistados também sugeriram complementar o método com uma etapa em que um plano de ação fosse proposto para mitigar os desvios de progresso, além de trazer informações que quantifiquem o impacto das atividades atrasadas no planejamento.

Alguns entrevistados manifestaram suas opiniões sobre o uso da câmera 360° no estudo. A coordenadora de planejamento considerou que este equipamento tem um bom custo-benefício, além de possuir um tempo aceitável necessário para fazer a captura de imagens internas. Por outro lado, para a gerente de SGI e ADM, seria importante realizar a captura de imagens de todos os apartamentos em construção, e para isso o tempo de coleta teria que ser menor. Para esta entrevistada, nas condições atuais seria inviável que alguém fizesse a coleta de fotografias de todos os apartamentos, sendo necessário pensar em soluções para que essa coleta não dependa de uma pessoa. A entrevistada citou como uma possível solução o uso de um robô terrestre com a câmera 360° acoplada.

Como uma barreira que pode ser citada pela autora, está o fato de o processo de integração dos dados visuais ao modelo BIM e análise do progresso ainda ser muito dependente do trabalho humano. Nesse sentido, seria importante que algumas

etapas do método fossem automatizadas para aumentar a praticidade de alimentação dos dados e realização das análises de progresso da obra por parte da equipe de planejamento.

4.4.2.2 Facilidade de adoção do método proposto

Para avaliação da facilidade de adoção e integração do método, a variável facilidade de aplicação das atividades e produtos do método na obra foi avaliada qualitativamente nas entrevistas, como mostra o Quadro 23. O engenheiro responsável pela Obra B preferiu não avaliar esse constructo, pois segundo ele, não possui entendimento suficiente sobre como os produtos do método são gerados.

Quadro 23 – Resultado das entrevistas para avaliação do constructo facilidade de adoção do método proposto

Variável avaliada	1	2	3	4	5	Média
1 – Facilidade de aplicação das atividades e produtos do método na obra				GSA, ACP	TP, CP	4,38

Nota: GSA – Gerente de SGI e ADM; TC – Técnico em Planejamento; CP – Coordenadora de Planejamento; ACP – Analista de Custo e Planejamento.

Fonte: a autora

No geral, os entrevistados consideram que a facilidade de aplicação das atividades e produtos do método é alta ou muito alta. Na opinião da gerente de SGI e ADM, o processo de coleta de fotografias 360°, por ainda ser muito manual, pode trazer dificuldades na aplicação do método pela empresa. O analista de custo e planejamento demonstrou preocupação com a quantidade de tempo que seria necessário para integrar todos os dados visuais no Navisworks ao longo de toda a obra. Com relação a isso, durante a pesquisa a autora e o aluno de iniciação científica que fez parte do projeto necessitavam de um dia inteiro de trabalho para realizar o processamento e a integração dos dados internos e externos no Navisworks. Para o analista de custo e planejamento e a gerente de SGI e ADM, o ideal seria que esse tempo fosse menor para facilitar a aplicação do método. Já o técnico em planejamento e a coordenadora de planejamento consideraram que esse tempo é aceitável.

Com relação à variável facilidade de integração entre os processos gerenciais da empresa e as atividades do método, foi perguntado aos entrevistados quais mudanças eles acham que seriam necessárias na empresa para adoção do método proposto. Obteve-se as seguintes respostas:

- “Poucas mudanças seriam necessárias, pois o método é simples. Talvez adequar a frequência de replanejamento da obra”;
- “Adequação dos computadores para utilização dos softwares necessários e capacitar os funcionários para trabalhar com as tecnologias propostas”;
- “Treinamento da equipe e aquisição das tecnologias e softwares utilizados”;
- “Atualmente não teria uma pessoa disponível na equipe para realizar a coleta de dados. Também seria necessário adquirir equipamentos e realizar treinamentos”;
- “Ter estrutura de computadores, ferramentas, softwares e mão de obra para implementar os processos do método”.

4.4.2.3 Generalização do método para outras empresas e contextos

Para avaliação da generalização do método para outras empresas e contextos, a variável “adaptação do método e das ferramentas propostas a obras de outras empresas e tipologias” foi avaliada qualitativamente nas entrevistas, como mostra o Quadro 24.

Quadro 24 – Resultado das entrevistas para avaliação do constructo generalização do método para outras empresas e contextos

Variável avaliada	1	2	3	4	5	Média
1 – Adaptação do método e das ferramentas propostas a obras de outras empresas e tipologias				GSA, TG,	TP, CP, ACP	4,6

Nota: GSA – Gerente de SGI e ADM; TG – Trainee Gerencial (engenheiro responsável pela Obra B); TC – Técnico em Planejamento; CP – Coordenadora de Planejamento; ACP – Analista de Custo e Planejamento.

Fonte: a autora

No geral, a opinião dos entrevistados é de que o método e as ferramentas propostas possuem alto potencial de serem adaptados a obras de outras empresas e tipologias. Para a autora, o método proposto poderia ser implementado com facilidade em outras obras residenciais, mesmo aquelas com características diferentes das obras estudadas. Em empreendimentos de edifícios altos, por exemplo, provavelmente uma adaptação necessária seria com relação a fazer um plano de voo

vertical para mapeamento de fachadas. Já a análise interna com uso de câmera 360° não necessitaria de grandes alterações para implementação do método.

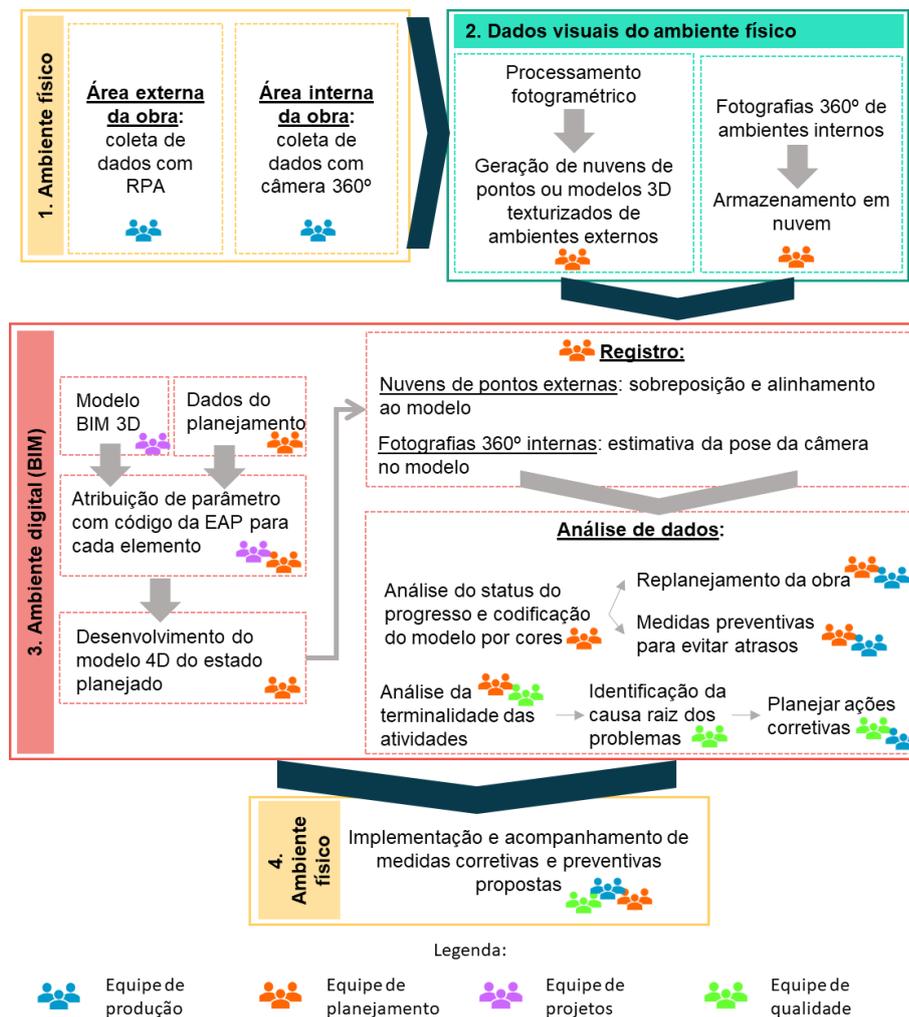
4.5 MÉTODO PARA MONITORAMENTO DO PROGRESSO DE OBRAS COM USO DE BIM, RPA E CÂMERA 360°

Nesta seção a estrutura final do método proposto será apresentada, seguida de recomendações para futuras implementações, além de um protocolo para integração dos dados obtidos através de câmera 360° e RPA para o monitoramento do progresso de obras.

4.5.1 Apresentação da estrutura final do método proposto

Na Figura 48 é apresentado esquema com a estrutura final do método proposto, incluindo os fluxos de processos e produtos que a compõem e a indicação dos agentes facilitadores associados à cada processo. Essa estrutura final foi elaborada a partir das avaliações, ajustes e complementos da proposta do método, resultantes da experiência de implementação no segundo estudo empírico.

Figura 48 – Estrutura final do método para monitoramento do progresso de obras com uso de BIM, RPA e câmera 360°



Fonte: a autora

A primeira etapa para a realização do monitoramento do progresso da obra com uso das tecnologias propostas constitui a coleta de dados do ambiente físico. Essa etapa pode ser realizada com uso de RPA para o registro de imagens aéreas externas da obra e o uso de câmera 360° para a coleta de fotografias 360° dos ambientes internos.

Após a coleta de dados, utiliza-se as fotografias aéreas coletadas da área externa para o processamento fotogramétrico com a geração da nuvem de pontos da obra. Já as fotografias 360° de ambientes internos serão organizadas e armazenadas em uma plataforma em nuvem que permita a visualização imersiva das fotografias 360° para posterior integração ao modelo digital.

No ambiente digital será realizada a integração do modelo BIM do estado planejado aos dados visuais coletados, processados e armazenados nas etapas anteriores. Para isso, inicialmente utiliza-se os dados do planejamento de longo prazo da obra para atribuir aos elementos do modelo BIM 3D um parâmetro com o código correspondente à sua atividade no planejamento. A partir disso, desenvolve-se o modelo 4D do estado planejado, integrando, de forma automática, os elementos do modelo às suas respectivas atividades.

A integração dos dados visuais do estado atual da obra no modelo 4D desenvolvido é realizada na etapa de registro. Para isso, é realizada a sobreposição e alinhamento da nuvem de pontos externa ao modelo 4D, enquanto para as fotografias 360° internas deve-se gerar um link para acesso à fotografia armazenada em nuvem.

Com a integração de tais dados ao modelo BIM 4D, será possível realizar a análise do progresso da obra e a codificação do modelo por cores, indicando visualmente as atividades atrasadas, adiantadas e atividades futuras. A partir dessa análise, caso se observe um grande atraso nas atividades, um replanejamento da obra pode ser necessário. Se, por outro lado, não houver necessidade de realizar o replanejamento, algumas medidas preventivas para evitar desvios de progresso podem ser propostas.

Utilizando-se as fotografias 360° internas da obra, alguns problemas de qualidade que levam à falta de terminalidade dos serviços podem ser encontrados. Nesses casos, é necessário encontrar a causa raiz para a ocorrência de tais problemas e assim planejar ações corretivas, evitando que se propaguem por toda a obra. Por fim, após as análises realizadas, é necessário realizar a implementação e acompanhamento das medidas corretivas e preventivas propostas ao longo do ciclo de monitoramento do progresso das atividades, verificando se tais medidas estão sendo suficientes para impedir a ocorrência de atrasos na obra.

4.5.2 Recomendações para implementação do método proposto

Com o objetivo de orientar a adoção e implementação do método em contextos reais, foi elaborado um conjunto de recomendações propostas a partir da experiência da autora ao longo da implementação do método nos estudos empíricos. Também foram levadas em consideração algumas recomendações propostas por Álvares

(2019), principalmente relacionadas ao monitoramento externo da obra com uso de RPA.

Como recomendações a nível tecnológico, é necessário que as empresas façam um planejamento de quais ferramentas já possuem para adoção do método e quais precisarão ser adquiridas. Dentre as ferramentas necessárias estão RPA, câmera 360°, celular ou tablet para utilização dos aplicativos móveis e computadores com capacidade de processamento compatível com os softwares que serão usados. Deve-se prever também a aquisição de licenças para softwares BIM de modelagem 3D e 4D, softwares de planejamento e softwares de processamento fotogramétrico. A aquisição de tais recursos requer um investimento financeiro que precisa ser bem planejado, tendo em vista que o retorno do uso dessas tecnologias se dá no longo prazo.

Em nível de processos, recomenda-se definir a periodicidade em que será realizado o monitoramento do progresso através do método proposto. Para se conseguir visualizar o avanço da obra através dos produtos do método, é necessário ter um intervalo de tempo aproximadamente constante entre os ciclos de implementação. Alguns dos fatores que influenciam na definição desse intervalo é o ritmo de produção da obra e o nível de detalhamento do planejamento utilizado como linha de base para comparação. Quanto mais rápido as atividades estiverem sendo executadas na obra e mais detalhado for o planejamento tomado como referência, a tendência é que seja necessário diminuir o intervalo entre os ciclos de monitoramento para que seja possível acompanhar a execução do maior número possível de atividades.

No âmbito de recomendações em nível de pessoas, as empresas devem definir quais setores participarão da implementação e qual será o papel de cada um no desenvolvimento dos processos e produtos do método. Considerando um cenário de implementação do método por equipe própria da empresa, uma sugestão é que a equipe de produção, por ter contato direto com as atividades em campo, fique responsável por coletar periodicamente os dados visuais da obra com uso de RPA e câmera 360°. A equipe de planejamento ficaria responsável pelo desenvolvimento do planejamento da obra, podendo contar com o auxílio do setor de projetos para desenvolvimento do modelo BIM 4D do estado planejado.

Uma equipe de suporte ou a própria equipe de planejamento receberia os dados visuais coletados na obra e faria o seu processamento e integração ao modelo BIM 4D do estado planejado, juntamente com as análises relativas ao progresso da obra. O setor de qualidade utilizaria as fotografias 360° coletadas para identificar problemas de qualidade na execução dos serviços que afetam a sua terminalidade. Identificando a recorrência de tais problemas, este setor seria responsável por identificar causa raiz dos problemas e dar início às ações corretivas necessárias junto à equipe de produção. Ao longo dos ciclos de monitoramento do progresso, ao se identificar desvios muito grandes entre o que foi planejado e executado, o setor de planejamento ficaria responsável também por fazer o replanejamento das atividades do cronograma. O setor de produção receberia relatórios de progresso e terminalidade elaborados pelos demais setores, e os utilizaria para monitorar o seu desempenho e elaborar estratégias visando a recuperação de possíveis atrasos no cronograma.

Além disso, para a implementação do método é preciso que os envolvidos tenham familiaridade com o uso das tecnologias propostas e, para que isso ocorra, pode ser necessário a realização de treinamentos com as equipes. Nesse sentido, inicialmente seria importante, por exemplo, desenvolver competências básicas relacionadas à utilização de modelos BIM 4D por parte de todos os envolvidos na implementação do método. Concluído este objetivo, treinamentos mais específicos poderiam ser desenvolvidos voltados para as necessidades de cada setor, incluindo treinamentos para realização das coletas de dados, regras para realização de voos seguros com RPA, processamento fotogramétrico das imagens, dentre outros.

4.5.3 Protocolo para integração dos dados obtidos através de câmera 360° e RPA no modelo BIM 4D para o monitoramento do progresso de obras

A partir da experiência de implementação do método nos estudos empíricos, foi desenvolvido um protocolo para integração dos dados visuais coletados por RPA e câmera 360° ao modelo BIM 4D, podendo auxiliar, de forma prática e operacional, a implementação do método proposto em contextos reais.

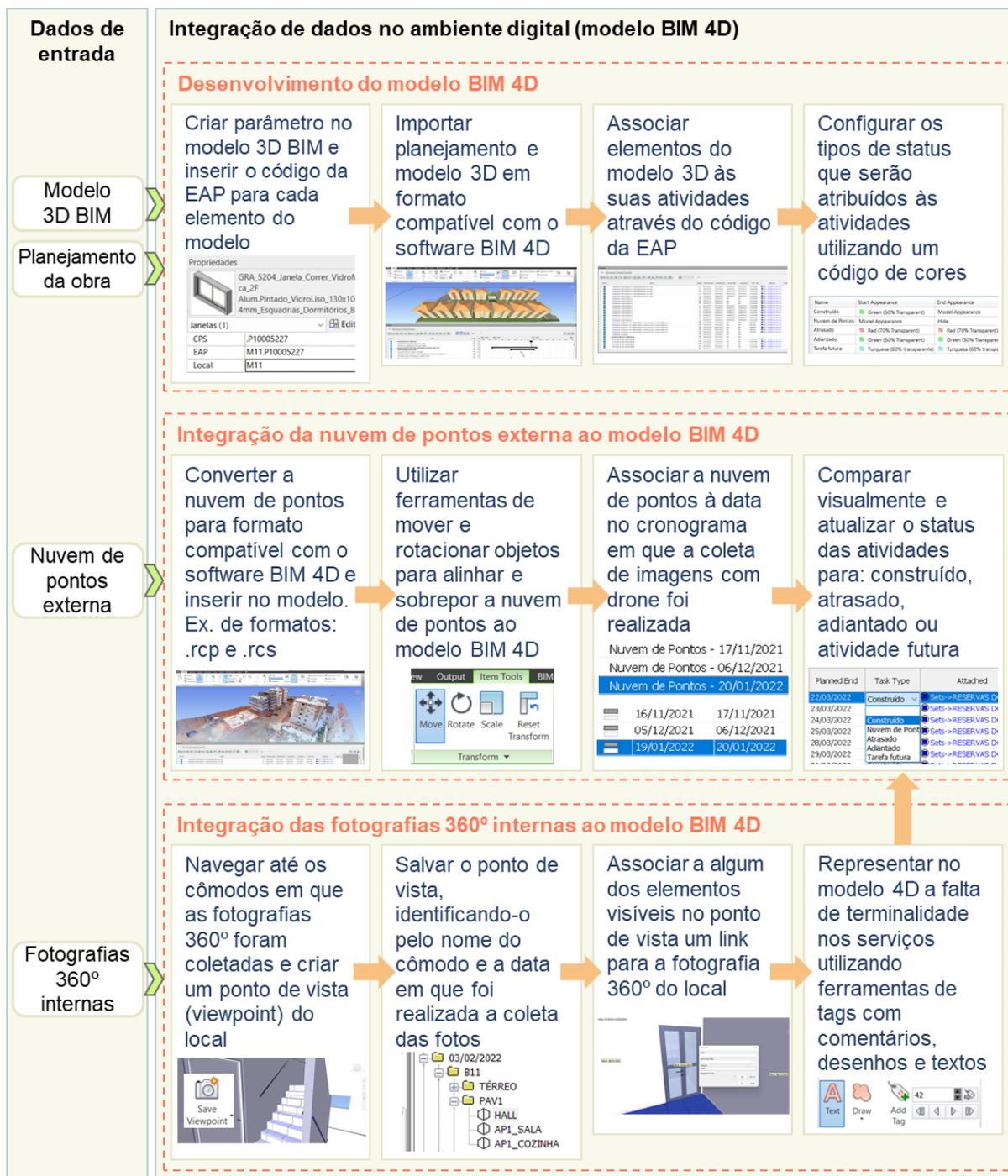
A coleta de dados na obra com câmera 360° deve ser feita de modo que posteriormente seja possível identificar os locais em que as fotografias foram coletadas. Uma forma de possibilitar essa identificação é através do registro dos horários em que a coleta de dados começou em cada local. Um exemplo de planilha

que foi utilizada no estudo para o registro dessas informações encontra-se no Apêndice 3.

Após a realização das capturas, as fotografias 360° coletadas devem ser organizadas por pastas em uma plataforma em nuvem compatível com a visualização imersiva de fotografias 360°. A separação das fotografias em pastas deve ser feita de acordo com o dia em que a coleta foi realizada, o edifício, pavimento e o apartamento. A plataforma em nuvem deve possibilitar a criação de um link compartilhável das fotografias 360°, pois na fase de integração desses dados no modelo BIM 4D esse link será inserido no modelo. O protocolo para integração dos dados visuais coletados no modelo BIM 4D está sintetizado na Figura 49, sendo dividido em:

- **Desenvolvimento do modelo BIM 4D:** essa etapa consiste na associação de forma automática dos elementos presentes do modelo 3D às suas respectivas atividades no cronograma. Para isso, é utilizado um código que deve estar presente tanto como uma coluna no planejamento da obra quanto como um parâmetro de instância no modelo 3D. Esta associação automática pode ser feita criando uma regra personalizada através da ferramenta TimeLiner do Navisworks.
- **Integração da nuvem de pontos ou modelo 3D texturizado da área externa ao modelo BIM 4D:** para a integração da nuvem de pontos, esta necessita estar em um formato compatível com o software BIM 4D utilizado. Seu alinhamento e sobreposição ao modelo 4D são realizados de forma manual, possibilitando a comparação visual entre os estados planejado e executado, seguindo pela atualização do status das atividades.
- **Integração das fotografias 360° ao modelo BIM 4D:** esta integração pode ser feita através do recurso Viewpoint do Navisworks. O modelo 4D deve estar configurado para a exibição de links, e a indicação de problemas de terminalidade das atividades pode ser realizada através de recursos de anotação.

Figura 49 – Protocolo de integração de dados visuais ao modelo BIM 4D para monitoramento do progresso de obras



Fonte: a autora

A análise de terminalidade dos serviços nas fotografias 360° pode ser feita com auxílio de ferramentas de anotação presentes nos softwares BIM 4D, que permitem adicionar textos, desenhos, tags e comentários em pontos de vistas salvos no modelo. Para cada ponto de vista salvo é possível obter a informação do dia em que o

problema de falta de terminalidade foi identificado, uma breve descrição do problema, o seu status (novo, pendente, resolvido etc.) e o dia em que foi dado como resolvido.

O uso dessas ferramentas no modelo BIM 4D ajuda a acompanhar o processo de resolução de problemas de qualidade que levam à falta de terminalidade das atividades. Com o auxílio de tais recursos é possível planejar a próxima coleta de dados na obra de modo a voltar nos locais em que foram identificados problemas de qualidade na execução para realizar a coleta de fotografias 360° e assim poder registrar a resolução do problema. Assim, de posse das informações visuais e informações de datas em que o problema foi identificado e resolvido, é possível realizar o monitoramento de terminalidade integrado ao progresso da obra, registrar a abertura e fechamento de ocorrências de defeitos e utilizar os dados gerados para criar indicadores úteis para a produção.

4.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente estudo houve um esforço para suprir uma demanda presente nos estudos mais recentes de monitoramento de progresso de obras relativo ao monitoramento de ambientes internos. Nesse sentido, uma das principais contribuições dadas por este trabalho diz respeito ao estabelecimento de um método com protocolos e recomendações para uso de câmeras 360° propostos a partir de observações sistemáticas para o monitoramento do progresso interno. Dessa forma, um dos fatores que contribuem para a importância de se realizar esse estudo está relacionado ao fato de diversos softwares já terem sido desenvolvidos e disponibilizados no mercado visando o monitoramento do progresso de obras com uso de fotografias 360°, enquanto a produção científica para implementar, avaliar e propor recomendações relacionadas ao uso dessa tecnologia ainda se mantém escassa.

Por outro lado, o uso de nuvens de pontos obtidas através de fotografias coletadas por RPA é uma das principais formas empregadas pela literatura para se monitorar o progresso externo de obras, como pode ser visto em Kielhauser *et al.* (2020), Kim, Kim e Lee (2020), Álvares e Costa (2019), dentre outros. Através dos resultados obtidos no presente estudo verificou-se que é possível complementar tais abordagens utilizando-se as câmeras 360° para o monitoramento interno. Os resultados mostraram que em menos de 2 minutos foi possível realizar capturas nos principais cômodos dentro de um apartamento, sendo uma média de tempo que favoreceu o registro da situação atual de um apartamento por andar dentro dos

edifícios do estudo. Além disso, a possibilidade de utilizar as fotografias 360° sem a realização de algum tipo de processamento prévio, aproveitando a sua capacidade de proporcionar uma visualização imersiva do ambiente e a boa qualidade das capturas também contribuíram para sua funcionalidade e praticidade de integração ao método. Assim, diferentemente de estudos que fazem uso de tecnologias para monitoramento exclusivamente interno de obras, o presente estudo mostra que há possibilidade de integrar dados visuais de progresso interno e externo de obras com o uso das tecnologias propostas.

No método desenvolvido, o armazenamento de nuvens de pontos e fotografias 360° da obra em um ambiente digital permite ao usuário consultar com maior facilidade o estado em que a obra se encontrava em um determinado período do tempo desejado. No presente estudo, o acesso a informações visuais organizadas de acordo com a data e o local em que foram obtidas permitiu realizar comparações entre fotografias 360° de diferentes estágios da obra, permitindo-se visualizar o estado da obra no passado e como ela se encontra no presente. A realização de tais aferições permite aos gestores analisar a evolução da obra ao longo do tempo, auxiliando-os a identificar se o ritmo de execução dos serviços se deu como esperado e a ocorrência de possíveis problemas de baixa produtividade. Além disso, Lin e Golparvar-Fard (2020b) também afirmam que tais dados visuais armazenados podem ser úteis na fase de pós-construção para o gerenciamento de facilities e como evidência para comprovar a qualidade da execução da obra.

Já a comparação entre a realidade (representada nas fotografias 360° ou nas nuvens de pontos) e o modelo BIM 4D proporciona identificar ao longo do tempo as diferenças entre o estado atual da obra e o seu estado planejado, aumentando o seu potencial para dar suporte ao processo tradicional de monitoramento do progresso. Com a integração de dados visuais ao modelo BIM 4D, o processo tradicional de aferição do progresso das atividades pode ser realizado com menos visitas ao campo, uma vez que a conferência do status de conclusão ou não das atividades pode ser feita no ambiente digital. Como consequência, a utilização das tecnologias propostas pode fazer com que o processo de monitoramento do progresso de obras se torne menos exaustivo fisicamente e mentalmente, além de mais confiável, uma vez que foi realizado com base em dados armazenados no ambiente digital que podem ser acessados sempre que for necessário. Esses benefícios corroboram com resultados

alcançados em outros estudos voltados para monitoramento do progresso, como os estudos de Rahimian *et al.* (2020), Xue, Hou e Zeng (2021), Zhao *et al.* (2021), dentre outros.

Através da avaliação realizada no presente estudo, pode-se citar como as principais vantagens da utilização do método proposto o seu elevado potencial para identificar desvios de progresso da obra, proporcionando, de forma simples e rápida, o entendimento do status do progresso da obra por todos os envolvidos. O custo de aquisição de câmeras 360° é relativamente baixo quando comparado com o preço de outras tecnologias que também podem ser empregadas para monitoramento interno de obras, como laser scanner e robôs terrestres. Através do estudo foi possível constatar que as câmeras 360° são equipamentos fáceis de usar, e que proporcionam a obtenção de fotografias com qualidade suficiente para visualização até mesmo de pequenos defeitos nos ambientes em que as capturas foram feitas. Portanto, características da câmera 360° como rapidez na coleta, facilidade de uso, baixo custo e boa qualidade da imagem identificadas ao longo desse estudo reforçam os trabalhos desenvolvidos por Barazzetti, Previtali e Roncoroni (2018), Losè, Chiabrando e Tonolo (2021), dentre outros, que caracterizam as câmeras 360° como ferramentas de captura da realidade de baixo custo para realização de levantamentos rápidos.

Essas características da câmera 360° propiciaram o uso dessa ferramenta para identificação de problemas de qualidade na execução dos serviços que levam à falta de terminalidade das atividades. A falta de terminalidade configura um tipo de perda capaz de impactar diretamente no atraso de atividades no cronograma (FIREMAN, 2012; ALVES, 2000). Ainda assim, grande parte dos estudos na área de monitoramento do progresso de obras não dão ênfase à identificação dessas perdas. Dessa forma, o método concebido no presente estudo para monitoramento do progresso de obras com uso de BIM, RPA e câmera 360° também se diferencia dos demais existentes na literatura por permitir, com o uso das tecnologias propostas, a identificação e análise de problemas que levam à falta de terminalidade na execução dos serviços.

O presente estudo também trouxe uma avaliação e análise do uso de nuvens de pontos geradas a partir de fotografias 360° para monitoramento do progresso, além do uso das próprias fotografias 360° para a mesma finalidade. Relacionado a isso, uma das primeiras contribuições alcançadas esteve relacionada ao desenvolvimento

de um protocolo para realização do levantamento fotogramétrico em ambientes internos de obras utilizando câmera 360°. Ambientes internos em construção possuem características que os diferenciam de locais já mobiliados e decorados e representam um desafio extra para a reconstrução fotogramétrica. Através do presente estudo foi possível determinar as etapas, ferramentas e parâmetros a se considerar para realização da coleta e processamento de fotografias 360° visando obtenção de nuvens de pontos de ambientes internos em construção, configurando um avanço técnico que pode contribuir para o levantamento fotogramétrico desse tipo de ambiente.

No entanto, como foi demonstrado no primeiro estudo empírico, a coleta e processamento fotogramétrico de fotografias 360° para geração de nuvens de pontos são processos com diversas etapas que exigem uma preparação e execução cuidadosa para se obter o resultado desejado. O tempo e quantidade de etapas necessárias para isso se revelaram incompatíveis com a necessidade de monitoramento do progresso. Isso porque, para obras residenciais de médio e grande porte, a grande quantidade de apartamentos a serem monitorados exige uma rapidez e facilidade na coleta e processamento de dados que não pôde ser alcançada com o uso dessa técnica. Dessa forma, o uso das fotografias 360° imersivas foi a solução que atendeu de forma simples e satisfatória à necessidade de rapidez e facilidade na coleta dos dados, tendo sido escolhida para utilização no método proposto.

Como contribuição final do presente trabalho, além do método para monitoramento do progresso de obras com uso de BIM, RPA e câmera 360°, também pode ser destacado o desenvolvimento de recomendações e protocolo para orientar a adoção e implementação do método em contextos reais. As recomendações buscam orientar sobre como integrar o método às dinâmicas de planejamento e controle das obras, e tentar proporcionar condições propícias ao aproveitamento das potencialidades oferecidas pela sua implementação. Já o protocolo apresentado visa fornecer um passo a passo prático de como realizar a integração dos dados visuais coletados à plataforma BIM 4D onde será realizada a comparação entre o estado real da obra e o seu estado planejado.

No método desenvolvido buscou-se criar uma interação entre o ambiente digital e o ambiente físico proporcionada através de dados visuais da obra coletados por RPA e câmera 360°. A dinâmica dessa interação se deu através de um fluxo unidirecional de dados do ambiente físico para o digital. Este fluxo, apesar de não ter

ocorrido de forma automática, pôde ser feito em tempo hábil, uma vez que foi necessário de um a dois dias para processar todas as informações e registrá-las no ambiente virtual. A forma alcançada de controle do ambiente físico através do ambiente digital foi do tipo passiva, na qual não são utilizados dispositivos físicos na forma de atuadores para controle do sistema físico, conforme definição apresentada por Akanmu, Anumba e Ogunseiju (2021). Nesse tipo de controle alcançado, foram utilizados os dados integrados ao modelo BIM para apoio à tomada de decisão quanto ao desempenho da obra, ainda sendo necessária a presença de um mediador humano para interpretar as informações geradas e guiar as ações a serem tomadas no mundo material.

Dessa forma, com base nessas características e nas definições de modelo digital, sombra digital e gêmeo digital apresentadas por Kritzinger *et al.* (2018), Sepasgozar (2021) e Alizadehsalehi e Yitmen (2021), pode-se caracterizar o artefato desenvolvido como um modelo digital. Com relação às principais capacidades dos sistemas ciber-físicos, o modelo digital desenvolvido tem as capacidades de fazer simulações e refletir aspectos do passado e da atualidade da entidade física. O modelo digital desenvolvido não tem as capacidades de utilizar as informações do estado atual da obra para prever como estará o seu progresso no futuro, ou realizar otimizações de forma automática no planejamento da obra.

Identificou-se também que o menor ciclo de monitoramento e feedback alcançado através do modelo digital desenvolvido é o semanal, sendo adequado para o monitoramento do desempenho do produto, de acordo com a escala proposta por Sacks *et al.* (2020). Dessa forma, através de ciclos semanais de monitoramento do progresso com uso do modelo digital é possível detectar precocemente os desvios entre a produção planejada e a produção realizada. No entanto, o modelo digital desenvolvido ainda carece de recursos de prognóstico, como capacidade de realizar avaliação automática da situação atual da obra e emissão de alertas. O desenvolvimento dessas capacidades seria de fundamental importância para avançar no sentido da criação de um gêmeo digital que apoie o planejamento e controle das obras de forma proativa.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O presente estudo teve como objetivo principal propor um método para o monitoramento visual do progresso de obras para acompanhamento de atividades internas e externas, utilizando BIM, RPA e câmera 360°. De forma complementar, os objetivos secundários foram: (a) Desenvolver um protocolo para realização do levantamento fotogramétrico em ambientes internos de obras utilizando câmera 360° para monitoramento do progresso; (b) Propor protocolo para coleta de dados visuais obtidos através de câmera 360° para monitoramento da terminalidade de atividades internas; (c) Estabelecer protocolo e recomendações para realização do monitoramento do progresso de obras com uso de BIM e dados visuais de RPA e câmera 360°; e (d) Identificar benefícios e barreiras de uso integrado de dados obtidos por câmeras 360° e levantamentos fotogramétricos por RPA para monitoramento do progresso. As contribuições e os principais resultados do trabalho serão abordados a seguir.

Atendendo ao objetivo principal da pesquisa, o trabalho trouxe como contribuição o desenvolvimento da estrutura do método para o monitoramento visual do progresso de obras para acompanhamento de atividades internas e externas, utilizando BIM, RPA e câmera 360°, tanto em sua versão preliminar como a estrutura final refinada em função da implementação e avaliação no segundo estudo empírico. O método inclui processos, produtos e agentes facilitadores que atuam no sistema físico ou no digital. A ponte entre os dois sistemas ocorre através dos dados visuais coletados através de RPA e câmera 360°. O método inclui procedimentos de preparação, coleta, processamento, análise de dados e tomada de decisão em relação ao avanço da obra e possíveis desvios de progresso, sejam eles em ambientes internos ou externos. Um outro tipo de análise que pode ser feita através do método proposto diz respeito a problemas de falta de terminalidade na execução dos serviços, que muitas vezes estão associados a falhas de inspeções de qualidade do produto, acarretando atraso tanto na atividade em andamento como nas seguintes.

Do ponto de vista da contribuição prática, foram desenvolvidas também algumas recomendações que podem ser úteis para auxiliar no processo de implementação do método em contextos reais, como em uma empresa. Essas recomendações dizem respeito ao planejamento para aquisição das ferramentas necessárias, definição de equipes que podem estar envolvidas no processo de implementação, realização de

treinamentos, dentre outras. Também foi desenvolvido um protocolo para integração dos dados visuais coletados por RPA e câmera 360° ao modelo BIM 4D. Este protocolo contém um passo a passo prático e operacional que mostra desde como desenvolver o modelo BIM 4D, passando pela integração dos dados visuais coletados por RPA e câmera 360°, até chegar na etapa de atualização do status das atividades de acordo com o progresso identificado.

Uma outra contribuição desse estudo foi o desenvolvimento de um protocolo para realização do levantamento fotogramétrico em ambientes internos de obras utilizando câmera 360° para monitoramento do progresso. Para isso foi desenvolvido um passo a passo com auxílio de um checklist de como planejar a coleta, preparar o local, realizar a coleta de fotografias 360° dos ambientes e por fim, realizar o processamento dessas imagens gerando a nuvem de pontos dos ambientes internos da obra. Embora não tenha sido utilizado na estrutura final do método, a geração de nuvens de pontos de ambientes internos pode ser útil para extrair medidas de áreas, distâncias e volumes de elementos desses locais. Essas informações podem, em trabalhos futuros, auxiliar a quantificar o progresso da obra, complementando as informações visuais e ajudando gestores a ter uma percepção mais precisa sobre o avanço físico da obra.

O método proposto foi avaliado com base nos seguintes constructos de pesquisa: potencial de impactar na identificação e avaliação do progresso da obra, contribuição para a transparência, utilidade, facilidade de adoção e generalização para outras empresas e contextos. As variáveis relacionadas a cada um desses constructos receberam nota superior a 4, indicando que, de modo geral, os participantes tiveram uma percepção positiva acerca dos efeitos da implementação do método na obra estudada. Dentre os pontos positivos citados pelos entrevistados estão a simplicidade, clareza e facilidade de visualização do progresso da obra, além da possibilidade de identificar problemas de qualidade que contribuem para a não conclusão das atividades do prazo. Com relação aos pontos de melhoria, pode-se citar a necessidade de maior participação e colaboração entre as equipes de produção, planejamento e qualidade nas atividades do método. Também foi sugerido pelos entrevistados incluir mais etapas relacionadas à tomada de ações relacionadas aos desvios de progresso. Na estrutura final do método buscou-se considerar tais sugestões feitas.

Com relação ao uso de câmeras 360° no presente estudo, verificou-se que essa ferramenta se mostrou útil para o monitoramento do progresso, havendo também potencial para aplicações voltadas para verificação da qualidade na execução dos serviços da obra. Diferentemente de fotografias comuns, as fotografias 360° permitem que os envolvidos no processo de monitoramento da obra tenham uma visualização integral do ambiente, entendendo melhor o contexto do local onde foi realizada a captura e possibilitando que o usuário defina o enquadramento da fotografia para visualização do ambiente na direção que lhe interessa. Além disso, no processo de coleta das fotografias 360° também não é necessário que se direcione a câmera para uma direção específica, uma vez que uma única captura é realizada em poucos segundos de forma integral. Essa facilidade de operação traz uma grande vantagem para as câmeras 360° em comparação com câmeras tradicionais, principalmente no monitoramento de obras com muitos ambientes internos, onde é necessário que se reduza ao máximo o tempo de preparação e coleta para que se possa realizar a captura do maior número de ambientes possível.

Na perspectiva da construção 4.0 e dos sistemas ciber-físicos, avaliou-se que no método desenvolvido foi possível alcançar um protótipo que está no nível de modelo digital. Isso se deve, principalmente, ao fato de haver um fluxo de dados unidirecional do sistema físico para o virtual, enquanto os gêmeos digitais preconizam a troca de dados automática e em tempo real entre ambos os sistemas. Para avançar no desenvolvimento de sombra digital é necessário que, a princípio, seja possível automatizar a troca de dados entre os ambientes físico e digital. Posteriormente a isso, visando alavancar esse sistema para o nível de gêmeo digital, é preciso avaliar suas capacidades de realizar análises de progresso de forma automática, auxiliando gestores a identificar de forma antecipada locais e atividades que apresentam um ritmo de produção aquém do esperado.

Como limitações do estudo, pode-se citar a não incorporação de técnicas automatizadas para registro (ou seja, sobreposição e alinhamento) de nuvens de pontos e fotografias 360° ao modelo BIM e a não utilização de técnicas automatizadas para detecção do progresso. A automatização dessas etapas poderia reduzir o tempo e trabalho manual gastos para fazer o registro de nuvens de pontos e fotografias 360° manualmente. Poderiam reduzir também o esforço mental empregado no processo de comparação entre o estado real da obra e o seu estado planejado. No entanto, pelo

fato de os softwares BIM 4D testados não possuírem ferramentas capazes de realizar tais tarefas, a automatização dessas etapas demandaria o desenvolvimento de um sistema baseado em algoritmos de visão computacional em uma outra plataforma onde tais códigos pudessem ser implementados. Além disso, no presente estudo a análise do progresso é feita a partir da comparação entre fontes de dados 3D-2D (modelo BIM e fotografias 360°) e 3D-3D (modelo BIM e nuvens de pontos), trazendo uma complexidade maior para o desenvolvimento desse sistema.

Pelo caráter mais observacional adotado, o estudo também teve como limitação a realização de poucas intervenções nos processos gerenciais da obra, o que pode ter causado uma baixa integração do método aos processos de PCP da empresa. A falta de replanejamento da obra diante dos atrasos também contribuiu para o não aproveitamento de todo o potencial do método, uma vez que o planejamento utilizado como referência para monitoramento da obra deixa de ser útil para a equipe ao não ser atualizado regularmente. Uma outra limitação do estudo está relacionada ao fato de se ter realizado apenas dois estudos empíricos, de forma que não se conseguiu testar e aprimorar o método em sua totalidade. Essa limitação ocorreu devido principalmente ao período de pandemia ao longo de todo o estudo, dificultando o deslocamento e acesso a canteiros de obras, realizações de reuniões presenciais com equipes gerenciais das obras e idas a laboratórios da universidade para uso dos softwares e processamento de dados.

A partir dos resultados obtidos nessa dissertação, sugere-se as seguintes oportunidades para serem estudadas em trabalhos futuros:

- Realizar um estudo de viabilidade financeira, identificando custos de equipamentos, mão de obra, treinamentos, dentre outros que podem ser necessários para a implementação do método por construtoras;
- Utilizar o método em conjunto com soluções de IoT que permitam associar automaticamente as fotografias 360° ao local em que foram coletadas, diminuindo uma das etapas manuais do presente estudo;
- Incorporar ao método o protocolo proposto para processamento fotogramétrico de ambientes internos, utilizando as nuvens de pontos geradas (de ambientes internos e externos) para realizar medições e quantificar a produção realizada;

- Testar o uso de robôs terrestres com a câmera 360° acoplada para coletar fotografias 360° de ambientes internos, avaliando o potencial dessa solução para diminuir o tempo de coleta e aumentar o número de locais visitados;
- Utilizar soluções de inteligência artificial para detectar nas fotografias 360° defeitos nos serviços internos que podem levar à falta de terminalidade nas atividades;
- Utilizar as fotografias 360° em conjunto com o modelo BIM em realidade virtual, possibilitando aos gestores uma melhor compreensão do progresso da obra.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial (RBAC-E nº94)**. Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil. Brasília: ANAC, 2021.

AIRGO. **AirGo effortless virtual sites**. <https://www.airsquire.ai/>, 2021. Acesso em: 19/10/2021.

AKANMU, A.; ANUMBA, C. J.; OLAYIWOLA, J. Cyber-Physical Systems-Based Component Tracking and Operation. *In*: ANUMBA, C. J. e ROOFIGARI-ESFAHAN, N. (Ed.). **Cyber-Physical Systems in the Built Environment**. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2020. cap. 4.

AKANMU, A. A.; ANUMBA, C. J. Applications of cyber-physical systems in construction. *In*: SAWHNEY, A.; RILEY, M., *et al* (Ed.). **Construction 4.0 - An Innovation Platform for the Built Environment**: Routledge, 2020.

AKANMU, A. A.; ANUMBA, C. J.; OGUNSEIJU, O. O. Towards next generation cyber-physical systems and digital twins for construction. **Journal of Information Technology in Construction**, 26, 2021.

AKEN, J. E.; BERENDS, H. **Problem Solving in Organizations - A Methodological Handbook for Business and Management Students**. 3 ed. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2018.

AKEN, J. E.; ROMME, G. Reinventing the future: adding design science to the repertoire of organization and management studies **Organization Management Journal**, 6, p. 5-12, 2009.

ALALOUL, W. S.; QURESHI, A. H.; MUSARAT, M. A.; SAAD, S. Evolution of close-range detection and data acquisition technologies towards automation in construction progress monitoring. **Journal of Building Engineering**, 43, 2021.

ALIZADEHSALEHI, S.; YITMEN, I. A Concept for Automated Construction Progress Monitoring: Technologies Adoption for Benchmarking Project Performance Control **Arabian Journal for Science and Engineering**, 44, p. 4993-5008, 2019.

ALIZADEHSALEHI, S.; YITMEN, I. Digital twin-based progress monitoring management model through reality capture to extended reality technologies (DRX). **Smart and Sustainable Built Environment**, 2021.

ÁLVARES, J. S.; COSTA, D. B. Construction Progress Monitoring Using Unmanned Aerial System and 4D BIM. *In*: 27th Annual Conference of the International. Group for Lean Construction (IGLC), 2019, Dublin, Ireland. p. 1445-1456.

ÁLVARES, J. S.; COSTA, D. B.; BARBOSA, A. Proposta de Método para Monitoramento Visual Sistemático do Progresso de Obras Baseado em Mapeamentos 3D por VANT e BIM 4D. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, 2019.

ÁLVARES, J. S.; COSTA, D. B.; MELO, R. R. S. D. Exploratory study of using unmanned aerial system imagery for construction site 3D mapping. **Construction Innovation**, 18, p. 301-320, 2018.

ÁLVARES, J. S. **Monitoramento visual do progresso de obras com uso de mapeamentos 3D de canteiros por VANT e modelos BIM 4D**. 2019. (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPEC), Universidade Federal da

Bahia, Salvador.

ALVES, T. D. C. L. **Diretrizes para a gestão dos fluxos físicos em canteiros de obras: proposta baseada em estudos de caso**. 2000. (Mestrado) -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ARIF, F.; KHAN, W. A. Smart Progress Monitoring Framework for Building Construction Elements Using Videography–MATLAB–BIM Integration. **International Journal of Civil Engineering**, 19, p. 717-732, 2021.

ARMSTRONG, G.; GILGE, C.; MAX, K. **Future-Ready Index - Leaders and followers in the engineering & construction industry**. KPMG. 2019.

ASADI, K.; RAMSHANKAR, H.; NOGHABAEI, M.; HAN, K. Real-Time Image Localization and Registration with BIM Using Perspective Alignment for Indoor Monitoring of Construction **Journal of Computing in Civil Engineering**, 33, n. 5, 2019.

AUTODESK. **Revit**. <https://www.autodesk.com.br/products/revit/overview>, 2020. Acesso em: 27/01/2021.

AUTODESK. **Navisworks**. <https://www.autodesk.com.br/products/navisworks/overview>, 2021. Acesso em: 27/01/2021.

BALLARD, G. Lean Construction and EPC Performance Improvement. *In*: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 1993, Espoo, Finland.

BALLARD, G. The Last Planner System. *In*: TZORTZOPOULOS, P.; KAGIOGLOU, M., *et al* (Ed.). **Lean Construction - Core Concepts and New Frontiers**: Routledge, 2020.

BALLARD, G.; TOMMELEIN, I. Current Process Benchmark for the Last Planner System. Disponível em: <p2sl.berkeley.edu>. Acesso em: 11 Out. 2021.

BALLARD, H. G. **The last planner system of production control**. 2000. (Doctor of Philosophy) - School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birmingham, Birmingham.

BARAZZETTI, L.; GIANINETTO, M.; SCAIONI, M. Automatic Processing of Many Images for 2D/3D Modelling *In*: DANIOTTI, B.; GIANINETTO, M., *et al* (Ed.). **Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment** Cham, Switzerland: Springer, 2020.

BARAZZETTI, L.; PREVITALI, M.; RONCORONI, F. CAN WE USE LOW-COST 360 DEGREE CAMERAS TO CREATE ACCURATE 3D MODELS? **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XLII-2, p. 69–75, 2018.

BARAZZETTI, L.; PREVITALI, M.; RONCORONI, F.; VALENTE, R. CONNECTING INSIDE AND OUTSIDE THROUGH 360° IMAGERY FOR CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XLII-2/W9, p. 87–92, 2019.

BARBOSA, A. D. S.; COSTA, D. B.; MELO, R. R. S. D.; ÁLVARES, J. S. *et al*. Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para geração de produtos fotogramétricos aplicados à gestão de obras. *In*: 1º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação

e Comunicação na Construção e 10º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, 2017, Fortaleza.

BARTLETT, K.; BLANCO, J. L.; FITZGERALD, B.; JOHNSON, J. *et al.* **Rise of the platform era: The next chapter in construction technology**. McKinsey. 2020.

BAX, M. P. Design science: filosofia da pesquisa em ciência da informação e tecnologia. **Informação e Tecnologia**, 42, p. 298-312, 2015.

BEGIC, H.; GALIC, M. A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise. **Buildings**, 11, 2021.

BERNARDES, M. M. E. S. **Planejamento e controle da produção para empresas de construção civil**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

BOJE, C.; GUERRIERO, A.; KUBICKI, S.; REZGUI, Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. **Automation in Construction**, 114, 2020.

BOLTON, A.; BUTLER, L.; DABSON, I.; ENZER, M. *et al.* **Gemini Principles**. Centre for Digital Built Britain. 2018.

BONCI, A.; CARBONARI, A.; CUCCHIARELLI, A.; MESSI, L. *et al.* A cyber-physical system approach for building efficiency monitoring. **Automation in Construction**, 102, p. 68-85, 2019.

BORRMANN, A.; KÖNIG, M.; KOCH, C.; BEETZ, J. Building Information Modeling: Why? What? How? *In*: BORRMANN, A.; KÖNIG, M., *et al* (Ed.). **Building Information Modeling - Technology Foundations and Industry Practice**: Springer, 2018.

BRAUN, A.; BORRMANN, A. Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning. **Automation in Construction**, 106, 2019.

BRAUN, A.; TUTTAS, S.; BORRMANN, A.; STILLA, U. Improving progress monitoring by fusing point clouds, semantic data and computer vision. **Automation in Construction**, 116, 2020.

BRAUN, A.; TUTTAS, S.; STILLA, U.; BORRMANN, A. BIM-Based Progress Monitoring. *In*: BORRMANN, A.; KÖNIG, M., *et al* (Ed.). **Building Information Modeling - Technology Foundations and Industry Practice** Springer, 2018.

BUILDER, H. **See Your Jobsite In 360°**. <https://www.holobuilder.com>, 2021. Acesso em: 19/10/2021.

CALANTROPIO, A.; CHIABRANDO, F.; EINAUDI, D.; LOSÈ, L. T. 360° IMAGES FOR UAV MULTISENSOR DATA FUSION: FIRST TESTS AND RESULTS. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XLII-2/W13, 2019.

CAMPOSANO, J. C.; SMOLANDER, K.; RUIPPPO, T. Seven Metaphors to Understand Digital Twins of Built Assets. **IEEE Access**, 9, p. 27167-27181, 2021.

CHOO, H.; TOMMELEIN, I.; BALLARD, G. WorkPlan: Constraint-Based Database for Work Package Scheduling. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 125, n. 3, pp. 151-160, May-Jun, 1999.

CORREA, F. R. Cyber-Physical Systems for Construction Industry. *In*: 2018 **IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)**, 2018, St. Petersburg. p. 392-397. DOI:

10.1109/ICPHYS.2018.8387690.

CROWTHER, J.; AJAYI, S. O. Impacts of 4D BIM on construction project performance. **International Journal of Construction Management**, 2019.

DEMING, W. E. **Out of the crisis**. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Educational Services 1982.

DLESK, A.; VACH, K.; HOLUBEC, P. ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF LOW-COST PHOTOGRAMMETRY FOR INTERIOR MAPPING. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XLII-5/W3, 2019.

DUARTE-VIDAL, L.; HERRERA, R. F.; ATENCIO, E.; MUÑOZ-LA RIVERA, F. Interoperability of Digital Tools for the Monitoring and Control of Construction Projects. **Applied Sciences**, 11, 2021.

EKANAYAKE, B.; WONG, J. K.-W.; FINI, A. A. F.; SMITH, P. Computer vision-based interior construction progress monitoring: A literature review and future research directions. **Automation in Construction**, 127, 2021.

ELTNER, A.; SOFIA, G. Structure from motion photogrammetric technique *In*: TAROLLI, P. e MUDD, S. M. (Ed.). **Remote Sensing of Geomorphology**, 2020. v. 23, cap. 1, p. 1-24.

FANGI, G.; PIERDICCA, R.; STURARI, M.; MALINVERNI, E. S. IMPROVING SPHERICAL PHOTOGRAMMETRY USING 360 OMNI-CAMERAS: USE CASES AND NEW APPLICATIONS. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XLII-2, 2018.

FIREMAN, M.T. **Proposta de método de controle integrado produção e qualidade, com ênfase na medição de perdas por making-do e retrabalho**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

FORMOSO, C. T.; BØLVIKEN, T.; VIANA, D. D. Understanding waste in construction. *In*: TZORTZOPOULOS, P.; KAGIOGLOU, M., *et al* (Ed.). **Lean Construction - Core Concepts and New Frontiers**. London and New York: Routledge, 2020.

FORMOSO, C. T.; SANTOS, A. D.; POWELL, J. A. AN EXPLORATORY STUDY ON THE APPLICABILITY OF PROCESS TRANSPARENCY IN CONSTRUCTION SITES. **Journal of Construction Research**, 3, p. 35-54, 2002.

FOSTER, S.; HALBSTEIN, D. **Integrating 3D Modeling, Photogrammetry and Design**. Rochester, NY: Springer, 2014. (SpringerBriefs in Computer Science).

FREIMUTH, H.; KÖNIG, M. A Framework for Automated Acquisition and Processing of As-Built Data with Autonomous Unmanned Aerial Vehicles. **Sensors**, 19, 2019.

GHEISARI, M.; COSTA, D. B.; IRIZARRY, J. Unmanned Aerial System applications in construction. *In*: SAWHNEY, A.; RILEY, M., *et al* (Ed.). **Construction 4.0 - An Innovation Platform for the Built Environment**. London and New York: Routledge, 2020.

GOLPARVAR-FARD, M.; PEÑA-MORA, F.; SAVARESE, S. Automated Progress Monitoring Using Unordered Daily Construction Photographs and IFC-Based Building Information Models **Journal of Computing in Civil Engineering**, 29, n. 1, 2015.

GROSSKOPF, G. G.; HERDEN, Y. S.; SILVA, R. F. T.; MARCHIORI, F. F. A fotografia 360 graus como ferramenta de suporte à modelagem de as built. **Pesquisa em**

Arquitetura e Construção, 10, 2019.

HAMLEDARI, H.; MCCABE, B.; DAVARI, S. Automated computer vision-based detection of components of under-construction indoor partitions **Automation in Construction**, 74, p. 79-94, 2017.

HAN, K.; DEGOL, J.; GOLPARVAR-FARD, M. Geometry- and Appearance-Based Reasoning of Construction Progress Monitoring. **Journal of Construction Engineering and Management**, 144, n. 2, 2018.

HE, R.; LI, M.; GAN, V. J. L.; MA, J. BIM-enabled computerized design and digital fabrication of industrialized buildings: A case study **Journal of Cleaner Production**, 278, 2021.

HEVNER, A. R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. Design Science in Information Systems Research. **MIS Quarterly**, 28, p. 75-105, 2004.

HOLDENER, D.; NEBIKER, S.; BLASER, S. DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A NOVEL PORTABLE 360° STEREO CAMERA SYSTEM WITH LOW-COST ACTION CAMERAS **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XLII-2/W8, p. 105–110, 2017.

KAN, C.; ANUMBA, C. J. Digital Twins as the Next Phase of Cyber-Physical Systems in Construction. *In: Computing in Civil Engineering*, 2019, Atlanta, Georgia. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482438.033>.

KARMAKAR, A.; DELHI, V. S. K. Construction 4.0: what we know and where we are headed? **Journal of Information Technology in Construction (ITcon)**, 26, 2021.

KHAJAVI, S. H.; MOTLAGH, N. H.; JARIBION, A.; WERNER, L. C. *et al.* Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings **IEEE Access**, 7, 2019.

KIELHAUSER, C.; MANZANO, R. R.; HOFFMAN, J. J.; ADEY, B. T. Automated Construction Progress and Quality Monitoring for Commercial Buildings with Unmanned Aerial Systems: An Application Study from Switzerland **Infrastructures**, 5, 2020.

KIM, S.; KIM, S.; LEE, D.-E. Sustainable Application of Hybrid Point Cloud and BIM Method for Tracking Construction Progress. **Sustainability**, 12, 2020.

KLINC, R.; TURK, Ž. Construction 4.0 - Digital transformation of one of the oldest industries. **Economic and business review**, 21, p. 393-410, 2019.

KOPSIDA, M.; BRILAKIS, I. Real-Time Volume-to-Plane Comparison for Mixed Reality-Based Progress Monitoring **Journal of Computing in Civil Engineering**, 34, n. 4, 2020.

KOSKELA, L. **Application of the New Production Philosophy to Construction**. VTT Building Technology. Finland. 1992.

KRITZINGER, W.; KARNER, M.; TRAAR, G.; HENJES, J. *et al.* Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. **IFAC-PapersOnLine**, 51, n. 11, p. 1016-1022, 2018/01/01/ 2018.

KROPP, C.; KOCH, C.; KÖNIG, M. Interior construction state recognition with 4D BIM registered image sequences. **Automation in Construction**, 86, p. 11 - 32, 2018.

KROPP, C.; KOCH, C.; KÖNIG, M.; BRILAKIS, I. A framework for automated delay prediction of finishing works using video data and BIM-based construction simulation.

In: 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, 2012, Moscow, Russia.

KVAN, T. Collaborative design: what is it? **Automation in Construction**, 9, p. 409–415, 2000.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, 20, p. 741-761, 2013.

LAUFER, A.; HOWELL, G. A. Construction planning: revising the paradigm. **Project Management Journal**, 24, p. 23-33, 1993.

LIMA, J. N.; ALMEIDA, G. G.; ULHÔA, C. G.; BRANDSTETTER, M. C. G. D. O. Análise do risco relacionado à falta de terminalidade de serviços em uma obra residencial. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO 2021, Maceió, Alagoas.*

LIN, J. J.; GOLPARVAR-FARD, M. Construction Progress Monitoring Using Cyber-Physical Systems. *In: ANUMBA, C. J. e ROOFIGARI-ESFAHAN, N. (Ed.). Cyber-Physical Systems in the Built Environment.* Cham, Switzerland: Springer Nature, 2020a.

LIN, J. J.; GOLPARVAR-FARD, M. Visual and virtual progress monitoring. *In: SAWHNEY, A.; RILEY, M., et al (Ed.). Construction 4.0 - An Innovation Platform for the Built Environment.* London and New York: Routledge, 2020b.

LLC, A. **Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.6.** 2020.

LOSÈ, L. T.; CHIABRANDO, F.; TONOLO, F. G. Documentation of Complex Environments Using 360° Cameras. The Santa Marta Belltower in Montanaro. **Remote Sensing**, 13, n. 3633, 2021.

LU, Q.; XIE, X.; PARLIKAD, A. K.; SCHOOLING, J. M. *et al.* Moving from building information models to digital twins for operation and maintenance. **Smart Infrastructure and Construction**, 172, n. 2, 2020.

MAHAMI, H.; NASIRZADEH, F.; AHMADABADIAN, A. H.; NAHAVANDI, S. Automated Progress Controlling and Monitoring Using Daily Site Images and Building Information Modelling **Buildings**, 9, n. 3, 2019.

MAHMOOD, B.; HAN, S.; LEE, D.-E. BIM-Based Registration and Localization of 3D Point Clouds of Indoor Scenes Using Geometric Features for Augmented Reality. **Remote Sensing**, 12, 2020.

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, 15, p. 251-266, 1995.

MARIANI, C. A. Método PDCA e ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos industriais: um estudo de caso. **Revista de Administração e Inovação**, 2, p. 110-126, 2005.

MASOOD, M. K.; AIKALA, A.; SEPPÄNEN, O.; SINGH, V. Multi-Building Extraction and Alignment for As-Built Point Clouds: A Case Study with Crane Cameras. **Frontiers in Built Environment**, 6, 2020.

MATTOS, A. D. **Planejamento e Controle de Obras.** São Paulo: Pini, 2010.

MCCABE, B. Y.; HAMLEDARI, H.; SHAHI, A.; ZANGENEH, P. *et al.* Roles, Benefits,

and Challenges of Using UAVs for Indoor Smart Construction Applications *In: ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering 2017*, 2017, Seattle, Washington.

MCHUGH, K.; KOSKELA, L.; TEZEL, A. Reality Capture Connecting Project Stakeholders. *In: 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 2021, Lima, Peru. p. 737–746. DOI: doi.org/10.24928/2021/0148.

MEISELS, M. **Midyear 2020 engineering and construction industry outlook**. Deloitte. 2020.

MICROSOFT. **Microsoft Project**. <https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/project/project-management>. Acesso em: 27/01/2021.

NARUMI, T.; AOKI, S.; MURAMATSU, F. Indoor Visualization Experiments at Building Construction Site using High Safety UAV *In: 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2019, Banff Alberta, Canada.

NOCERINO, E.; STATHOPOULOU, E. K.; RIGON, S.; REMONDINO, F. Surface Reconstruction Assessment in Photogrammetric Applications. **Sensors**, 20, 2020.

OCULO. **The easiest way to digitize your construction site**. <https://oculo.ai/>, 2021. Acesso em: 19/10/2021.

OMAR, T.; NEHDI, M. L. Data acquisition technologies for construction progress tracking. **Automation in Construction**, 70, p. 143-155, 2016.

ONSITEIQ. **See your construction site**. <https://www.onsiteiq.io/>, 2021. Acesso em: 19/10/2021.

OPENSOURCE. **Your jobsite, fully captured. Just tap record and go**. <https://www.openspace.ai/>, 2021. Acesso em: 19/10/2021.

PAN, Y.; ZHANG, L. A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management. **Automation in Construction**, 124, 2021a.

PAN, Y.; ZHANG, L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends **Automation in Construction**, 122, 2021b.

PANERU, S.; JEELANI, I. Computer vision applications in construction: Current state, opportunities & challenges. **Automation in Construction**, 132, 2021.

PARK, J.; CAI, H.; PERISSIN, D. Bringing Information to the Field: Automated Photo Registration and 4D BIM **Journal of Computing in Civil Engineering** 32, n. 2, 2018.

PICO, W. J. D. **Project Control - Integrating Cost and Schedule in Construction**. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013.

PISHDAD-BOZORGI, P.; GAO, X.; SHELDEN, D. R. Introduction to cyber-physical systems. *In: SAWHNEY, A.; RILEY, M., et al (Ed.). Construction 4.0 - An Innovation Platform for the Built Environment*: Routledge, 2020. p. 23-41.

PURI, N.; TURKAN, Y. Bridge construction progress monitoring using lidar and 4D design models. **Automation in Construction**, 109, 2020.

RAHIMIAN, F. P.; SEYEDZADEH, S.; OLIVER, S.; RODRIGUEZ, S. *et al*. On-demand monitoring of construction projects through a game-like hybrid application of BIM and machine learning **Automation in Construction**, 110, 2020.

RECONSTRUCT. **The leader in remote quality control and progress monitoring.** <https://reconstructinc.com/>, 2021. Acesso em: 19/10/2021.

REMONDINO, F.; NOCERINO, E.; TOSCHI, I.; MENNA, F. A CRITICAL REVIEW OF AUTOMATED PHOTOGRAMMETRIC PROCESSING OF LARGE DATASETS **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XLII-2/W5, 2017.

ROH, S.; AZIZ, Z.; PEÑA-MORA, F. An object-based 3D walk-through model for interior construction progress monitoring. **Automation in Construction**, 20, p. 66-75, 2011.

ROLLE, R.; MARTUCCI, V.; GODOY, E. Architecture for Digital Twin implementation focusing on Industry 4.0. **IEEE Latin America Transactions**, 18, p. 889-898, 2020.

SACKS, R.; BRILAKIS, I.; PIKAS, E.; XIE, H. S. *et al.* Construction with digital twin information systems. **Data-Centric Engineering**, 1, 2020.

SACKS, R.; EASTMAN, C.; LEE, G.; TEICHOLZ, P. **BIM Handbook - A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers.** John Wiley & Sons, 2018.

SALEHI, S. A.; YITMEN, İ. Modeling and analysis of the impact of BIM-based field data capturing technologies on automated construction progress monitoring **International Journal of Civil Engineering**, 16, p. 1669–1685, 2018.

SAWHNEY, A.; RILEY, M.; IRIZARRY, J. Construction 4.0: Introduction and overview. *In*: SAWHNEY, A.; RILEY, M., *et al* (Ed.). **Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment**, 2020.

SEPASGOZAR, S. M. E. Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. **Buildings**, 11, 2021.

SOMMER, L.; FORMOSO, C. T.; VIANA, D. D. Novas Categorias de Perdas e sua Incidência em Sistemas Industrializados na Habitação. *In*: SERRA, S. M. B.; COSTA, D. B., *et al* (Ed.). **Tecnologias para Canteiro de Obras Sustentável.** São Carlos: FINEP, 2017.

STRUCTIONSITE. **View the jobsite status from anywhere, at anytime.** <https://structionsite.com/>, 2021. Acesso em: 19/10/2021.

SUBRAMANIAN, P.; GHEISARI, M., 2019, Denver, Colorado. **Using 360-Degree Panoramic Photogrammetry and Laser Scanning Techniques to Create Point Cloud Data: A Comparative Pilot Study.**

TAGLIABUE, L. C.; CECCONI, F. R.; MALTESE, S.; RINALDI, S. *et al.* Leveraging Digital Twin for Sustainability Assessment of an Educational Building **Sustainability**, 13, 2021.

TAO, F.; QI, Q.; WANGB, L.; NEE, A. Y. C. Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. **Engineering**, 5, p. 653–661, 2019.

TAO, F.; SUI, F.; LIU, A.; QI, Q. *et al.* Digital twin-driven product design framework. **International Journal of Production Research**, 57, p. 3935-3953, 2018.

TEMPLIN, T.; POPIELARCZYK, D. The Use of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicles in the Process of Building Models for Cultural Tourism, 3D Web and Augmented/Mixed

Reality Applications. **Sensors**, 20, 2020.

TURNER, C. J.; OYEKAN, J.; STERGILOULAS, L.; GRIFFIN, D. Utilizing Industry 4.0 on the Construction Site: Challenges and Opportunities. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 17, p. 746-756, 2021.

TUTTAS, S.; BRAUN, A.; BORRMANN, A.; STILLA, U. Acquisition and Consecutive Registration of Photogrammetric Point Clouds for Construction Progress Monitoring Using a 4D BIM. **Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science**, 85, p. 3-15, 2017.

ULHÔA, U. G. **Proposição de Diretrizes Focadas na Gestão para Melhorias no Controle de Prazo de Construção de Empreendimentos - Estudo de Caso em Obras da Região de Brasília-DF e Goiânia-GO**. 2012. (Doutorado) -, Universidade de Brasília, Brasília-DF.

UM, J.-S. **Drones as Cyber-Physical Systems: Concepts and Applications for the Fourth Industrial Revolution**. Springer, Singapore, 2019. 274 p.

VAIDYANATHAN, K.; VARGHESE, K.; DEVKAR, G. Cloud-based collaboration and project management. *In*: SAWHNEY, A.; RILEY, M., *et al* (Ed.). **Construction 4.0 - An Innovation Platform for the Built Environment**: Routledge, 2020. cap. 19.

WERKEMA, C. **Ferramentas estatísticas básicas do lean seis sigma integradas ao PDCA e DMAIC**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

XUE, J.; HOU, X.; ZENG, Y. Review of Image-Based 3D Reconstruction of Building for Automated Construction Progress Monitoring. **Applied Sciences**, 11, n. 7840, 2021.

ZHAO, J.; PIKAS, E.; SEPPÄNEN, O.; PELTOKORPI, A. Using Real-Time Indoor Resource Positioning to Track the Progress of Tasks in Construction Sites. **Frontiers in Built Environment**, 7, 2021-April-29 2021. Original Research.

ZHUANG, C.; MIAO, T.; LIU, J.; XIONG, H. The connotation of digital twin, and the construction and application method of shop-floor digital twin. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, 68, 2021.

APÊNDICE

APÊNDICE 1 - Checklist para missão com RPA e cadastro de dados do voo (DJI Phantom)

Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Escola Politécnica - Departamento de Construções e Estruturas
Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das Construções (GETEC)
Parceria: Georgia Institute of Technology



Checklist para Missão com RPA Modelo DJI Phantom e Cadastro de Dados do Voo

Cadastro de Dados do Voo	Voo		
	Bateria 1	Bateria 2	Bateria 3
Data			
Localização			
Ponto de decolagem/pouso			
Condições climáticas			
Modalidade de voo (manual ou autônoma)			
Nome do piloto			
Observadores			
Objetivo do voo			
Horário de início			
Horário de término			

Itens do Checklist para Missão com RPA	Bateria 1	Bateria 2	Bateria 3
A) Checklist de Pré-voo			
1. Ligar roteador (tablet ou celular)	<input type="checkbox"/>		
2. Ligar controle remoto	<input type="checkbox"/>		
3. Levantar antenas	<input type="checkbox"/>		
4. Conectar cabo USB	<input type="checkbox"/>		
5. Encaixar hélices	<input type="checkbox"/>		
6. Remover proteção da câmera	<input type="checkbox"/>		
7. Inserir bateria na aeronave e ligar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Colocar a aeronave em lugar aberto e seguro para a decolagem e para que ela possa retomar a localização se a função "return to home" for acionada	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Ligar aplicativo de controle (DJI go, Pix4D Capture, ...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. Número de satélites			
11. Nível de bateria no início e fim do voo (%)			
12. Verificar a indicação de "safe to fly" no aplicativo de controle (DJI go)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Itens do Checklist para Missão com RPA	Bateria 1	Bateria 2	Bateria 3
13. Para missão autônoma: programar parâmetros de voo e colocar controle no F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14. Iniciar a missão (decolar)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

E) Checklist de pré-pouso - Voo autônomo	Bateria 1	Coment.	Bateria 2	Coment.	Bateria 3	Coment.
1. Após o término do <i>grid</i> , acompanhar o retorno da aeronave ao <i>Home Point</i> , assumindo o controle manual em caso de qualquer interferência	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
2. Retomar o controle manual da aeronave para pouso - Colocar controle remoto na posição manual (posição P)	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
3. Pousar a aeronave manualmente em local aberto e seguro	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	

F) Checklist para Fim da Missão	Bateria 1	Bateria 2	Bateria 3
1. Pousar em local aberto e seguro	<input type="checkbox"/>		
2. Desligar bateria da aeronave	<input type="checkbox"/>		
3. Desligar controle remoto	<input type="checkbox"/>		
4. Desligar roteador (tablet ou celular)	<input type="checkbox"/>		
5. Remover bateria da aeronave	<input type="checkbox"/>		
6. Remover hélices	<input type="checkbox"/>		
7. Colocar proteção da câmera	<input type="checkbox"/>		
8. Guardar todos os equipamentos e acessórios na caixa	<input type="checkbox"/>		

APÊNDICE 2 - Checklist para captura de imagens com câmera 360° em ambientes internos da obra para fins de fotogrametria

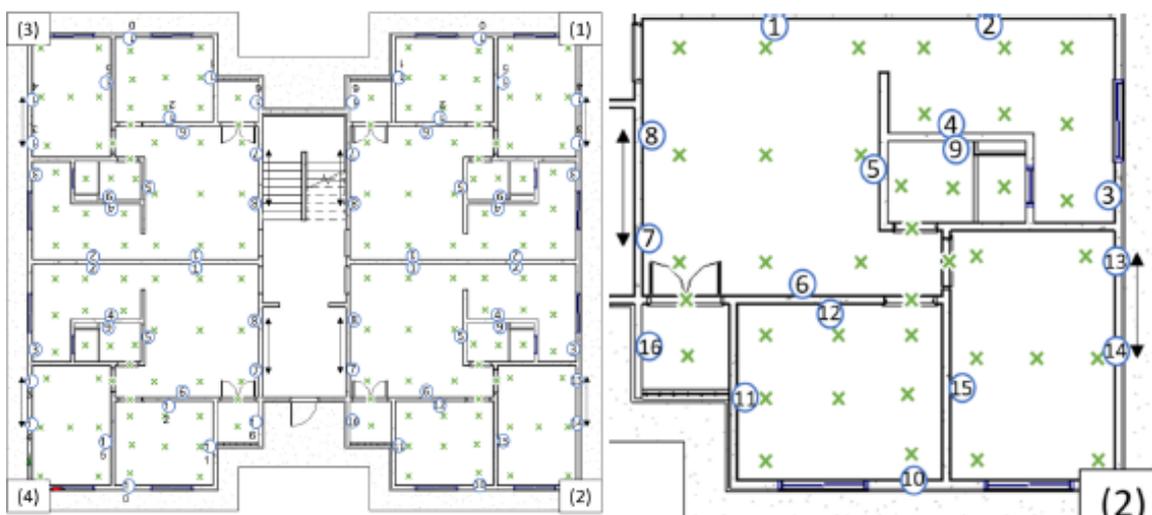
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Escola Politécnica - Departamento de Construções e Estruturas
Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das Construções (GETEC)



Checklist para Captura de Imagens com Câmera 360° para Fotogrametria e Cadastro de Dados da Coleta

Cadastro de Dados	Bloco:			
	Apto.: _____	Apto.: _____	Apto.: _____	Apto.: _____
Data				
Obra				
Horário de início - setup				
Horário de término - setup				
Número de marcadores				
Modo de captura				
Horário de início - coleta				
Horário de término - coleta				
Número de fotos				
Itens do Checklist				
1. Colocar marcadores no ambiente	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Medir distância de referência	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Ligar a câmera	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Conectar câmera ao aplicativo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Colocar câmera no capacete virada para trás	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Escolher modo de captura no aplicativo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Fazer o percurso	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Revisado em 13/09/2021



APÊNDICE 3 – Planilhas utilizadas para cadastro de dados da coleta de fotografias 360° em ambientes internos da obra

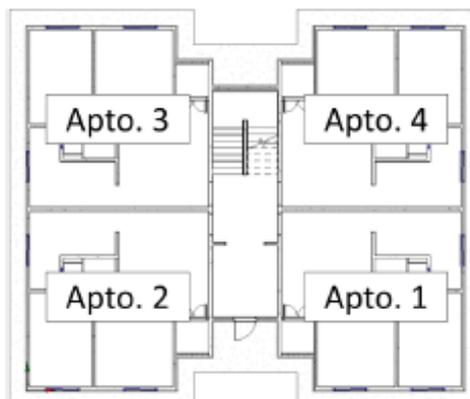
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
 Escola Politécnica - Departamento de Construções e Estruturas
 Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das Construções (GETEC)



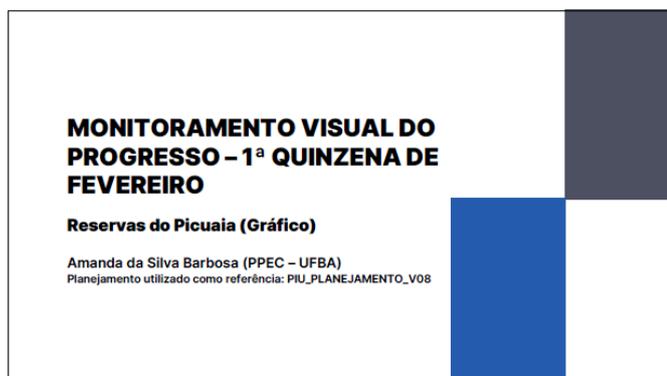
Cadastro de Dados da Coleta de Imagens com Câmera 360°

Obra					
Data	Bloco: _____				
Cadastro de Dados	Térreo	1° Pav.	2° Pav.	3° Pav.	4° Pav.
	Apto.: ____	Apto.: ____	Apto.: ____	Apto.: ____	Apto.: ____
Modo de captura					
Horário de início - coleta					
Horário de término - coleta					
Número de fotos					
Cadastro de Dados	Bloco: _____				
	Térreo	1° Pav.	2° Pav.	3° Pav.	4° Pav.
	Apto.: ____	Apto.: ____	Apto.: ____	Apto.: ____	Apto.: ____
Modo de captura					
Horário de início - coleta					
Horário de término - coleta					
Número de fotos					
Cadastro de Dados	Bloco: _____				
	Térreo	1° Pav.	2° Pav.	3° Pav.	4° Pav.
	Apto.: ____	Apto.: ____	Apto.: ____	Apto.: ____	Apto.: ____
Modo de captura					
Horário de início - coleta					
Horário de término - coleta					
Número de fotos					

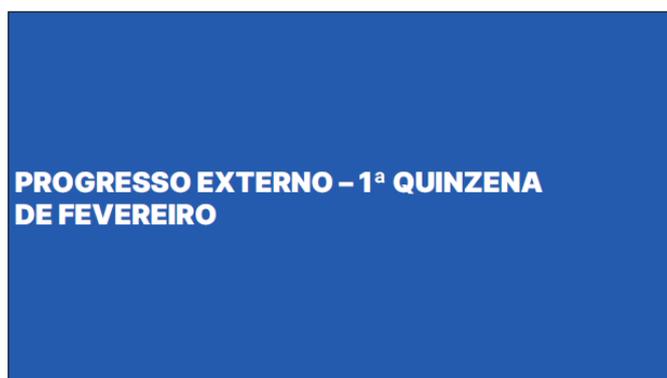
Revisado em 09/02/2022



APÊNDICE 4 – Exemplo de relatório de progresso e terminalidade desenvolvido e enviado à Obra B



1



2



3



4

**PROGRESSO EXTERNO REAL EM ORTOFOTO POR DRONE –
10/02/2022**



5

**PROGRESSO INTERNO – 2ª QUINZENA
DE JANEIRO**

6

BLOCO 11 – TÉRREO - 10/02/2022

Apartamento 2 (cozinha)



Progresso planejado (BIM 4D)



Progresso real (foto 360°)



Atividades atrasadas:
Tratamento de fissuras com selante acrílico e massa pva int. e massa acrílica ext.
Aplicação de selador e textura acrílicos nas paredes internas
Pintura com tinta látex (paredes internas)
Assentamento de pisos/soleiras/filetes/rodapés/Cerâmica de Parede
Esquadrias de alumínio e de madeira

7

BLOCO 12 – TÉRREO- 10/02/2022

Apartamento 1 (cozinha)



Progresso planejado (BIM 4D)



Progresso real (foto 360°)



Atividades atrasadas:
Impermeabilização de Áreas Molhadas Internas
Chapisco interno
Contrapiso

8

BLOCO 13 – TÉRREO - 10/02/2022
Apartamento 1 (cozinha)

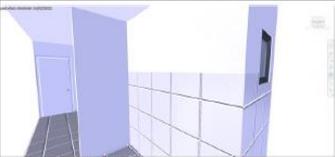


Progresso planejado (BIM 4D)	Progresso real (foto 360°)
	
<p>Atividades atrasadas: Tratamento interno/Reboco e reenquadramento dos vãos Contrapiso Chapisco Interno Impermeabilização de Áreas Molhadas Internas</p>	

9

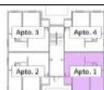
BLOCO 18 – TÉRREO - 10/02/2022
Apartamento 4 (cozinha)



Progresso planejado (BIM 4D)	Progresso real (foto 360°)
	
<p>Atividades atrasadas: Aplicação de selador e textura acrílicos nas paredes internas Pintura com tinta látex (paredes internas) Assentamento de pisos/soleiras/filetes/rodapés/Cerâmica de Parede Esquadrias metálicas e de madeira</p>	

10

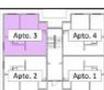
BLOCO 19 – TÉRREO - 10/02/2022
Apartamento 1 (cozinha)



Progresso planejado (BIM 4D)	Progresso real (foto 360°)
	
<p>Atividades atrasadas: Contrapiso Chapisco interno Gesso corrido nas paredes Aplicação de selador e textura acrílicos nas paredes internas Assentamento de pisos/soleiras/filetes/rodapés/Cerâmica de Parede Assentamento de esquadrias de alumínio</p>	

11

BLOCO 20 – TÉRREO - 10/02/2022
Apartamento 3 (cozinha)



Progresso planejado (BIM 4D)	Progresso real (foto 360°)
	
<p>Atividades atrasadas: Tratamento interno/Reboco e reenquadramento dos vãos Contrapiso Assentamento de pisos/soleiras/filetes/rodapés/Cerâmica de Parede Chapisco interno Gesso corrido nas paredes Impermeabilização de Áreas Molhadas Internas</p>	

12

LINKS PARA ACESSO ÀS FOTOGRAFIAS 360° INTERNAS – 10/02/2022

- [Bloco 11](#)
- [Bloco 12](#)
- [Bloco 13](#)
- [Bloco 18](#)
- [Bloco 19](#)
- [Bloco 20](#)

13

TERMINALIDADE DAS ATIVIDADES

14

SERVIÇOS A SEREM CONCLUÍDOS				
Nº	LOCAL	DESCRIÇÃO	DATA DA FOTO EM QUE FOI IDENTIFICADO	LINK PARA A FOTO (clicar na imagem)
1	Bloco 11 Térreo Hall	Local sem gesso na lateral da parede	20/01/2022	
2	Bloco 18 Térreo Apartamento 4 Sala	Retocar gesso na parede	27/01/2022	
3	Bloco 13 Térreo Apartamento 1 Sala	Furos na parede a serem tampados	03/02/2022	

15

SERVIÇOS A SEREM CONCLUÍDOS				
Nº	LOCAL	DESCRIÇÃO	DATA DA FOTO EM QUE FOI IDENTIFICADO	LINK PARA A FOTO (clicar na imagem)
4	Bloco 13 Térreo Apartamento 1 Cozinha	Furos na parede a serem tampados	03/02/2022	
5	Bloco 20 Pavimento 2 Apartamento 3 Cozinha	Rasgos na parede no local das tubulações	03/02/2022	
6	Bloco 20 Pavimento 3 Apartamento 1 Cozinha	Rasgos na parede no local das tubulações	03/02/2022	

16

SERVIÇOS A SEREM CONCLUÍDOS				
Nº	LOCAL	DESCRIÇÃO	DATA DA FOTO EM QUE FOI IDENTIFICADO	LINK PARA A FOTO (clicar na imagem)
7	Bloco 11 Pavimento 1 Apartamento 3 Cozinha	Local sem gesso acima da cerâmica de parede	10/02/2022	
8	Bloco 12 Térreo Apartamento 1 Cozinha	Rasgo na laje para passagem de tubos	10/02/2022	
9	Bloco 12 Pavimento 1 Apartamento 3 Sala	Concreto escureado na parede	10/02/2022	

17

SERVIÇOS A SEREM CONCLUÍDOS				
Nº	LOCAL	DESCRIÇÃO	DATA DA FOTO EM QUE FOI IDENTIFICADO	LINK PARA A FOTO (clicar na imagem)
10	Bloco 12 Pavimento 3 Apartamento 2 Cozinha	Buraco na parede a ser tampado	10/02/2022	
11	Bloco 20 Pavimento 1 Hall	Rasgo na parede para passagem de condute	10/02/2022	

18



19

APÊNDICE 5 – Versão completa do protocolo de entrevista para avaliação do método proposto

Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Escola Politécnica - Departamento de Construções e Estruturas
Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das Construções (GETEC)



Roteiro para avaliação do método proposto para monitoramento visual do progresso de obras com uso de BIM, RPA e câmera 360°

Data da entrevista: __/__/__

Informações gerais do entrevistado

Nome do entrevistado: _____

Cargo ou função: _____

Tempo de atuação na construção civil: _____

Constructo: potencial de impactar na identificação e avaliação do progresso da obra

1.

Variáveis analisadas:

- *Avaliação visual do progresso real da obra com uso de RPA e câmera 360°*
- *Identificação e análise geral de desvios de progresso da obra*
- *Mitigação dos desvios negativos de progresso pelo planejamento e implementação de ações corretivas*

Indique, em sua opinião, o potencial do método de impactar na melhoria dos seguintes processos ligados ao monitoramento do progresso da obra:

Nível de potencial de impacto	
1	Muito baixo
2	Baixo
3	Moderado
4	Alto
5	Muito alto

Identificação e análise dos desvios de progresso

1 2 3 4 5

Planejamento de ações corretivas aos desvios negativos de progresso

1 2 3 4 5

Implementação e acompanhamento de ações corretivas aos desvios de progresso

1 2 3 4 5

Constructo: contribuição do método para a transparência

2.

Variáveis analisadas:

Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Escola Politécnica - Departamento de Construções e Estruturas
Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das Construções (GETEC)



- *Qualidade da comunicação do status do progresso a partir do uso de tecnologias de dados visuais*

Indique, em sua opinião, qual o nível de impacto dos seguintes produtos para a melhoria da comunicação do progresso da obra

Nível de potencial de impacto	
1	Muito baixo
2	Baixo
3	Moderado
4	Alto
5	Muito alto

Modelo BIM 4D do estado planejado

1 2 3 4 5

Fotografias externas coletadas por drone e nuvem de pontos externas do estado atual da obra

1 2 3 4 5

Fotografias 360° internas do estado atual da obra

1 2 3 4 5

Relatório de terminalidade dos serviços internos

1 2 3 4 5

3.

Variáveis analisadas:

- *Simplicidade e rapidez no entendimento das informações relacionadas ao progresso*

Indique, em sua opinião, qual o nível de simplicidade e rapidez no entendimento das informações relacionadas ao progresso da obra utilizando os seguintes produtos

Nível de simplicidade e rapidez	
1	Muito baixo
2	Baixo
3	Moderado
4	Alto
5	Muito alto

Modelo BIM 4D do estado planejado

1 2 3 4 5

Fotografias externas coletadas por drone e nuvem de pontos externas do estado atual da obra

1 2 3 4 5

Fotografias 360° internas do estado atual da obra

1 2 3 4 5

Relatório de terminalidade dos serviços internos

1 2 3 4 5

Constructo: utilidade do método proposto

4.

Variáveis analisadas:

- *Importância dos produtos do método para um monitoramento efetivo do progresso e tomada de decisão*

Indique, em sua opinião, qual o nível de importância dos seguintes produtos para o monitoramento efetivo do progresso da obra

Nível de importância	
1	Muito baixo
2	Baixo
3	Moderado
4	Alto
5	Muito alto

Modelo BIM 4D do estado planejado

1 2 3 4 5

Fotografias externas coletadas por drone e nuvem de pontos externas do estado atual da obra

1 2 3 4 5

Fotografias 360° internas do estado atual da obra

1 2 3 4 5

Relatório de terminalidade dos serviços internos

1 2 3 4 5

5.

Variáveis analisadas:

- *Adequação dos produtos do método às necessidades do monitoramento do progresso*

Indique, em sua opinião, qual o nível de adequação dos seguintes produtos associados ao método às necessidades do processo de monitoramento do progresso da obra

Nível de adequação	
1	Muito baixo
2	Baixo

Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Escola Politécnica - Departamento de Construções e Estruturas
Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das Construções (GETEC)



3	Moderado
4	Alto
5	Muito alto

Modelo BIM 4D do estado planejado

1 2 3 4 5

Fotografias externas coletadas por drone e nuvem de pontos externas do estado atual da obra

1 2 3 4 5

Fotografias 360° internas do estado atual da obra

1 2 3 4 5

Relatório de terminalidade dos serviços internos

1 2 3 4 5

6.

Variáveis analisadas:

- *Benefícios e dificuldades associados à implementação do método*

Na sua opinião, quais são os benefícios (pontos positivos) e dificuldades (pontos de melhoria) associados ao método proposto?

Benefícios	Dificuldades

Constructo: facilidade de adoção do método proposto

7.

Variáveis analisadas:

- *Facilidade de aplicação das atividades e produtos do método na obra estudada*

Indique, em sua opinião, qual o nível de facilidade de aplicação dos seguintes produtos associados ao método

Nível de facilidade de aplicação	
1	Muito baixo
2	Baixo

3	Moderado
4	Alto
5	Muito alto

Modelo BIM 4D do estado planejado

1 2 3 4 5

Fotografias externas coletadas por drone e nuvem de pontos externas do estado atual da obra

1 2 3 4 5

Fotografias 360° internas do estado atual da obra

1 2 3 4 5

Relatório de terminalidade dos serviços internos

1 2 3 4 5

8.

Variáveis analisadas:

- *Facilidade de integração entre os processos gerenciais da empresa e as atividades do método*

Acha que seria necessária alguma mudança de comportamento ou de processo na empresa para adoção do método? E quanto a adequações/ modificações no método proposto, sugeriria alguma para uma adaptação mais fácil do mesmo aos processos da empresa?

Constructo: generalização do método para outras empresas e contextos

10.

Variáveis analisadas:

- *Adaptação do método e das ferramentas propostas a obras de outras empresas e de outras tipologias*

O método e as ferramentas propostas podem ser facilmente adaptados para obras de outras empresas e tipologias?

Nível de concordância	
1	Muito baixo
2	Baixo

Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Escola Politécnica - Departamento de Construções e
Estruturas
Grupo de Pesquisa e Extensão em Gestão e Tecnologia das
Construções (GETEC)



3	Moderado
4	Alto
5	Muito alto

() 1

() 2

() 3

() 4

() 5