

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

ROGÉRIO PÜTEN SOUZA

**VARREDURA 3D DE BAIXA COMPLEXIDADE COM USO DE DISPOSITIVOS
MÓVEIS PARA APOIO AO ACOMPANHAMENTO DE OBRAS**

São Leopoldo

2020

ROGÉRIO PÜTEN SOUZA

**VARREDURA 3D DE BAIXA COMPLEXIDADE COM USO DE DISPOSITIVOS
MÓVEIS PARA APOIO AO ACOMPANHAMENTO DE OBRAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadores: Profa. Dra. Andrea Parisi Kern
Prof. Dr. Rafael Kunst

São Leopoldo
2020

FICHA CATALOGRÁFICA

S729v

Souza, Rogério Püten

Varredura 3D de baixa complexidade com uso de dispositivos móveis para apoio ao acompanhamento de obras / Rogério Püten Souza. – 2020.

117 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2020.

“Orientadora: Profa. Dra. Andrea Parisi Kern”

1. Engenharia Civil. 2. Varredura 3D. 3. Dispositivos móveis. 4. Fotogrametria digital. 5. Acompanhamento de obras. I. Título.

CDU 624

Catálogo na Fonte:

Mariana Dornelles Vargas – CRB 10/2145

ROGÉRIO PÜTEN SOUZA

**VARREDURA 3D DE BAIXA COMPLEXIDADE COM USO DE DISPOSITIVOS
MÓVEIS PARA APOIO AO ACOMPANHAMENTO DE OBRAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 07 de Janeiro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Andrea Parisi Kern – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Rafael Kunst – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Marco Aurélio Stumpf Gonzáles – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Dayana Bastos Costa – Universidade Federal da Bahia

Este trabalho é dedicado a meus filhos, João Pedro Pacheco Souza e Bernado Pacheco Souza, minha esposa Patrícia Pacheco Souza, minha irmã Lilia Püten Souza, minha sobrinha Camila Püten Souza Almeida, a minha prima irmã Magda Püten Dória, a meus falecidos pais Cirlei von der Püten Souza e Alfredo Alves de Souza e a meus falecidos irmãos Eliana Püten Souza, Elenara Püten Souza e Régis Püten Souza.

AGRADECIMENTOS

Aos bolsistas Nicholas, Ramiro e Vitor por todo o apoio recebido. Aos professores Marco Aurélio Stumpf González e Rafael Kunst. Aos colegas do grupo de orientação da professora Andrea, às secretárias do PPGEC Simone e Elisa, ao Eng. Tales Silva, Eng. Hugo Scipião Ferreira Neto, Eng. Henrique Burger, Eng. Márcio Fialho e Mestre Ribeiro.

E em especial à minha professora orientadora Andrea Parisi Kern, por toda sua motivação, empenho, apoio e disponibilidade.

RESUMO

A pesquisa buscou investigar técnicas de varredura 3D de baixa complexidade, em ambientes construídos e obras em andamento, utilizando câmeras de dispositivos móveis, em função de sua praticidade e facilidade de operação para auxiliar o controle e acompanhamento de execução de obra. Foram realizados dois experimentos e uma aplicação prática de técnicas de varredura 3D utilizando dispositivos móveis. No primeiro experimento foram realizadas técnicas de varredura 3D em um ambiente construído, utilizando *smartphone* e *tablet* munido de sensor de profundidade de luz estruturada infravermelho, onde foram comparadas à técnicas de medição tradicionais (trena laser e estação total). No segundo, foram realizadas vistorias em uma obra em andamento, captando imagens através de diferentes dispositivos móveis, e que através de técnicas de fotogrametria digital terrestre, foram geradas nuvens de pontos, que capturaram o cenário real da obra, em cada uma das visitas realizadas. As nuvens geradas foram analisadas levando em consideração sua qualidade visual, precisão e custo computacional de processamento. A aplicação prática se refere à utilização de varredura 3D para captura de realidade, gerando nuvens de pontos, que integradas ao modelo 3D BIM da obra, possibilitou medições de avanço de obras. O uso de Fotogrametria Digital Terrestre através de dispositivos móveis mostrou-se acessível à varredura 3D em canteiros de obras, não requer grande investimento em equipamentos e *softwares*, e se mostrou promissor para apoio à rotinas de acompanhamento de obras que não exijam dados com alto detalhamento e precisão dimensional, ou seja, varreduras 3D de baixa complexidade.

Palavras-chave: Engenharia Civil. Varredura 3D. Dispositivos Móveis. Fotogrametria Digital. Acompanhamento de obras.

ABSTRACT

The research sought to investigate techniques of 3D scanning of low complexity, in built environments and works in progress, using cameras of mobile devices, due to their practicality and ease of operation to assist the control and monitoring of work execution. Two experiments and a practical application of 3D scanning techniques were carried out using mobile devices. In the first experiment, 3D scanning techniques were performed in a built environment, using a smartphone and tablet with infrared structured light depth sensor, where they were compared to traditional measurement techniques (laser tape and total station). In the second, surveys were carried out on a work in progress, capturing images through different mobile devices, and that through digital terrestrial photogrammetry techniques, clouds of points were generated, which captured the real scenario of the work, in each of the visits made. The generated clouds were analyzed taking into account their visual quality, accuracy and computational cost of processing. The practical application refers to the use of 3D scanning for reality capture, generating point clouds, which integrated into the 3D BIM model of the work, allowed measurements of progress of works. The use of Digital Terrestrial Photogrammetry through mobile devices proved to be accessible to 3D scanning on construction sites, does not require great investment in equipment and software, and proved promising to support the monitoring routines of works that do not require data with high detail and dimensional accuracy, that is, low complexity 3D scans.

Keywords: *Civil Engineering. 3D Scanning. Mobile Devices. Digital Photogrammetry. Construction Monitoring.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Exemplo de aplicação do BIM 4D usado em conjunto com a visão computacional.	25
Figura 2 - Relações básicas de triangulação.....	34
Figura 3: Delineamento da pesquisa.....	40
Figura 4: Ambiente construído usado no experimento.....	43
Figura 5: Posição do tripé com sensor LEIV	44
Figura 6: Pontos de vista de coleta de fotos do processo de FDT	45
Figura 7: Maquete eletrônica da obra pesquisada.	47
Figura 8: Vista da obra na primeira vistoria.....	48
Figura 9: Foto com lente normal da câmera do Galaxy N10	49
Figura 10: Foto com lente angular tipo “olho de peixe” do Galaxy N10.....	49
Figura 11: Foto usando a lente normal da câmera nativa do dispositivo Xiaomi N6 .	50
Figura 12: Foto com lente angular adaptada ao dispositivo Xiaomi N6.....	50
Figura 13: Processo de tratamento e integração de nuvens de pontos de varredura 3D.....	52
Figura 14: Processo de avaliação das nuvens de pontos resultantes das varreduras 3D para cada amostra.....	53
Figura 15: Medida através da nuvem de varredura no 2º Pavimento.....	57
Figura 16: Medida do mesmo local da figura ao lado, porem através da nuvem de projeto	57
Figura 17: Nuvens de pontos sobrepostas.....	58
Figura 18: Gráfico das distâncias entre NPs	59
Figura 19 - Nuvem de pontos em uma única cor RGB (magenta).....	63
Figura 20 - Nuvem de pontos com textura real	63
Figura 21 - Tela da ferramenta “Fases” do <i>software</i> Revit utilizada para filtragem de visualização dos elementos.....	64
Figura 22 - A nuvem de pontos quando é inserida no arquivo do modelo BIM.	65
Figura 23 - Projeção do pilar da nuvem, inclinado em relação ao modelo BIM.....	66
Figura 24 – Seleção para alteração de fase de obra.....	66
Figura 25 – Apresentação do modelo com o filtro de fase acionado.....	67
Figura 26 – Filtro de fase acionado, realçando o projetado x executado	67

Figura 27 – Elementos sobrepostos à nuvem de pontos que tiveram sua fase alterada	68
Figura 28 - Viga prevista na nuvem de pontos que não foi incluída na fase de medição.....	69
Figura 29 - Distorções da nuvem de pontos em extremidades e cantos.....	70
Figura 30 - Uso da foto para dirimir dúvidas sobre distorções na nuvem de pontos.	70
Figura 31 - A nuvem resultante antes do reajustes no Cloud Compare.....	71
Figura 32 - A mesma nuvem após reajustes no Cloud Compare.....	71
Figura 33 - Nuvens de pontos, antes e depois dos ajustes no Cloud Compare	72
Figura 34 - Vista frontal da Caixa de Corte da vista 3D	72
Figura 35 - Vista superior da Caixa de Corte da vista 3D	72
Figura 36 - A nuvem indicando que ainda haviam lajes à medir no 3º Pavimento.	73
Figura 37 – Alteração da fase das lajes selecionadas	74
Figura 38 – Nuvem de pontos da Vistoria 4, antes e depois dos ajustes no Cloud Compare.....	75
Figura 39 - Croqui manual contendo as medidas obtidas com a trena laser.....	82
Figura 40 - Nuvem de pontos esparsa gerada pela estação total	82
Figura 41 - Malha triangular gerada pelo sensor LEIV	82
Figura 42 - Malha triangular gerada por FDT	82
Figura 43 - Malha triangular gerada por FDT no Regard 3D.....	83
Figura 44 - Malha triangular gerada por FDT no 3D Zephyr	83
Figura 45 - Comparativo Modelo 3D x Malha x Pontos 3D	83
Figura 46: Relatório do Notebook com tempo total de 36 minutos e 38 segundos ...	92
Figura 47: Relatório do Desktop com tempo total de 20 minutos e 22 segundos.....	92
Figura 48: Parte do relatório da ferramenta de avaliação do Índice de Qualidade de Imagem, relativo a Vistoria-04.....	93
Figura 49: Correlação Resolução x IANP.....	99
Figura 50: Correlação Resolução x EMQ.....	100
Figura 51: Correlação ING x IRC	100
Figura 52: Correlação ING x Distância Média entre Nuvens de Pontos.....	100
Figura 53: Correlação ING x Desvio Padrão Dist. Média NPs	101
Figura 54: Correlação IRC x EMQ.....	101
Figura 55: Correlação EMR x EMQ.....	101
Figura 56 - Filtro de fase = Nenhum, Fase = EXECUTADO até 21/08/20.....	104

Figura 57 - Filtro de fase = Executado, Fase = EXECUTADO até 21/08/20	104
Figura 58 - Filtro de fase = Executado, Fase = EXEC ATÉ 25/08/20.....	104
Figura 59 - Modelo resultante do avanço da estrutura até a Vistoria 3.	105
Figura 60 - Modelo 3D da estrutura produzida até a Vistoria 4.	105
Figura 61 - Listagem de quantitativos de lajes sem filtro de fase.	106
Figura 62 - Listagem de quantitativos de lajes com filtro de fase.	106
Figura 63 - Gráfico de evolução da estrutura de concreto ao longo das vistorias...	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Benefícios e limitações das técnicas de coleta de dados <i>As-Built</i>	30
Tabela 2: Identificação dos dispositivos usados.....	41
Tabela 3: Identificação dos <i>softwares</i> usados.....	41
Tabela 4: Identificação das variáveis da pesquisa e suas análises comparativas	60
Tabela 5: Análise descritiva dos dispositivos usados na pesquisa.....	76
Tabela 6: Comparativo Trena Laser x Estação Total para uma tolerância de 0,1 cm/m	84
Tabela 7: Comparativo LEIV x Estação Total para uma tolerância de 0,5 cm/m.....	85
Tabela 8: Comparativo FDT x Estação Total para uma tolerância de 0,5 cm/m	85
Tabela 9: Comparativo LEIV x Estação Total para uma tolerância de 1 cm por metro	86
Tabela 10: Comparativo FDT x Estação Total para uma tolerância de 1 cm por metro	86
Tabela 11: Comparativo LEIV x Estação Total para uma tolerância de 3 cm por metro	87
Tabela 12: Informações sobre o tempo de duração dos levantamentos	88
Tabela 13: Custos de aquisição dos equipamentos necessários aos sistemas de medição e varredura 3D (em maio/2020).....	89
Tabela 14: Classificação dos sistemas de acordo com o desempenho em cada uma das dimensões analisadas	90
Tabela 15: Amostras do experimento.....	91
Tabela 16: Determinação do fator de comparação entre <i>hardwares</i>	92
Tabela 17: Determinação do Tempo de Processamento por foto, usando o fator de comparação de <i>hardware</i> para fazer a compensação na Vistoria-01	93
Tabela 18: Apresentação dos resultados das variáveis Resolução e ING das imagens colhidas nas vistorias.....	93
Tabela 19: Determinação do Índice de Aproveitamento da Nuvem de Pontos	94
Tabela 20: Determinação do Índice de Registro do Cenário.....	94
Tabela 21: Comparativo de medidas de elementos isolados projeto x varredura e determinação dos Erros Médios (Relativos e Quadráticos)	95
Tabela 22: Apresentação das Distâncias entre NPs e Desvio Padrão.....	96
Tabela 23: Amostras e variáveis a serem analisadas	96

Tabela 24: Determinação de “outliers”	96
Tabela 25: Teste de Shapiro-Wilk – 1ª Rodada	97
Tabela 26: Teste de Shapiro-Wilk – 2ª Rodada	97
Tabela 27: Segunda verificação de “outliers”	98
Tabela 28: Teste de Shapiro-Wilk – 3ª Rodada	98
Tabela 29: Terceira verificação de “outliers”	98
Tabela 30: Teste de correlação r de Pearson	99
Tabela 31: Resultados dos testes de Correlações	102

LISTA DE SIGLAS

ABDI	Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial
AR	<i>Augmented Reality</i>
BEP	<i>Bim Execution Plan</i>
BIM	<i>Building Information Modelling</i>
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CCD	<i>Charge-Couple Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i>
CPD	Centro de Processamento de Dados
CVMS	<i>Clustering Views for Multiview Stereo</i>
DAT	<i>Database Format</i>
dF	Distância Focal
DSM	<i>Dense Stereo Matching</i>
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i>
EA	Erro Absoluto
EMQ	Erro Médio Quadrático
EMR	Erro Médio Absoluto
ER	Erro Relativo
EXIF	<i>Exchangeable Image File Format</i>
FTD	Fotogrametria Digital Terrestre
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
ING	Índice de Nitidez do Grupo
IPTU	Imposto Predial e Territorial Urbano
IQI	Índice de Qualidade de Imagens
IRC	Índice de Registro do Cenário
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LEIV	Luz Estruturada Infravermelho
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LIOP	<i>Local Intensity Order Patterns</i>
LOD	<i>Level of Development</i>

LOI	<i>Level of Information</i>
LPS	<i>Last Planner System</i>
MP	<i>Mega Pixel</i>
MVE	<i>Multi-View Environment</i>
NAICS	<i>North American Industry Classification System</i>
PAst	<i>Paleontological Statistics</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PLY	<i>Polygon File Format</i>
PMI	<i>Project Management Institute</i>
PP	Ponto Principal
PVMS	<i>Patch-based Views for Multiview Stereo</i>
RFID	<i>Radio-frequency Identification</i>
RGB	<i>Red Green Blue</i>
S2B	<i>Scan-to-BIM</i>
SfM	<i>Structure from Motion</i>
SMVS	<i>Shading-Aware Multi-View Stereo</i>
SSO	<i>Structure Sensor by Occipital</i>
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanner</i>
ToF	<i>Time of Flight</i>
TXT	<i>Text Format</i>
UIUC	<i>University of Illinois at Urbana-Champaign</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 TEMA	16
1.2 PROBLEMA	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivo Geral	20
1.3.2 Objetivos Específicos	20
1.4 JUSTIFICATIVA	20
2 ACOMPANHAMENTO DE OBRAS COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS	23
2.1 O BIM E ACOMPANHAMENTO DE OBRAS	23
2.2 VARREDURA 3D COM O USO DE DISPOSITIVOS MÓVEIS	29
3 METODOLOGIA	40
3.1 ETAPA 1: CONTEXTUALIZAÇÃO	41
3.2 ETAPA 2: INVESTIGAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO	42
3.2.1 Estudo comparativo entre sistemas de medição tradicionais e sistemas de varredura 3D	42
3.2.1.1 Levantamento com trena laser	43
3.2.1.2 Levantamento com Estação Total	43
3.2.1.3 Levantamento com Sensor de Projeção de Luz Estruturada Infravermelho (LEIV)	44
3.2.1.4 Levantamento com Fotogrametria Digital Terrestre (FTD)	45
3.2.1.5 Modelagem 3D a partir dos dados obtidos	45
3.2.2 Estudo de nuvens de pontos gerados a partir de diferentes dispositivos móveis em vistorias de acompanhamento de obras	46
3.2.2.1 Descrição da obra	47
3.2.2.2 Coleta de dados	48
3.2.2.3 Processamento dos dados através de DSM ou SfM	50
3.2.2.4 Análise estatística dos dados	60
3.3 ETAPA 3: APLICAÇÃO EM ROTINAS DE ACOMPANHAMENTO DE OBRAS ..	61
3.3.1 Vistoria 1: Integração da Nuvem de Pontos Resultante com o modelo BIM	63
3.3.2 Vistoria 2: Integração da Nuvem de Pontos com o modelo BIM	68

3.3.3 Vistoria 3: Integração da Nuvem de Pontos Resultante com o modelo BIM	71
3.3.4 Vistoria 4: Integração da Nuvem de Pontos Resultante com o modelo BIM	74
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	76
4.1 RESULTADOS DA ETAPA 1: CONTEXTUALIZAÇÃO	76
4.2 RESULTADOS DA ETAPA 2: INVESTIGAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO	81
4.2.1 Estudo comparativo entre sistemas de medição tradicionais e sistemas de varredura 3D	81
4.2.1.1 Precisão	83
4.2.1.2 Duração da operação (tempo)	87
4.2.1.3 Complexidade da operação	88
4.2.1.4 Logística para a realização dos levantamentos	89
4.2.1.5 Custo de aquisição dos equipamentos	89
4.2.1.6 Comparação entre os sistemas de medição e varredura 3D	90
4.2.2 Estudo de nuvens de pontos geradas em vistorias de acompanhamento de obra	91
4.3 RESULTADOS DA ETAPA 3: APLICAÇÃO EM ROTINAS DE ACOMPANHAMENTO DE OBRAS	103
4.3.1 Aplicação: Acompanhamento do avanço de obra de estrutura de concreto	103
5 DISCUSSÃO	108
5.1 DISCUSSÃO SOBRE O ESTUDO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS DE MEDIÇÃO TRADICIONAIS E SISTEMAS DE VARREDURA 3D	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
5.2 DISCUSSÃO SOBRE O ESTUDO DE NUVENS DE PONTOS GERADOS A PARTIR DE DIFERENTES DISPOSITIVOS MÓVEIS EM VISTORIAS DE ACOMPANHAMENTO DE OBRA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
5.3 DISCUSSÃO SOBRE A APLICAÇÃO EM ROTINAS DE ACOMPANHAMENTO DE OBRAS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
REFERÊNCIAS	112

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Modelos digitais são atualmente presentes em diversas áreas e estão se tornando cada vez mais populares, porém, os de maior complexidade e precisão requerem consideráveis esforços para utilização (REMONDINO, 2006). Na construção, através da fotogrametria digital com uso de dispositivos móveis, a própria equipe gestora da obra pode coletar fotos ao longo do processo construtivo e posteriormente processá-las no escritório (KLEIN; LI; BECERIK-GERBER, 2012), constituindo-se uma maneira precisa de acompanhamento da obra. Desta forma, além das imagens propriamente ditas, são obtidas nuvens de pontos tridimensionais (KHALLOUFI *et al.*, 2020) que poderão fornecer um leque muito maior de informações, bem como modelos 3D perpetuando o status da obra naquele instante. Nesse contexto, o emprego de varredura 3D em obras de construção pode atuar como importante fonte de evidências, em função da disponibilização de imagens, servindo como base de dados históricos ao longo do andamento de obras. Diferente da fotografia, comumente utilizada para registrar o acompanhamento de obras, a varredura 3D, através de fotogrametria digital, permite ajustar as imagens coletadas à plataforma BIM, facilitando o processamento digital das informações de execução do projeto, conferindo maior capacidade de armazenamento de informação.

A popularização do uso de *smartphones* e a adição de sensores diversos úteis à fotogrametria, que a cada ano estão mais avançados, menores, e com custo mais acessível, acabam gerando um cenário promissor para esta técnica e diversas pesquisas ao redor do mundo estão utilizando dispositivos móveis para varredura 3D, como Bhatla *et al.* (2012), Klein; Li; Becerik-Gerber (2012), Nocerino *et al.* (2017), Ravanelli; Lastilla; Crespi, (2017), Vinci *et al.*, (2017), Sadeq, (2018), Tavani *et al.*, (2019), Costantino; Pepe; Alfio, (2020), Khalloufi *et al.*, (2020), entre outros.

Nos últimos anos os processos de projeto, construção e gestão têm sido altamente beneficiados com a introdução de novas Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), na sua maioria baseadas em BIM (Building Information Modelling) (DEZEN-KEMPTER *et al.*, 2015), que consiste na modelagem da informação.

No Brasil, em maio de 2018, o decreto 9.377 instituiu a Estratégia Nacional de Disseminação do BIM e criou o Comitê Gestor da Estratégia BIM BR ("BRASIL- Decreto Nº 9.983", acessado em 28/08/2019), definindo BIM como "o conjunto de tecnologias e processos integrados que permite a criação, a utilização e a atualização de modelos digitais de uma construção, de modo colaborativo, de forma a servir a todos os participantes do empreendimento, potencialmente durante todo o ciclo de vida da construção".

De acordo com a cartilha elaborada pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), a Estratégia BIM BR pretende, até o final de 2028, atingir os seguintes resultados ("Estratégia BIM BR", acessado em 28/08/2019):

- Assegurar ganhos de produtividade ao setor de construção civil;
- Proporcionar ganhos de qualidade nas obras públicas;
- Aumentar a acurácia no planejamento de execução de obras
- Confiabilidade de cronogramas e orçamentação;
- Contribuir com ganhos em sustentabilidade por meio da redução de resíduos sólidos da construção civil;
- Reduzir prazos para conclusão de obras;
- Contribuir com a melhoria da transparência nos processos licitatórios;
- Reduzir necessidade de aditivos contratuais de alteração do projeto, de elevação de valor e de prorrogação de prazo de conclusão e de entrega da obra;
- Elevar o nível de qualificação profissional na atividade produtiva;
- Estimular a redução de custos existentes no ciclo de vida dos empreendimentos.
- Aumentar a produtividade das empresas em 10% (produção por trabalhador das empresas que adotarem o BIM)
- Reduzir custos em 9,7% (custos de produção das empresas que adotarem o BIM)
- Aumentar em 10 vezes a adoção do BIM (hoje 5% do PIB da Construção Civil adota o BIM, a meta é que 50% do PIB da Construção Civil adote o BIM)

- Elevar em 28,9% o PIB da Construção Civil (com a adoção do BIM, haveria um incremento no crescimento estimado do PIB no setor, se comparado ao status quo, considerando o somatório dos resultados esperados do setor entre 2018 e 2028).

Para alcançar estes resultados, a Estratégia BIM BR considera nove objetivos específicos que são: difundir o conceito BIM e seus benefícios; coordenar a estruturação do setor público para a adoção do BIM; criar condições favoráveis para o investimento público e privado em BIM; estimular a capacitação em BIM; propor atos normativos que estabeleçam parâmetros para as compras e as contratações públicas com uso do BIM; desenvolver normas técnicas, guias e protocolos específicos para a adoção do BIM; desenvolver a plataforma e a biblioteca nacional BIM; estimular o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias relacionadas ao BIM; incentivar a concorrência no mercado por meio de padrões neutros de interoperabilidade BIM.

Tendo em vista que o uso destas tecnologias ainda pode ser considerado como incipiente no dia a dia das obras brasileiras, principalmente em empreendimentos de médio e pequeno porte, entende-se que estudos voltados à investigação da utilidade das tecnologias para a melhoria da construção sejam muito oportunos, o que justifica a realização deste trabalho. Especialmente estudos voltados a empreendimentos nos quais a questão econômica é muito significativa, surgindo a necessidade de se buscar alternativas de baixo custo, insitgando o interesse e viabilizando pela inovação e pelo uso de novas tecnologias.

O termo varredura 3D, para muitos, remete à idéia de equipamentos caros (como laser scanners terrestres e VANTs) e investimentos pesados em treinamento de pessoal para operação. Porém, na percepção do autor desta pesquisa, existem alternativas acessíveis que, embora apresentem algumas deficiências quando comparados a sistemas mais caros, também podem atender algumas demandas importantes à gestão de obras de forma simples, ágil e viável (baixo custo).

Uma prática comum no acompanhamento de obras é o uso de fotografias como meio de evidenciar o acompanhamento de obras. Com o incremento da fotogrametria digital, como ferramenta de varredura 3D, pode-se ajustar estas imagens coletadas à plataforma BIM, facilitando o processamento digital de informações, trazendo maior capacidade e detalhamento as informações de obra. Utilizando *softwares* livres ou de baixo custo, e câmeras digitais de dispositivos

móveis, a operação torna-se simples e acessível, justificando seu uso em empreendimentos em canteiros de obras que não possuam ou não possam investir recursos significativos em tecnologia para acompanhamento de obra.

Se espera que este trabalho possa aproximar um pouco mais a realidade de canteiro de obras de pequenas e médias empresas brasileiras a estas tecnologias que apesar de não serem novas, estão se tornando cada vez mais acessíveis e inclusivas aos profissionais da construção em geral, além de prepará-los para novas demandas que irão surgindo ao longo dos anos.

1.2 PROBLEMA

Em um processo de tomada de decisão, as vantagens no uso da tecnologia da informação nos processos decisórios são muitas, representando um salto de qualidade e proporcionando um alto nível de confiança, maior agilidade e assertividade nas decisões. (BERNARDES, 2010).

Contudo, ao observar a rotina em canteiro de obras, se verifica que ainda é muito incipiente o uso de tecnologia da informação nas frentes de trabalho, que são os locais onde realmente é materializado o projeto. A distância entre o setor de projeto e a linha de produção, apesar de se ter tecnologia para uma aproximação cada vez maior, ainda apresenta barreiras de comunicação que mostram uma deficiência do mercado em conseguir absorver as novas tecnologias.

Para que sistemas de informações gerenciais sejam aplicados de forma eficaz, o monitoramento de indicadores deve ser baseado em dados de qualidade. Porém, o acesso a dados de qualidade ainda é um problema, principalmente no ambiente de canteiro de obras (PEREIRA, 2019). Algumas causas de problemas na coleta de dados que podem prejudicar a consistência da informação podem ser: longo período de tempo de processamento da informação entre o fato ocorrido e o dado coletado; possibilidade de erro humano na coleta de dados em função de pressa ou despreparo, falta de cuidado ou problemas de saúde do executor da coleta; perda de oportunidade da coleta de dados em função da dinâmica da obra; dificuldade na forma de expressar informações específicas, entre outros.

Um acompanhamento eficiente e efetivo de obra é fundamental para a gestão da construção, porém os métodos de rastreamento manuais atuais são demorados e/ou propensos a erros (TURKAN, 2012). O uso da plataforma BIM aliada a

ferramentas de varredura 3D de ambientes construídos cria possibilidades de processos de acompanhamento de obras cada vez mais automatizados, tornando-os mais ágeis e confiáveis, principalmente quando se referem a processos repetitivos. Apesar dos sistemas de varredura 3D ainda não estarem plenamente satisfatórios, eles são ferramentas extremamente úteis na obtenção de informações em tempo real, além de representar um caminho que aproximará cada vez mais a automação dos processos da construção civil (TURKAN, 2012). O uso de BIM aliado à Varredura 3D, apesar de ainda ser um processo não muito acessível à maioria da comunidade da construção civil, permite que se trabalhe com dados de maior qualidade e confiabilidade, se comparado a processos analógicos ou manuais, gerando informações mais consistentes. (GROETELAARS, 2015)

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Investigar o uso de dispositivos móveis para varreduras 3D de baixa complexidade, de ambientes construídos e em construção para apoio a rotinas de acompanhamento de obras.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Investigar o uso de dispositivos móveis para varreduras 3D, de ambientes construídos e em construção.
- b) Experimentar e avaliar formas de coleta e processamento de dados de varredura 3D de baixa complexidade a partir de dispositivos móveis em ambientes construídos e em construção;
- c) Aplicar o uso de varreduras 3D de baixa complexidade a partir de dispositivos móveis em rotinas de acompanhamento de obras.

1.4 JUSTIFICATIVA

Muitos operários da linha de frente da produção entendem e se expressam melhor visual e graficamente do que de forma escrita ou oral, ou seja, a própria natureza proporcionou ao ser humano ser um “pensador visual”. Isto pode ser

comprovado através de estudos realizados na área de pensamento visual pela perspectiva da neurociência, também chamado pensamento espacial ou pictórico, que se refere a áreas do cérebro relacionadas à aprendizagem, estimuladas pela informação visual. A visualização auxilia no processo de representação (estática ou dinâmica) de conceitos sofisticados ou conjuntos de dados na forma de duas ou mais dimensões (MANGE; ADANE; NAFDE, 2015; ZHANG, 2012 *apud* VALENTE, 2017). Mesmo assim, o uso da gestão visual no contexto da construção ainda é escasso, pouco valorizado e restrito. Ainda há espaço para muitas melhorias, incluindo o uso de dispositivos visuais mais sofisticados. (VALENTE, 2017)

Apesar de se buscar sempre melhorias quanto à comunicação visual, os atuais relatórios de acompanhamento de obras como gráfico de barras, curvas S, e tantas outras formas gráficas usadas na representação de importantes informações, acabam muitas vezes resultando em ineficiência em reuniões de equipes de gestão, onde grande parte do tempo é gasto na descrição dos problemas existentes e na explicação da lógica das decisões, em vez de avaliar alternativas e discutir cenários hipotéticos e ações corretivas. (GOLPARVAR-FARD *et al.*, 2009)

O uso de modelos tridimensionais causa um efeito visual importante nos envolvidos, agilizando o entendimento a respeito de detalhes do projeto. Conforme Pătrăucean *et al.* (2015) os modelos de informação de construção (BIMs) são representações digitais que codificam informações relevantes sobre o seu ciclo de vida de uma construção num mesmo ambiente virtual. Isso facilita, tanto o acesso às informações, como a atualização das mesmas, além de garantir que todos os envolvidos estarão cientes dos acontecimentos acerca do projeto.

No âmbito do canteiro de obras, a gestão de informações, principalmente relacionadas a mudanças de leiautes, andamento de serviços ou atualização de projetos “como construído” (EASTMAN *et al.*, 2014) ainda dependem fortemente de trena, papel, lapiseira, borracha e prancheta, para coleta e tratamento de dados, porém existem formas mais rápidas e eficazes de transmitir informações geométricas, como é o caso da uso da varredura 3D. (KLEIN; LI; BECERIK-GERBER, 2012).

As tecnologias de varredura apresentam-se como uma alternativa para os procedimentos de levantamento manuais por permitir coletar grande quantidade de informações de forma rápida, precisa, e fiel inclusive às suas irregularidades e imperfeições. (GROETELAARS; AMORIM, 2012).

Apesar da disponibilidade de tecnologia cada vez mais sofisticada, esta abordagem tem limitações na indústria da construção. Escâneres à laser terrestre (TLS), que são os equipamentos de varredura mais conhecidos no mercado, podem ser caros e geralmente requerem pessoal qualificado para operação e análise de dados. Além do alto investimento inicial, os custos operacionais relacionados acabam inviabilizando seu uso, principalmente para pequenos e médios empreendedores (MAALEK; LICHTI; MAALEK, 2020), perfil da maioria de empresas de construção. De acordo com US Census Bureau – NAICS 23, em 2004, 91,6% das empresas de construção civil dos EUA tinham de 1 a 19 empregados (EASTMAN *et al.*, 2014). De acordo com o CBIC, em 2017 o Brasil tinha mais de 91% do montante de empresas do setor com até 19 funcionários ativos (“Base de Dados CBIC”, 2018). Esses dados apontam que a grande força de trabalho da construção civil dificilmente fará uso destas tecnologias, e exatamente para este público, estas tecnologias poderiam trazer grandes benefícios em qualidade e produtividade.

Porém, existem muitas pesquisas relacionadas a varreduras 3D a partir de dispositivos móveis, alternativa que pode mudar esse cenário em função de sua atratividade, principalmente relacionada ao custo-benefício e facilidade de uso. (BHATLA *et al.*, 2012).

Golparvar-Fard *et al.* (2011) concluíram, que a varredura a laser é mais precisa quando comparados modelos de nuvem de 8 pontos de varredura a laser e fotogrametria, No entanto, a fotogrametria pode ser extremamente útil para extrair informações semânticas conforme o construído, “*as-build*” (ou seja, progresso, produtividade, qualidade e segurança) por meio do conteúdo das imagens, sem sobrecarregar as equipes de gerenciamento de projeto.

De acordo com Costantino; Pepe e Alfio (2020), em celebre frase “a melhor câmera é aquela que está com você”, o fotógrafo Chase Jarvis quis dizer que mais importante que o poder do equipamento que se tem, é a sabedoria em utiliza-lo na hora certa e da melhor maneira possível.

Em função disso, a presente pesquisa busca realizar experimentações e aplicações práticas de varreduras 3D de baixa complexidade através de dispositivos móveis, a fim de avaliar seu uso como ferramenta alternativa ao auxílio na execução de algumas rotinas de gestão e acompanhamento de obras que possam se beneficiar de seus resultados.

2 ACOMPANHAMENTO DE OBRAS COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS

2.1 O BIM E ACOMPANHAMENTO DE OBRAS

De acordo com Valente (2017), a gestão visual, nas últimas décadas, vem ganhando maior importância na indústria em geral, em função da velocidade de transmissão e percepção da informação. Basicamente, a transparência consiste na habilidade do processo de produção se comunicar com as pessoas envolvidas (FORMOSO; SANTOS; POWELL, 2002 *apud* VALENTE, 2017) de maneira a enxergar o sistema de forma completa, compreendendo todos os aspectos necessários, independentemente do nível hierárquico (WOMACK; JONES, 2004; GREIF, 1991; KLOTZ *et al.*, 2008; *apud* VALENTE, 2017).

Um sistema de gestão de produção gera muitas informações para serem coordenadas, muitas vezes sem metodologia e ferramentas apropriadas. Conforme Bernardes (2010) a análise e implementação de sistemas de informação é primordial para o sucesso do planejamento e controle da empresa. Um projeto de construção geralmente envolve diversas pessoas ou grupos, ao redor de um mesmo problema, mas com diferentes pontos de vista, objetivo e expectativas. (EASTMAN *et al.*, 2014)

As tarefas de acompanhamento de obras são críticas ao sucesso no gerenciamento de projetos de construção, e os métodos de rastreamento e coleta de dados manuais utilizados, principalmente as planilhas e relatórios diários de encarregados de produção, são demorados e propensos à erros (TURKAN, 2012).

O uso da plataforma BIM em acompanhamento de obras é crescente. Diversas pesquisas integrando estes dois temas estão acontecendo a todo o momento em todo o mundo. BIM é uma sigla no idioma inglês que significa Modelagem da Informação da Construção. De forma resumida, é um projeto modelado em 3D com base em objetos, onde é inserida uma série de informações e parâmetros aos mesmos. Desta forma o modelo 3D possibilita a disponibilidade de informações de elementos no formato de planilhas, relatórios, entre outras. (EASTMAN *et al.*, 2014)

As principais aplicações: (1) a detecção de interferências, (2) levantamento de quantitativos e estimativas de custo, (3) análise e planejamento da construção, (4) integração com controle de custos, planejamento e sistemas administrativos, (5)

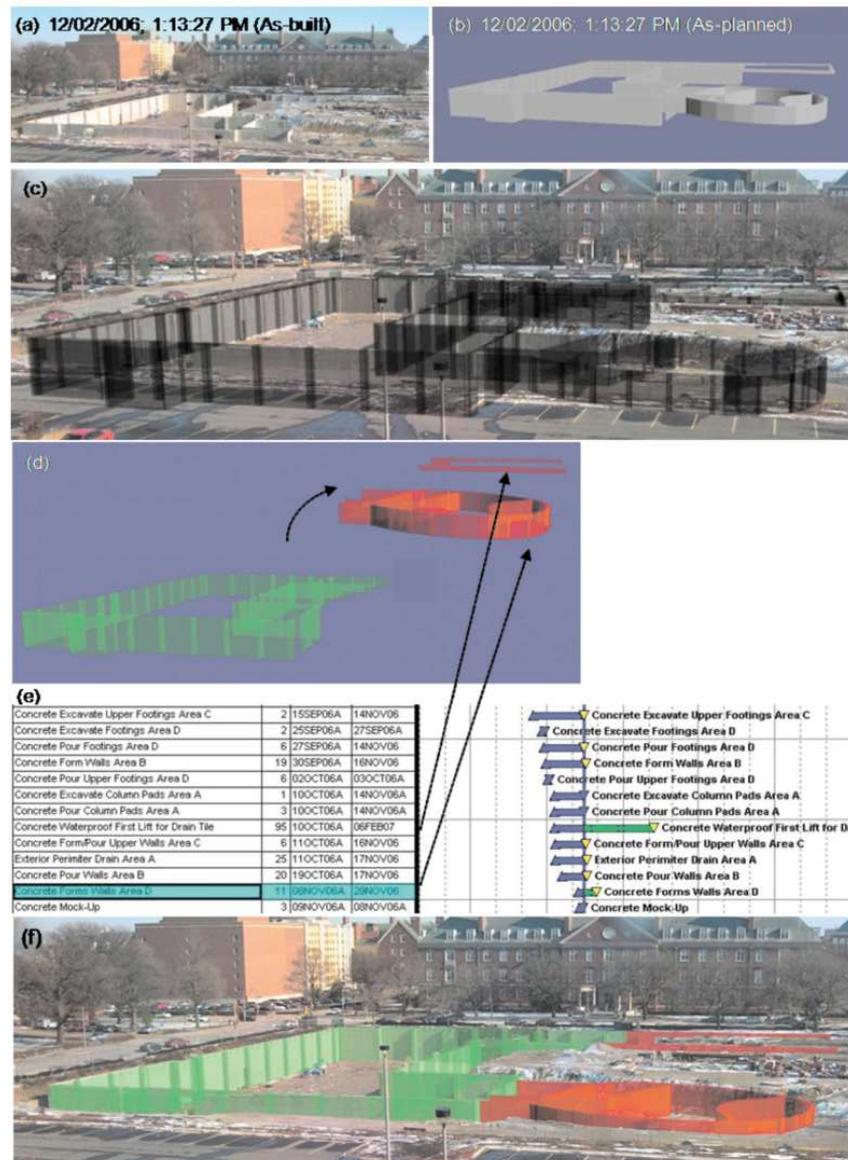
melhoria nos processos de pré-fabricação externa, (6) verificação, direção e rastreamento de atividades de obra. (EASTMAN *et al.*, 2014)

Seu uso traz vantagens que geram economia de recursos e redução de tempo. Quanto mais preciso o modelo, mais benefícios são refletidos a toda equipe, permitindo um melhor planejamento dos processos construtivos. Além disso, reduz as chances de erros e conflitos em função da capacidade de compatibilização de todas as disciplinas envolvidas. O modelo 3D baseado em BIM pode ser juntado ao cronograma da obra, realizando animações da construção ao longo do tempo, de acordo com os parâmetros do cronograma. Isto permite ao construtor simular e avaliar a sequência de serviços planejada, além de poder compartilhar estas informações com mais outros membros da equipe. Esse é o principal benefício relacionado à comunicação entre canteiro e projeto, visto que as impressões e expertise a respeito de construtibilidade, sequenciamento de serviços e até mesmo custo estimado de determinada estratégia podem ser discutidos por todos os envolvidos com grande clareza por parte de todos, ainda na fase de projeto. (EASTMAN *et al.*, 2014)

O BIM tem diversas aplicações específicas, que são conhecidas como “dimensões”. Um projeto pode ser analisado em “n”D, ou seja, a aplicação destas dimensões corresponde a tantas quantas forem necessárias. O estudo para estruturar a aplicação de nD em um projeto consiste em três partes fundamentais: 1) domínio das disciplinas que estarão inseridas, 2) domínio de todas as partes envolvidas e a participação das mesmas e 3) domínio das fases do ciclo de vida do projeto. As dimensões são a geometria (3D), o tempo (4D), custo (5D), e as demais podem ser segurança no trabalho, sustentabilidade, operação e manutenção, e tantas quantas forem necessárias. (DING; ZHOU; AKINCI, 2014).

Um exemplo do uso prático de BIM 4D pode ser observado na Figura 1. Na imagem do College of Business Instructional Facility, UIUC, de cima para baixo: a) uma foto do site tirada em 2 de dezembro de 2006, 13:13:27 p.m.; b) captura instantânea do modelo 4D ao mesmo tempo que a fotografia; c) imagem sobreposta; d) desvio de horário detectado e codificado por cores de acordo com o cronograma em e); e f) modelo 3D sobreposto a cores na fotografia do local.

Figura 1 Exemplo de aplicação do BIM 4D usado em conjunto com a visão computacional.



Fonte: Artigo “Visualization of Construction Progress Monitoring with 4D Simulation Model Overlaid on Time-Lapsed Photographs” (GOLPARVAR-FARD *et al.*, 2009, pg. 399)

De acordo com Eastman *et al.* (2014), as funções gerenciais do BIM usadas no apoio ao acompanhamento de obras podem auxiliar em diversas rotinas como por exemplo: estado do empreendimento (identificar no modelo o estado de determinado elemento, se está executado, em fabricação, em projeto, etc.), compra de suprimentos (o objeto tem condições de fornecer todas as informações necessárias a sua aquisição), acompanhamento de compras (aproveitando os recursos do item anterior, o elemento ainda pode ser vinculado a um cronograma de planejamento de aquisições onde pode ser acompanhado seu estado),

acompanhamento da segurança do trabalho (o modelo visual facilita a identificação de áreas inseguras ou, através do modelo 4D verificar a interferência entre serviços que podem gerar situações temporárias de insegurança).

O BIM em conjunto com tecnologias de informação e digitalização pode trazer grande valor aos processos de gestão e acompanhamento de obras como por exemplo: tecnologias de varredura 3D (para verificar se os serviços estão sendo executados de forma correta, no local certo, pode-se comparar o andamento do serviço com o modelo 4D e verificar os prazos e produtividade da equipe), tecnologias de orientação automática (principalmente em trabalho em terra, máquinas munidas de sistemas de operação autônomo utilizam o modelo BIM para sua orientação), tecnologia *Global Navigation Satellite System* (GNSS), que pode ser aplicada tanto na navegação pelo projeto como na localização e posicionamento de materiais, equipamentos e pessoas no canteiro de obras), etiquetas de identificação de radiofrequência, ou *Radio-frequency Identification* (RFID), podem dar suporte ao rastreamento da entrega de componentes e sua instalação no canteiro, elemento BIM que possuam referências RFID podem ser atualizados automaticamente no modelo). (EASTMAN *et al.*, 2014)

O uso do BIM no levantamento de quantitativos de projeto pode ser considerado como uma importante ferramenta, não somente para orçamentos, mas para planejamento e controle também. Entretanto algumas ressalvas devem ser observadas, visto que a interoperabilidade (ifc) não é automática. Ela apresenta fraquezas na importação e exportação de dados entre os diversos *softwares* envolvidos, e necessita que os operadores do sistema trabalhem de forma conjunta, através de metodologias que sejam comuns a todos os usuários. (TAGHADDOS; MASHAYEKHI; SHERAFAT, 2019)

Heigermoser *et al.* (2019) falam sobre a importância em definir o nível de detalhe do modelo BIM que é necessário em cada fase do desenvolvimento do projeto no Plano de Execução BIM, ou *BIM Execution Plan* (BEP), no início do mesmo. O nível de detalhe aumenta à medida que o projeto progride a partir de um modelo de intenção do projeto simples, através de um modelo de construção virtual detalhado. Isso não só garante que o modelo BIM está se desenvolvendo em detalhes suficientes, mas também que as informações necessárias requeridas pela equipe de gestão da construção são fornecidas corretamente. De acordo com a *International Organization for Standardization* (ISO) em sua norma ISO 19650/2018,

estes níveis são chamados de *Level of Development* (LOD) e *Level of Information* (LOI), equivalentes a nível de detalhamento geométrico e nível de informação semântica, respectivamente, contidas no modelo 3D.

O uso do BIM aumenta a capacidade de comunicação ao longo do projeto, e quando aliado a filosofias e sistemas de planejamento e controle da produção como *Lean Construction* (KOSKELA et al., 2002) e o *Last Planner System - LPS* (BALLARD, 2000), ou sistemas de gestão de projetos como o do *Project Management Institute - PMI* (DINSMORE; CAVALIERI, 2007), podem potencializar os resultados normalmente alcançados sem este reforço. O BIM está trazendo grandes avanços para a indústria da construção, em todos os seus segmentos, pois atua unificando informações em todos os níveis, o que antes de seu uso seria praticamente inviável. (HEIGERMOSER et al., 2019)

A integração do BIM a metodologias de gerenciamento de projetos e acompanhamento de obras vem sendo cada vez mais explorada e difundida. Sacks et al. (2013) apresentaram o sistema “Kan Bim” para controle do fluxo de trabalho onde são reunidas informações do processo e do produto de forma integrada, com uma interface BIM integrada ao LPS, dando suporte em tempo real para os fluxos de trabalho. Sheer; Mendes Jr; Campestrini (2014) realizaram estudo de caso utilizando modelo BIM junto ao LPS, no âmbito da dimensão 4D, realizando simulações e verificando incompatibilidades de projeto e restrições na execução. Biotto; Formoso; Isatto (2015) projetaram um sistema de produção utilizando BIM 4D para planejamento e controle da produção, e em seus estudos de caso identificaram claramente as limitações das técnicas usuais de planejamento no que se refere à identificação de conflitos espaciais considerando instalações provisórias, estoques e equipamentos. Rodrigues et al., 2018 elaboraram um *software* de gerenciamento baseado no LPS em paralelo a um “plug-in” para o Autodesk Revit que faz a integração ao modelo 3D do projeto, através de parametrizações e processos de compartilhamento de dados, que incluíam informações sobre estoques de materiais, além de mão de obra e restrições de projeto. Codinhoto e Kunieda (2018) utilizaram simulação BIM 4D a partir de *softwares* de modelagem 3D para jogos digitais, simulando tarefas e extraíndo quantitativos de volume de resíduos de demolição. Heigermoser et al. (2019) propuseram um protótipo de ferramenta, integrando o projeto 3D com o LPS, gerando indicadores gráficos de produtividade e geração de resíduos, baseados na filosofia da construção enxuta, mas ainda dependendo de

aperfeiçoamento para poder ser utilizado em larga escala pela indústria da construção.

Ding; Zhou; Akinci (2014) indicam várias formas de obtenção de dados para acompanhamento das disciplinas do projeto integrando o modelo BIM à execução no canteiro de obras, entre elas o RFID (identificador por radiofrequência cujos dados podem ser enviados por dispositivos móveis via aplicativo, diretamente do canteiro de obras para sistemas em nuvens de dados), a AR (realidade aumentada que disponibiliza a visualização das informações no próprio local de trabalho) e a Varredura 3D.

A questão da integração do BIM com a captura de informações e dados em tempo real para acompanhamento de obras tem sido abordada por vários pesquisadores ao redor do mundo. Bassier; Vergauwen; Genechten (2016) ao comentarem sobre a modelagem 3D a partir de nuvem de pontos, afirmam que “a automação do processo é uma obrigação”. De acordo com Turkan (2012), a maioria das pesquisas sobre o acompanhamento automatizado do andamento do projeto, em contraste com os esforços de coleta de forma manual, tem como objetivo acelerar os processos de medição de quantidades físicas “in loco” usando tecnologias de sensoriamento espacial. Porém este potencial se perde na hora da modelagem da informação, tendo em vista a dificuldade no reconhecimento automatizado de objetos, o que acaba gerando processos manuais que consomem um tempo maior, além de terem de ser operados por mão de obra especializada e com custo alto.

Rebolj *et al.* (2017) propuseram um método de Varredura para BIM (Scan-to-BIM) onde se fazia a comparação entre o projeto modelado em 4D e um modelo gerado a partir de uma nuvem de pontos parcial obtida através de Varredura 3D dentro de uma variação de tempo que pode ser de 1 hora ou 1 dia. Esta nuvem parcial consegue selecionar apenas os pontos que não fazem parte da nuvem anterior, o que facilita bastante o processo. Ela é coletada por equipamentos com baixo custo, instalados nos capacetes dos colaboradores, e toda a comunicação é feita via “wireless” (comunicação sem fio). Porém ainda apresenta dificuldade na identificação de alguns objetos. Nas palavras de Pucko; Rebolj (2018) “Nos últimos anos, diversos esforços têm sido aplicados na pesquisa de acompanhamento de progresso de obras de forma automatizada, porém o sucesso delas ainda é limitado”.

Algumas pesquisas em andamento na Universidade de Illinois utilizam o *Scan-to-BIM* (S2B) para acompanhamento de obras, fazendo a integração de inteligência artificial, BIM e visão computacional. Conforme Lin; Lee; Golparvar-Fard, (2019), nela se utilizam imagens do canteiro de obras de diferentes fontes de origem e através de uma metodologia desenvolvida por eles, onde a visão computacional é capaz de raciocinar conjuntamente sobre a geometria e a aparência dos elementos BIM observados no conjunto de imagens disponíveis. Com isso, conseguem monitorar e relatar o estado de progresso do projeto, unindo recursos geométricos de *Structure from Motion* (SfM), que é uma técnica de geração de objeto 3D a partir de imagens, com recursos de aparência direcional e radial em uma nova arquitetura de rede neural convolucional profunda, ou *Convolutional Neural Network* (CNN).

2.2 VARREDURA 3D COM O USO DE DISPOSITIVOS MÓVEIS

A captura de realidade ou varredura 3D ainda são termos pouco utilizados no vocabulário de obras no Brasil, apesar da sua versatilidade e aplicabilidade em diversos casos, como por exemplo: inventário de patrimônio arquitetônico histórico; levantamentos Como-Construído (*As-built*) de edificações existentes; acompanhamento de obras em andamento (*As-is*); levantamento para operação de edificações ao longo de seu ciclo de vida, entre outras.

As principais técnicas que são utilizadas para levantamento geométrico de ambientes construídos são a medição direta, medição por coordenadas, estações totais, fotogrametria, *Dense Stereo Matching* (DSM), fotogrametria esférica, videogrametria, 3D laser scanning, luz estruturada, termografia infravermelho, georadar, radiografia (raios X e Gama), sendo que cada uma varia quanto à eficiência e eficácia para uso na plataforma BIM. (GROETELAARS, 2015)

As técnicas de varredura podem ser classificadas com base no tipo de sensores usados, ativo ou passivo. (TEIZER, 2008 *apud* ZHU; BRILAKIS, 2009)

- Os sensores ativos fornecem sua própria energia para emissão de onda, na maioria das vezes como laser ou infravermelho, e quando encontra um objeto em que ela é refletida, o sinal de energia de retorno é captado, e usado para determinar as informações espaciais do objeto. A varredura à laser ou à luz estruturada infravermelho são exemplos do uso deste sensor.

- Os sensores passivos utilizam a energia da própria iluminação natural da cena para captar informações tridimensionais. As varreduras por fotogrametria e videogrametria são exemplos do uso deste sensor.

As diferenças os sensores e as técnicas de varredura 3D podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Benefícios e limitações das técnicas de coleta de dados *As-Built*

TIPO DE SENSOR	TÉCNICA	BENEFÍCIOS	LIMITAÇÕES
Passivo	Fotogrametria	Preciso Baixo custo do equipamento Portátil	Recuperação manual de dados 3D Recuperação de dados em tempo não real Operação apenas durante o dia Baixa resolução espacial Distância de alcance limitada
	Videogrametria	Preciso Baixo custo do equipamento Portátil Alta resolução espacial Recuperação de dados em tempo real	Recuperação de dados 3D automatizada limitada Operação apenas durante o dia Distância de alcance limitada
Ativo	Câmera de alcance 3D	Recuperação automatizada de dados 3D Operação durante o dia ou a noite Custo do equipamento acessível Portátil Recuperação de dados em tempo real	Distância de alcance curta Baixa resolução espacial Menos preciso que a fotogrametria e a videogrametria
	Escaner à laser	Maior precisão Recuperação automatizada de dados 3D Alta resolução espacial Operação durante o dia ou a noite Medição de longo alcance	Custo alto do equipamento Portável com maior dificuldade Recuperação de dados em tempo não real

Fonte: Adaptado do artigo *Comparison of Optical Sensor-Based Spatial Data Collection Techniques for Civil Infrastructure Modeling* (ZHU; BRILAKIS, 2009, pg. 174)

A varredura 3D por fotogrametria consiste em derivar informações geométricas sobre um objeto usando informações derivadas de fotografias capturadas a partir de câmeras digitais para criar um modelo 3D do objeto fotografado. Por ser uma técnica de sensoriamento remoto, não envolve em tocar fisicamente o objeto. Várias saídas como coordenadas 3D, estrutura topográfica 3D,

nuvens de pontos 3D, e estrutura de arame de uma estrutura podem ser geradas usando esta técnica. Ela se baseia em triangulações passivas para medir objetos do mundo real. Uma coordenada 3D (x, y, z) é obtida localizando o mesmo ponto de duas ou mais posições de câmera diferentes. (BHATLA *et al.*, 2012)

A varredura 3D por videogrametria é semelhante à fotogrametria, exceto que quadros de vídeo, em vez de imagens, são usados para medir a coordenada 3D de um objeto. A videogrametria utiliza câmeras digitais para capturar vários quadros de vídeo em uma sequência de imagens e melhora a precisão dos resultados da medição 3D. Os quadros de vídeo são construídos sobre os quadros anteriores em uma sequência de imagens, permitindo a coleta de dados automática e em tempo real. Porém, devido à baixa resolução dos quadros de vídeo capturados, as aplicações da videogrametria são limitadas. Esta técnica também é suscetível a mudanças nas condições de luz e movimento abrupto da câmera digital. (BHATLA *et al.*, 2012)

A varredura através de câmera de alcance 3D é especialmente útil em aplicações para detecção, rastreamento e modelagem de objetos em movimento. É uma técnica de sensor ativa que pode calcular automaticamente as informações de profundidade e produzir imagens 3D em tempo real. Além disso, a câmera de alcance 3D não depende da luz do dia e pode ser operada a qualquer hora. O dispositivo funciona projetando uma linha ou uma imagem codificada na superfície do objeto para reconstruir a forma da superfície do mesmo. A limitação desta técnica é que ela não pode ser usada para inspecionar materiais com inclusões escuras, pois confunde essas inclusões com vazios. Essas câmeras também são mais caras do que as câmeras digitais e filmadoras. (BHATLA *et al.*, 2012)

A varredura 3D à laser é uma técnica de sensor ativo que geralmente é baseada no princípio do tempo de voo, ou *Time of Flight* (TOF), ou mais popularmente conhecido como *Light Detection and Ranging* (LiDAR). Os escâneres laser criam uma nuvem de pontos das superfícies geométricas de um objeto projetando suas formas, que podem ser reconstruídas utilizando *softwares* de modelagem 3D. Como as câmeras de alcance 3D, a varredura a laser pode gerar nuvens de pontos de qualquer objeto que não seja obscurecido e esteja em sua linha de visão. Essa tecnologia tem uma alta precisão (da ordem de alguns milímetros) e sua faixa de medição se estende até algumas centenas de metros. As principais limitações da digitalização a laser estão no investimento inicial (alto custo

do equipamento) e no treinamento dos operadores. Além disso, o equipamento não é portátil, não pode ser transportado facilmente, e o processo é demorado. Dependendo do tamanho do objeto, uma varredura a laser pode levar algumas horas ou mesmo dias para ser concluída. A análise da nuvem de pontos também leva mais tempo do que outras técnicas de sensoriamento remoto, como a fotogrametria. A precisão das varreduras a laser é altamente dependente de parâmetros ambientais e de objetos, como refletividade da superfície, textura da superfície e condições climáticas. (BHATLA *et al.*, 2012)

A digitalização a laser 3D e a fotogrametria são os meios mais comuns pelos quais essas informações espaciais são coletadas remotamente. Embora muito diferentes em termos de custos de equipamento e processos de detecção, ambas as tecnologias de automação usam sensores para calcular direta ou indiretamente as distâncias relativas entre suas localizações e pontos na cena detectada. (KLEIN; LI; BECERIK-GERBER, 2012)

De acordo com Groetelaars (2015), a fotogrametria é uma técnica que extrai formas, posições e dimensões de objetos através de fotografias. Ela surgiu em meados do século XIX, mas sofreu grandes transformações ao longo do tempo. Atualmente, a fotogrametria digital simplificou bastante o processo, que antes dependia de pessoal especializado e equipamentos de alto custo. Ela permite uma gama de produtos, como medidas, desenhos, modelos geométricos com e sem textura, ortofotos, entre outros. Além disso, necessita de pouco tempo de levantamento de campo, apenas para coleta de fotos, visto que a maior parte do processo se dá no computador.

Segundo Groetelaars (2015), as etapas do levantamento fotogramétrico são:

a) Tomada fotográfica do objeto: onde cada ponto do cenário deve ser registrado pelo menos em duas ou três fotos, além disso, a qualidade da foto, a resolução e o ângulo de tomada influenciam diretamente na precisão e na qualidade final do modelo.

b) Levantamento de medidas de referência: com trena, estação total, ou qualquer outro dispositivo de medição direta, a fim de determinar a escala do modelo.

c) Orientação interna: são os parâmetros internos da câmera como distância focal (df), localização do ponto principal (PP), distorções da objetiva, tamanho do sensor e resolução da imagem. Estas informações podem ser obtidas através de

calibração da câmera ou através do arquivo EXIF (*Exchangeable Image File Format*) que são informações disponibilizadas pelo fabricante e introduzidas pela própria câmera nas propriedades do arquivo de imagem digital, porém as informações são menos precisas que as obtidas através da calibração.

d) Orientação externa: através de pontos homólogos nas imagens, possibilita a intersecção de feixes perspectivos para determinar as coordenadas tridimensionais desses pontos, gerando um modelo preliminar e formando um posicionamento relativo das fotos (local onde foram obtidas). Para a determinação da escala, geralmente é realizado posteriormente ajustando à malha ou nuvem de pontos as medidas obtidas em campo.

e) Geração do modelo geométrico e outros produtos: é a complementação do modelo gerado, incluindo maiores detalhes e associando-o a superfícies e texturas correspondentes.

f) Exportação do produto: podendo ser exportado como modelo de superfície texturizada, seja como malha triangular ou nuvem de pontos, ortofotos, desenhos, etc.

As três classificações mais importantes da fotogrametria são relacionadas ao posicionamento do sensor ótico, número de fotografias e tipo de restituição, e nível de automação do processo de restituição. Quanto ao posicionamento, pode ser terrestre (fotos obtidas na superfície da Terra), Aérea (fotos obtidas do alto, geralmente através de aeronaves e VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado) e Orbital (fotos de satélites). Quanto ao número de fotos, pode ser monorrestituição (uso de apenas uma fotografia), estereorrestituição (usa pares de fotos paralelas ou com pequenas inclinações entre si e grandes áreas de sobreposição, o que facilitam o uso de recursos automatizados e torna o método o mais adequado para captura de formas complexas e irregulares), e a restituição de múltiplas fotografias convergentes (fotografar o mesmo objeto de diversos ângulos e posições diferentes onde cada ponto seja registrado em pelo menos 3 fotos com ângulos de convergência variando entre 45 e 90 graus). Quanto ao nível de automação, são interativos (quando o operador precisa interagir com o programa), semiautomáticos (quando os programas apresentam algumas tarefas automatizadas, com menor interação com o operador) e automáticos (utilizando ferramentas que permitem automatizar as diversas etapas do processo), que permitem a criação de modelos de formas complexas (GROETELAARS, 2015).

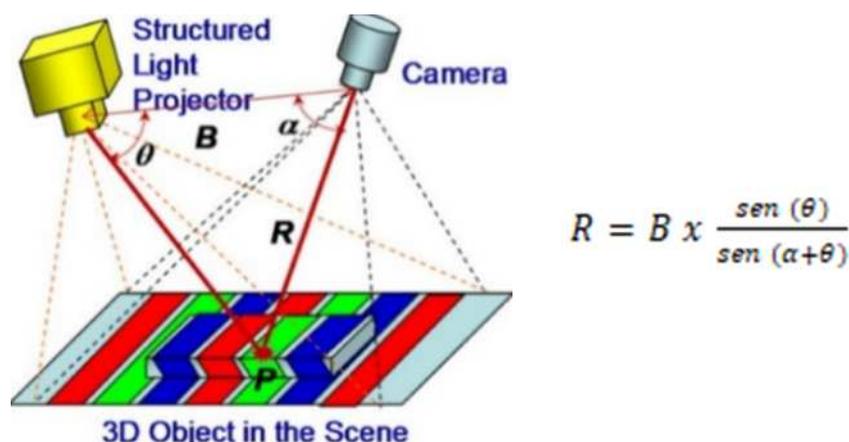
Groetelaars (2015) identifica o DSM como a evolução das técnicas fotogramétricas automatizadas, que se baseia na correlação automática de conjuntos de pixels homólogos em diferentes fotos, que geram uma nuvem de pontos ou malha triangular irregular. Esta correlação só funciona em superfícies com textura não uniforme, além dos cuidados com a tomada das fotos garantindo foco do objeto uma resolução compatível com o nível de precisão requerido. Existe também a possibilidade no uso da Fotogrametria esférica, que consiste na utilização de panoramas fotográficos esféricos para fins métricos, fornecendo ângulos verticais e horizontais de um objeto, técnica desenvolvida por Gabriele Fangi.

Outro dispositivo que tem sido bastante utilizado em pesquisas para acompanhamento de obras é a câmera panorâmica 360° (SUBRAMANIAN; GHEISARI, 2019 e HASLER, 2019). Os sistemas baseados em imagens com cobertura panorâmica de 360 ° permitem uma aquisição rápida de dados e podem ser acessíveis ao usuário quando hospedados em um serviço de geo informação 3D baseado em nuvem. Um sistema de câmera estéreo de 360 ° é desafiador, uma vez que vários parâmetros como comprimento focal, comprimento de base estéreo e restrições ambientais, como corredores estreitos, influenciam uns aos outros.

Com relação a câmeras de alcance 3D, os sensores de luz estruturada infravermelho, chamados neste trabalho pela sigla LEIV, funcionam, basicamente, capturando uma imagem 2D de uma cena iluminada pela luz estruturada. Numa superfície plana, a imagem capturada reproduz o mesmo padrão de luz estruturada projetada na superfície, sendo que a superfície tridimensional irá causar distorções no padrão. A geometria de triangulações é utilizada para identificar e diferenciar um ponto de luz da superfície do objeto e calcular a distância que o mesmo se encontra do sensor em função da energia registrada pelo sensor, como se pode ver na Figura 2 (D´AVILA, 2018).

Quando uma superfície é iluminada por um padrão de projeção de luz estruturada, a imagem captada pelo sensor de imagem varia de acordo com a leitura da superfície do objeto. A distorção no padrão registrada pelo sensor contém informações em escala da superfície iluminada, e esta distorção, comparada com o padrão, carrega os detalhes da forma geométrica tridimensional do objeto (D´AVILA, 2018).

Figura 2 - Relações básicas de triangulação.



Fonte: Artigo “Structured-light 3D surface imaging: a tutorial” (GENG, 2011, pg. 131)

De acordo com Solomon; Breckon (2013), a geração de uma imagem digital de superfície tridimensional baseada na luz estruturada consiste em projetar luz em um formato bem conhecido sobre o cenário. A partir da verificação de como ela é deformada pela superfície do objeto na cena, é possível, com um sistema de visão computacional, obter informações desta superfície. Mesmo que a luz estruturada seja invisível, ela não interfere com outras tarefas de visão de máquina, podendo ser a luz infravermelha uma opção. Conforme Reiss (2007), os sistemas de luz estruturada são classificados em 3 questões principais: codificação dos padrões, calibração do sistema e unidade de captura. A codificação dos padrões trata das formas de luz projetada sobre a cena para posteriormente ser decodificada. A calibração trata dos parâmetros da geometria de projeção da luz estruturada. A unidade de captura visa o trabalho com a ferramenta física de projeção e padrões da luz estruturada a ser projetada. O resultado da medição de uma superfície é um mapa de profundidade em um sistema de coordenadas cartesianas, podendo ser expresso em um formato de matriz digital. A medição de uma superfície 3D pode ser chamada de detecção de alcance, mapeamento de profundidade ou então varredura de superfície, entre outros (GENG, 2011).

O produto, oriundo destas tecnologias e equipamentos de varredura 3D, para utilização pelo BIM é a nuvem de pontos tridimensionais (*point cloud*) ou a malha triangular (*mesh*). Wang; Kim (2019) conceituaram nuvem de pontos tridimensional com um vasto conjunto de pontos em um sistema de coordenadas XYZ, utilizados para representar as superfícies externas de um objeto ou de um ambiente. Embora diferentes parâmetros tenham sido propostos, os dois parâmetros mais populares para a avaliação da qualidade dos dados de nuvem de pontos são precisão e

resolução espacial. Atualmente, a relação entre os requisitos de informação e a qualidade dos dados exigidos é considerada principalmente de forma qualitativa em vez de quantitativa. Pesquisas futuras devem ser conduzidas para estabelecer relações quantitativas entre o requisito de informações (identificação bem sucedida de elementos) e a qualidade de dados da nuvem de pontos exigida. (WANG; KIM, 2019)

A automação no processo de manuseio de uma nuvem de pontos é questão de extrema importância, pois dificilmente pode ser manipulada diretamente, sem passar por etapas de limpeza e tratamento a fim de reduzir tamanho de arquivos e ruídos que podem gerar erros ao levantamento. Estas etapas tomam muito tempo no processo, sem contar com a modelagem em si.

A pesquisa de Mura *et al.* (2014) trabalhou na reconstrução de nuvens de pontos oclusas induzindo o particionamento de espaços utilizando métodos estatísticos. Ochmann *et al.* (2016) propõem a utilização de filtragens através de algoritmos e a criação de condicionantes para automatizar este processo, mas ainda apresentando muitas deficiências no reconhecimento correto dos objetos. Bassier; Vergauwen; Genechten (2016) alcançaram resultados de um algoritmo de rotulagem automática para modelos vetoriais altamente desordenados e de ambientes complexos de edificios existentes com grande eficiência, mas apesar de ser um passo importante, ainda não resolve o processo de automação na sua totalidade. Rebolj *et al.*, 2017 a partir da análise de mais de 100 nuvens de pontos, propuseram um conjunto de ajustes e requisitos necessários para garantir uma detecção precisa de objetos conforme tamanho e tipo. Já Bueno *et al.* (2018) apresentam um algoritmo, o 4PICS, que traz maior qualidade e velocidade ao processo, porém a um custo computacional ainda elevado. No Brasil, Álvares (2019) realizou estudos referentes a monitoramento visual do progresso de obras, utilizando mapeamentos 3D de canteiros por VANT e modelos BIM 4D, apresentando bons resultados para acompanhamento de serviços externos.

São diversas as aplicações técnicas dos dados adquiridos em varreduras 3D, que servem de apoio aos profissionais e gestores da indústria da construção na tomada de decisão bem fundamentada. Além disso, os dados coletados podem ser usados para uma série de finalidades, como: detecção de defeitos e desvios, planejamento do local de trabalho de construção, melhoria da segurança no local de

trabalho e documentação *as-built*, acompanhamento do progresso da construção, medição de deformações, entre outras. (ZHU; BRILAKIS, 2009)

Durante sua execução, o leiaute da obra muda a todo o momento, pois devido ao caráter estacionário do “produto”, os diversos agentes se movimentam pelo canteiro de obras alterando suas condições à medida que o projeto vai sendo executado. (WEBB; HAUPT, 2005 *apud* BIOTTO; FORMOSO; ISATTO, 2015)

Em função disso, a varredura 3D de baixa complexidade pode auxiliar em diversas atividades, integradas ou não à plataforma BIM, de modo a manter o estado do canteiro de obras e das frentes de trabalho sempre atualizados em modelos 3D de controle.

O processo de captura de imagem funciona como explicado por Costantino; Pepe; Alfio (2020):

“Quando uma imagem está sendo capturada por uma câmera, a luz passa pela lente e incide no sensor de imagem. O sensor de imagem é composto por elementos de imagem, também chamados de pixels, que registram a quantidade de luz que incide sobre eles. Eles convertem a quantidade de luz recebida em um número correspondente de elétrons. Quanto mais forte a luz, mais elétrons são gerados. Os elétrons são convertidos em voltagem e então transformados em números por meio de um conversor A / D. O sinal constituído pelos números é processado por circuitos eletrônicos dentro da câmera.” (COSTANTINO; PEPE; ALFIO, 2020)

Existem duas tecnologias principais que podem ser usadas para o sensor de imagem em uma câmera: *Charge-Coupled Device* (CCD) e *Complementary Metal-Oxide Semiconductor* (CMOS).

Os CCDs são sensores baseados em uma série de fotodiodos passivos que integram carga durante o tempo de exposição da câmera. A carga é então transferida para a eletrônica comum que lê as cargas acumuladas dos diferentes pixels e as traduz em voltagens. Ele é um dispositivo de pixel passivo (ou seja, sem eletrônicos no nível de pixel), a eficiência quântica é muito alta: esta é uma vantagem em aplicações onde a luz é muito fraca. (COSTANTINO; PEPE; ALFIO, 2020)

Os CMOS são sensores baseados em uma matriz de pixels ativos: a eletrônica de nível de pixel (normalmente 3 ou 4 transistores) traduz a carga acumulada no fotodiodo em uma voltagem bem definida; desta forma, a saída de cada pixel precisa apenas ser adquirida e amostrada. Um dos seus pontos fortes é, sem dúvida, o seu pequeno tamanho que tem permitido a sua introdução em

diversos dispositivos, como os *smartphones*. O desenvolvimento tecnológico desses sensores está em constante e rápida evolução. (COSTANTINO; PEPE; ALFIO, 2020)

Em pesquisa utilizando varredura 3D a partir de *smartphones* para documentação digital automática e relatório de progresso de tubos de construção mecânica, Maalek; Lichti; Maalek, (2020) avaliaram a eficácia de dispositivos móveis para gerar nuvens de pontos que pudessem ser usadas para quantificação de tubulações instaladas. Observou-se que a definição de escala métrica proposta alcançou a precisão de estimativa do raio do tubo menores que milímetro. Tanto experimentos de laboratório quanto de campo revelaram que o aumento da sobreposição de imagem melhorou a qualidade, raio e comprimento da classificação da tubulação.

A pesquisa de Nocerino *et al.* (2017) abordou a varredura de forma colaborativa, utilizando diferentes dispositivos em diferentes sessões de aquisição em uma mesma reconstrução 3D. O procedimento proposto foi avaliado por meio de comparações com dados de referência produzidos por meio de um fluxo de trabalho de aquisição e processamento fotogramétrico padrão. As análises mostraram que os resultados alcançados podem ser suficientes para a indústrias criativas (games, animação, publicidade, etc).

A pesquisa de Sadeq (2018) concluiu que a tecnologia CMOS fornece melhor precisão do que o CCD na mesma resolução. A tecnologia moderna se concentrou na predominância de CMOS em dispositivos de imagem e obteve mais suporte para melhorias de empresas móveis.

A pesquisa de Tavani *et al.* (2020) fez a varredura 3D georreferenciada de uma falésia de 400m de largura, a uma distância aproximada de 350m, utilizando apenas sensores nativos do *smartphone* sem o emprego de pontos de controle. Este conjunto de dados de imagem de pesquisa foi subsequentemente usado para construir um modelo 3D não referenciado, que foi registrado durante o pós-processamento usando metadados de orientação e posição marcados para cada fotografia. Já, a pesquisa de Khalloufi *et al.* (2020) fez a varredura 3D em sítios históricos no Marrocos, utilizando câmeras de *smartphones* de baixo custo, alcançando bons resultados de precisão, comparados a câmeras DSLR.

A tecnologia de dispositivos móveis evolui numa velocidade bastante grande, onde a cada ano os principais fabricantes buscam inovações em seus modelos a fim

de se manter sua hegemonia ou de superar seus concorrentes alcançando novos mercados. Quando se trata de câmeras digitais, a corrida é com relação aos sensores das câmeras que se tornam cada vez menores e mais sofisticados, trazendo maior qualidade na captura de imagens (A. SADEQ, 2018).

A precisão de sensores de *smartphones* atualmente é comparada à de câmeras fotográficas semiprofissionais ou até mesmo de uso profissional, porém com um custo inferior. Além disso, sensores de posicionamento que mesmo ainda não tendo uma boa precisão, conseguem um resultado inicial de localização satisfatório para uso sem grande complexidade, complementam estes dispositivos, dispondo de importantes recursos para uso na fotogrametria digital de curta distância. (A. SADEQ, 2018)

Uma série de atividades econômicas impulsionam a economia digital em todo o mundo, através das “indústrias criativas”. Elas abrangem subsetores como a publicidade, arquitetura, arqueologia e mercado de antiguidades, trabalhos manuais, projetos de engenharia, design de modas e de interiores, entretenimento (cinema, animação, jogos eletrônicos, música, artes performáticas), e muitos outros além do uso de impressoras 3D, que estão cada vez mais acessíveis ao grande público. (NOCERINO *et al.*, 2017)

Apesar da fotogrametria digital exigir um potente suporte computacional, há uma tendência na indústria de *softwares* em executar as etapas de processamento computacional através de nuvens de processamento de dados disponibilizados pelos próprios desenvolvedores. Nestes casos, o dispositivo móvel é responsável apenas pela coleta de imagens da cena de interesse enquanto potentes servidores realizam as etapas de processamento SfM e DSM (NOCERINO *et al.*, 2017).

Portanto, se considera bastante relevante a pesquisa no uso de dispositivos móveis para varredura 3D, mesmo de baixa complexidade, para apoio a gestão e acompanhamento de obras, em função dos diversos benefícios verificados em todos os estudos apresentados até aqui.

3 METODOLOGIA

De acordo com Gil (2018), existe a necessidade de pesquisa de determinado assunto em função da falta de informações para responder a um problema, ou em função das informações estarem em um estado de desordem que não se possa relacionar com a resolução do problema.

A pesquisa que investiga a varredura 3D se assemelha ao segundo caso, visto que existem diversos estudos, apontando diversas alternativas de uso, utilizando ferramentas e procedimentos diferentes de forma a atender necessidades de captura de realidade física em diversas áreas de conhecimento, inclusive na construção civil. Porém entende-se que é necessária uma maior investigação no que concerne o uso desta tecnologia como apoio no controle e fiscalização de obras, principalmente com a utilização de dispositivos móveis para varreduras 3D de baixa complexidade.

A pesquisa se desenvolveu mediante três etapas: contextualização, investigação e experimentação, e aplicação em rotinas de acompanhamento obras, conforme mostra o delineamento da mesma, na Figura 3, onde são apresentadas as questões e as fontes de evidência que embasaram a realização das três etapas.

Figura 3: Delineamento da pesquisa.

Etapas de pesquisa	Questões de pesquisa	Fontes de evidência
1. Contextualização	Qual o cenário da pesquisa do uso de dispositivos móveis para varreduras 3D em ambientes construídos? Que equipamentos e <i>softwares</i> podem ser utilizados nas etapas seguintes?	Artigos científicos e jornalísticos. Sites de fornecedores. Fichas técnicas de produtos
2. Investigação e experimentação	Como utilizar estes dispositivos? Como gerar nuvens de pontos destas varreduras 3D? Qual o desempenho destes sistemas de varredura 3D? Qual a qualidade da nuvem de pontos gerada a partir destes dispositivos?	Artigos científicos, experimentações em ambientes construídos, coleta de dados e estudo comparativo com diferentes sistemas e diferentes dispositivos.
3. Aplicação em rotinas	Como seria útil o uso de varredura	Experimentação em cenário real, utilizando

de acompanhamento de obras

3D de baixa complexidade a partir de dispositivos móveis para a rotina de acompanhamento de obras?

as nuvens de pontos coletadas em obra para gerar informações relevantes à rotinas de acompanhamento de obras.

Fonte: Autor

A seguir o desenvolvimento das três etapas de pesquisa será descrito.

3.1 ETAPA 1: CONTEXTUALIZAÇÃO

Nesta etapa se buscou contextualizar o cenário em que a pesquisa está contida. Foi realizada pesquisa bibliográfica, principalmente em artigos científicos, onde se buscou o entendimento no uso de dispositivos móveis para varreduras 3D em ambientes construídos, afim de que se pudesse identificar os dispositivos (Tabela 2) e os *softwares* (Tabela 3) a serem utilizados nos experimentos e aplicação. Os resultados detalhados são apresentados no capítulo 4.

Tabela 2: Identificação dos dispositivos usados

DISPOSITIVO	FABRICANTE/MODELO
GALAXY N8	Samsung Galaxy Note 8
GALAXY N10	Samsung Galaxy Note 10 Lite
XIAOMI N6	Xiaomi Redmi Note 6 Pro
IPAD 6	Apple iPad (6a. geração) Wi-fi 128 Gb
SSO	Structure Sensor by Occipital
CANON SX510	Canon PowerShot SX510 HS

Fonte: Autor

Tabela 3: Identificação dos *softwares* usados

ETAPA	SOFTWARES
Processamento DSM ou SfM	Regard 3D, 3DF Zephyr, Agisoft Photoscan e Metashape, Autodesk Recap Photo e Visual SfM
Tratamento de Nuvens de Pontos e Malhas Triangulares	Meshlab e CloudCompare
Modelagem 3D e Integração BIM	Autodesk Revit e FreeCAD

Fonte: Autor

3.2 ETAPA 2: INVESTIGAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO

A seguir, se buscou colocar em prática parte do conhecimento adquirido na etapa anterior. Foram realizados diversos experimentos ao longo de 2 anos da pesquisa, que tiveram importante papel no aprendizado geral do assunto varredura 3D, principalmente em função do autor não ter nenhuma experiência anterior no assunto.

Dentre todas as experiências realizadas, foram escolhidas 2 para serem apresentadas nesta pesquisa:

- Estudo comparativo entre sistemas de medição tradicionais e sistemas de varredura 3D;
- Estudo de nuvens de pontos gerados a partir de diferentes dispositivos móveis em vistorias de acompanhamento de obra.

3.2.1 Estudo comparativo entre sistemas de medição tradicionais e sistemas de varredura 3D

O estudo realizado consistiu em investigar o uso de varredura 3D utilizando dispositivos móveis, através de dois diferentes sistemas: Luz Estruturada Infravermelho (LEIV) e Fotogrametria Terrestre Digital (FTD).

O ambiente testado foi uma sala de estar residencial, de área total de 19,41 m², com algumas paredes retas e outras com descontinuidades, além de janelas, portas, mobiliário, piso e forro, conforme mostra a Figura 4. Neste ambiente foram feitas medições com trena laser e estação total (equipamentos tradicionalmente utilizados), para fins de comparação com sistema de varredura 3D com LEIV e FTD.

Os dados obtidos foram avaliados de forma comparativa, a fim de que se identificassem as melhores possibilidades para uso em rotinas de acompanhamento de obras, analisando as dimensões:

- precisão,
- tempo de operação,
- complexidade de operação,
- logística de transporte,
- custo de investimento.

Figura 4: Ambiente construído usado no experimento.



Fonte: Autor

3.2.1.1 Levantamento com trena laser

Foi utilizado um medidor de distância tipo trena laser da marca Bosch modelo GLM 250 VF. Inicialmente foi realizado um croqui de forma manual, para anotação das informações que seriam obtidas através das medições, incluindo as informações complementares (esquadrias e descontinuidades). Foram realizadas medidas longitudinais, transversais, diagonais e verticais do ambiente existente. Além destas, foram realizadas medições das esquadrias e do vão da circulação. Ao todo foram executadas 27 medições utilizando esse sistema.

3.2.1.2 Levantamento com Estação Total

Foi utilizada uma estação total da marca Geomax modelo ZT-20R. O equipamento foi instalado em um ponto central da sala, a fim de garantir a vista de todos os principais locais que deveriam ser levantados. Para executar o levantamento com apenas uma pessoa, o equipamento foi configurado para fazer as medições sem o prisma, utilizando apenas um feixe de luz que indicava o ponto a

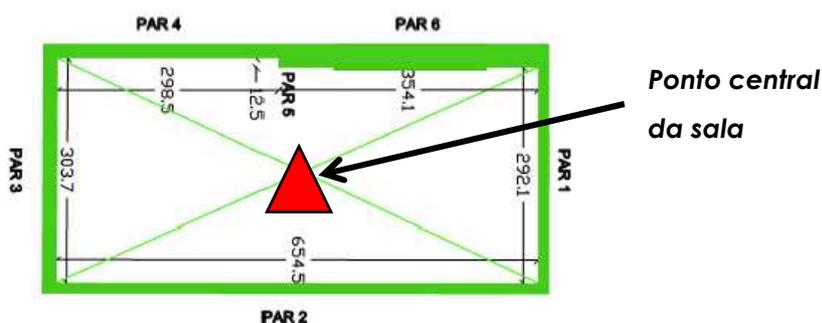
ser gravado. Foram colhidos 205 pontos no ambiente, que só puderam ser acessados no escritório, onde através de *software* específico, puderam ser descarregados da estação total para o computador.

3.2.1.3 Levantamento com Sensor de Projeção de Luz Estruturada Infravermelho (LEIV)

Foi utilizado o sensor de luz estruturada infravermelho SSO, acoplado ao dispositivo móvel IPAD 6. Uma primeira tentativa foi realizada conforme indicação do fabricante do sensor, com o operador caminhando pelo perímetro do ambiente, fazendo a varredura das paredes, de forma a evitar que se passasse mais de uma vez pelo mesmo local. Após a conclusão da varredura de todo o ambiente, foi verificado que a malha 3D gerada não apresentava fechamento no canto de chegada/partida do levantamento, apresentando evidente distorção da realidade, parecendo que o sensor perdia a referência de localização quando em movimento.

Em uma segunda tentativa, o sensor foi posicionado em um ponto fixo, apenas girando em seu eixo, com o auxílio de um tripé com adaptador para fixação do *tablet* (de modo que o equipamento sofresse o mínimo movimento possível além dos giros verticais e horizontais em seu próprio eixo), localizado no centro do ambiente (Figura 5), respeitando as distâncias mínimas em relação ao alvo recomendadas pelo fabricante.

Figura 5: Posição do tripé com sensor LEIV



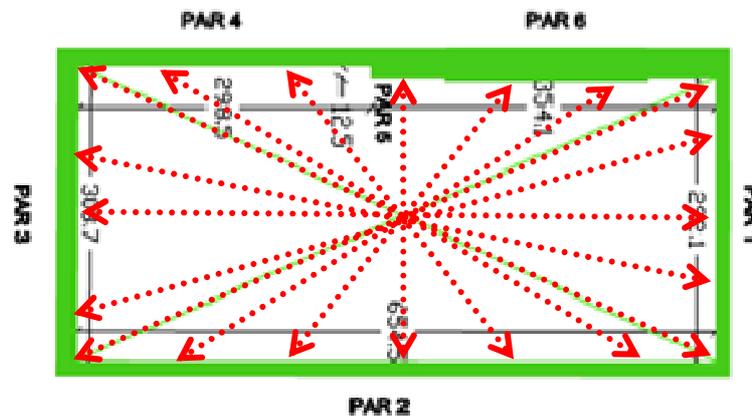
Fonte: Autor

Utilizando o aplicativo Canvas (desenvolvido pela Occipital, fabricante do sensor) foi realizada a varredura do ambiente, sendo que a malha 3D gerada, ao ser visualizada no *tablet*, apresentava seus cantos devidamente fechados, capacitando seu uso para posterior modelagem.

3.2.1.4 Levantamento com Fotogrametria Digital Terrestre (FTD)

Foi utilizado um dispositivo móvel Galaxy N8. O levantamento foi realizado a partir da coleta de fotos do mesmo ambiente anteriormente usado nos experimentos anteriores. No total foram 20 fotos, tiradas com o cuidado de manter um posicionamento ortogonal da extremidade para o alvo na parede oposta. Depois, mais 3 fotos focando detalhes de piso e forro, apenas para garantir uma varredura mais completa. A Figura 6 explica de forma mais detalhada o funcionamento deste processo e indicadas as posições dos observadores e seus alvos.

Figura 6: Pontos de vista de coleta de fotos do processo de FDT



Fonte: Autor

As fotos foram coletadas a partir da câmera de um dispositivo móvel tipo *smartphone*, para posteriormente serem processadas em *softwares* SfM.

3.2.1.5 Modelagem 3D a partir dos dados obtidos

Os produtos obtidos nos levantamentos, que serviram de base para a modelagem 3D BIM, foram:

a) Malha triangular: a malha sem textura, com extensão *dxf* foi aberta no *software* de modelagem BIM Autodesk Revit 2019, e criado o modelo 3D parcialmente semântico da sala. Foram utilizadas apenas as informações geométricas e volumétricas do perímetro da varredura, identificando paredes, piso e forro. A janela foi identificada, em função de seus vidros que possibilitaram a reflexão da luz externa, marcando a malha com uma ondulação característica.

Porém a identificação das portas foi dificultada pois deveriam ter se mantido abertas a fim de que a malha fosse projetada nestes locais, tornando mais fácil sua identificação. Desta forma, a malha gerada não pôde ser utilizada para identificação visual completa das informações de acabamento do ambiente.

b) Croqui manual com medidas: o croqui elaborado indicou as paredes, portas, janela e circulação. O mobiliário da sala não foi considerado. As medidas foram obtidas através das medições com trena laser, e registradas manualmente no croqui logo após cada medição. Posteriormente no computador, através do *software* Autodesk Revit 2019, foi realizada a modelagem 3D.

c) Pontos com coordenadas XYZ em ambiente CAD: os pontos 3D gerados a partir da estação total foram descarregados no computador, com a utilização do *software* Geomax Geo Office, gerando arquivos com extensão txt, dat e dxf sendo aberto no Autodesk Autocad 2019 para conferência. Após esta etapa, o arquivo exportado novamente, e aberto no Autodesk Revit 2019, onde foi executada a modelagem 3D BIM.

d) Malha triangular e/ou nuvem de pontos: as fotos coletadas foram processadas em 2 *softwares* de fotogrametria diferentes, mas que fazem o mesmo trabalho. Eles foram o Regard 3D e o 3DF Zephyr versão gratuita. Estes dois *softwares* são baseados em SfM e geram malhas triangulares 3D a partir da junção de pontos similares entre as fotos. Havia um forte interesse em testar os dois *softwares*, afim de verificar também as características, vantagens e desvantagens do uso de cada um deles.

3.2.2 Estudo de nuvens de pontos gerados a partir de diferentes dispositivos móveis em vistorias de acompanhamento de obras

As experimentações de campo foram aplicadas em uma obra modelo, realizando coletas de imagens, de maneira a testar diversas combinações de configurações de equipamentos e *softwares*, a fim de que se pudesse avaliar a viabilidade da FTD para geração de nuvens de pontos a partir de dispositivos móveis, e que possam ser úteis para apoio a rotinas de acompanhamento de obras.

3.2.2.1 Descrição da obra

A obra estudada se refere a um Centro Administrativo Municipal localizado no Estado do Rio Grande do Sul. O projeto de edificação da referida obra prevê uma área construída total de 3.524,87 m² com as seguintes dependências: gabinetes para Prefeito e Vice Prefeito com sanitários; salão nobre com sala de projeção; duas salas de reuniões; salas da Secretaria de Administração; salas da Procuradoria Municipal; salas das Secretarias de Planejamento, Fazenda e CPD; salas do Protocolo, IPTU, e Tesouraria; cantina com cozinha e sanitários; sala de motorista; sala de telefonia; sala do servidor; sanitários masculinos e femininos para público; sanitários femininos e masculinos para funcionários; salas para ar condicionado; depósitos; salas de apoio; copas; salas de máquinas para os elevadores; reservatórios superior e inferior; casa de gás; guarita; saguão; circulações; escadas; elevadores; garagem, abrigos para carros oficiais; guarita e serviços relativos à urbanização da área: O projeto prevê uma área de urbanização de 5.113,28 m² com rampas, escadas de acesso, e pavimentação. A Figura 7 mostra uma vista da maquete eletrônica da obra, mostrando sua Fachada Principal.

Figura 7: Maquete eletrônica da obra pesquisada.



Fonte: Fiscalização da obra

Quando as vistorias na obra iniciaram, as fundações já estavam concluídas e já se tinha uma parte da estrutura de concreto pré-moldado montada, com alguns pilares, vigas, lajes e escadas (Figura 8).

Figura 8: Vista da obra na primeira vistoria.



Fonte: Autor

Os projetos originais previam a execução da estrutura em concreto convencional, porém ao longo do processo foram alterados para concreto pré-moldado.

3.2.2.2 Coleta de dados

Nas vistorias de campo foram coletadas imagens da obra com uso de diferentes equipamentos e acessórios, além de diferentes pontos de vista. Após estas coletas, as imagens foram classificadas de acordo com a data, local e dispositivo usado.

Durante a primeira vistoria à obra foram coletadas 420 fotos das fachadas, a partir da câmera modelo SM-N770F, nativa do dispositivo móvel Galaxy N10. As fotos foram tiradas em formato retrato, colhidas de forma aleatória (sem maiores cuidados com formato, distância do alvo, ângulos e pontos de vista).

Na segunda vistoria foram coletadas 143 fotos das fachadas a partir mesmo dispositivo da vistoria anterior, desta vez utilizando a lente tipo angular (também chamada panorâmica ou olho de peixe) nativa do dispositivo. A diferença entre a lente normal e a lente angular pode ser vista na Figura 9 e na Figura 10.

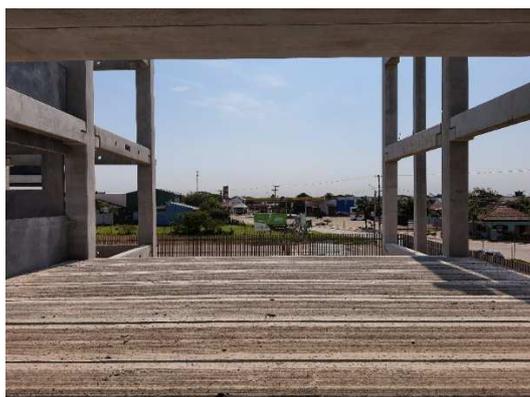


Figura 9: Foto com lente normal da câmera do Galaxy N10



Figura 10: Foto com lente angular tipo "olho de peixe" do Galaxy N10

Fonte: Autor

A opção de utilizar a lente angular foi considerada em função de reduzir a quantidade de fotos, de forma a manter a proposta de realizar uma coleta dinâmica e rápida além de um pós-processamento com menor complexidade.

Na Vistoria 3 foram realizadas 3 coletas. Na primeira, foram coletadas fotos com um dispositivo tipo *smartphone* da marca Xiaomi N6, utilizando sua câmera nativa com sua lente normal foram coletadas 128 fotos, e utilizando uma lente angular tipo olho de peixe, acoplada de forma adaptada ao dispositivo, foram coletadas 106 fotos das fachadas da obra. As fotos foram tiradas a uma distância entre 4 e 5 metros de afastamento do alinhamento da fachada, com o observador de pé no nível do terreno, a fim de verificar se, à uma curta distância, haveria alguma melhora na qualidade do modelo fotogramétrico.

Na segunda coleta foi utilizado o dispositivo Galaxy N10, onde foram coletadas 63 fotos, contemplando área interna do 2º Pavimento e área descoberta do 3º Pavimento.

Na terceira coleta foi utilizado o dispositivo IPAD 6, onde foram coletadas 41 fotos da área interna do 2º Pavimento.

Nas figuras abaixo é possível comparar um mesmo cenário com os 2 tipos de lentes usadas na primeira coleta. Observa-se que a lente olho de peixe (Figura 12) consegue captar mais informações por foto do que a lente normal (Figura 11).

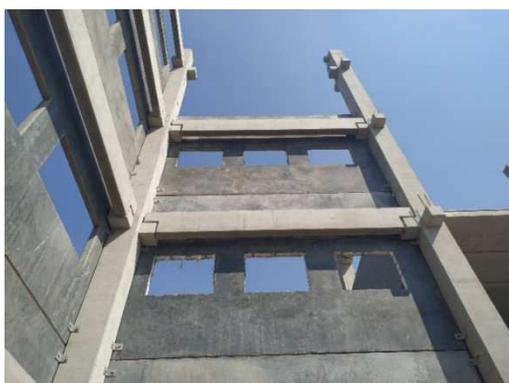


Figura 11: Foto usando a lente normal da câmera nativa do dispositivo Xiaomi N6



Figura 12: Foto com lente angular adaptada ao dispositivo Xiaomi N6

Fonte: Autor

Na quarta vistoria foram testadas formas diferentes de coleta, utilizando câmera de um *smartphone*, e uma câmera fotográfica portátil semiprofissional.

A primeira coleta foi realizada utilizando o dispositivo Galaxy N10 no modo Panorâmico, no qual o cenário da imagem é aumentado através de movimento lateral ou vertical do fotógrafo. Neste caso, a panorâmica foi posicionada na direção vertical. Foram coletadas 97 fotos.

A segunda coleta foi realizada com o dispositivo Canon SX510. A estratégia era aproveitar a qualidade da câmera, para tirar fotos a uma distância maior que as tentativas das demais vistorias, de modo a coletar uma quantidade maior de informação, com qualidade, e em menor tempo. Foram coletadas 115 fotos no total, com cobertura de todas as fachadas da obra.

A terceira coleta foi realizada com o mesmo dispositivo anterior, porém ao invés de fotos, foi feita uma filmagem de 8 minutos e 49 segundos, também contemplando todo o perímetro externo da obra. Utilizando o *software* livre de edição de vídeo, OpenShot, esta filmagem foi convertida em fotos sequenciais a uma taxa de 1 “frame” por segundo, totalizando 529 imagens.

3.2.2.3 Processamento dos dados através de DSM ou SfM

Como já visto anteriormente, de acordo com Groetelaars (2012), o DSM é um dos termos usados para tratar da técnica de obtenção de nuvens de pontos através do processamento digital de imagens fotográficas, assim como também pode ser

chamado de *Structure from Motion* (SfM). O processamento DSM ou SfM efetua a correlação automática de conjuntos de pixels homólogos em diferentes fotos, obtendo as coordenadas tridimensionais de pontos contidos na superfície dos objetos fotografados, produzindo então uma nuvem de pontos tridimensionais. Para que se tenha sucesso, entre outras regras, o objeto fotografado deve ter uma textura não uniforme, de modo a produzir conjuntos diferenciados de pixels. (GROTELAARS, 2012)

Foram realizados testes com *softwares* de fotogrametria baseados em DSM ou SfM, utilizando as fotos colhidas. Foram testados os *softwares* Regard 3D, 3DF Zephyr, Visual SfM, Agisoft Photoscan, Agisoft Metashape e Autodesk Recap Photo.

Os *softwares* da Agisoft (Photoscan e Metashape) foram utilizados na versão de demonstração com prazo de 30 dias. Seu uso acabou não sendo possível em função do tempo de aprendizagem somado ao prazo para o acompanhamento da obra ser superior a este prazo. Além disso, a versão de demonstração não permite o salvamento do projeto.

O *software* Autodesk Recap Photo foi utilizado na versão gratuita para estudantes. Inicialmente surgiram alguns contratempos na sua instalação e funcionamento em função de conflitos com a licença de estudante e atualizações necessárias, o que tomou muito tempo, até que se decidiu pausar seu uso. Após a pesquisa já estar mais avançada, retornou-se alguns testes para aprendizado com o Recap Photo, e verificou-se que ele teve um bom desempenho principalmente em função de seu processamento em nuvem. Porém em função das dificuldades iniciais de conflitos com a licença e atualizações, ele acabou gerando uma sensação de instabilidade e optou-se por não dar continuidade de utilização na pesquisa.

O *software* Visual SfM acabou sendo o mais usado nas amostras deste experimento. Sua velocidade de processamento foi alta frente aos demais, o que facilitou inúmeros processamentos de teste até se chegar nas amostras selecionadas.

Também foram usados *softwares* de reconstrução 3D e manipulação de nuvens e malhas. Os mais usados foram o Meshlab (“Meshlab”, acessado em 30/10/20) e o CloudCompare (“CloudCompare”, acessado em 30/10/20). O Meshlab teve um papel de destaque, principalmente nas fases iniciais, pois foi através dele que se construiu a base de aprendizado na manipulação de malhas triangulares e nuvens de pontos. Em função de ser para uso genérico em reconstrução 3D, ele tem

uma variedade grande de ferramentas, o que o torna pesado quando se trabalha com grandes quantidades de pontos. Nas fases finais da pesquisa, utilizou-se o CloudCompare por ser mais direcionado a projetos de varredura 3D de áreas maiores, trazendo maior rapidez de processamento em função de ser mais objetivo aos interesses da pesquisa.

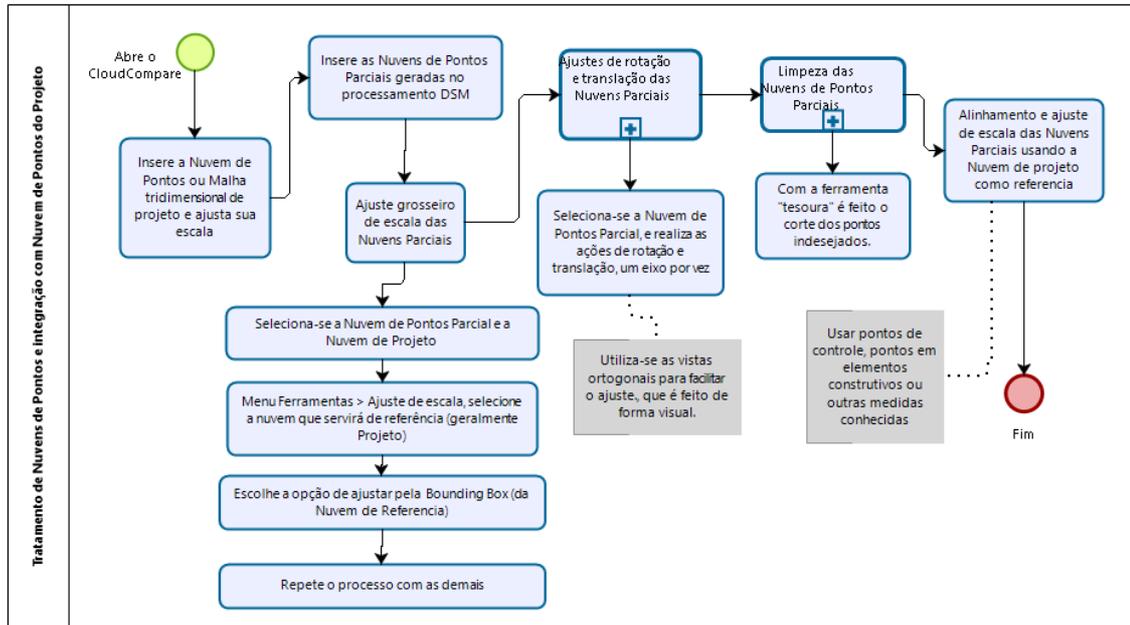
Nas fases de integração da varredura 3D com o modelo BIM da obra, foram experimentadas formas de integração das nuvens e malhas geradas, ao modelo 3D da obra. A intenção é que a partir dessa integração, fosse possível a identificação dos elementos estruturais e a comparação visual entre o varrido e o projetado.

A documentação original da obra não continha modelagem 3D, além de o projeto estrutural disponibilizado contemplar um sistema construtivo diferente do que estava sendo executado. Em função disso, a equipe de apoio à pesquisa, constituída por 3 bolsistas, procedeu a modelagem 3D básica da estrutura de concreto da obra, focando os serviços relacionados ao que seria analisado nos experimentos. Em função de já haver conhecimento prévio dos participantes da equipe em seu uso, foi escolhido o *software* de modelagem BIM Autodesk Revit versão estudantil para executar esta etapa.

As imagens foram processadas em diversos *softwares* SfM com diferentes configurações, diferentes agrupamentos de imagens e diferentes sequenciamento de imagens, porém, para que pudesse ser feita a análise nesta etapa da pesquisa, foram então escolhidas as amostras que, na visão do autor, traziam maior importância e representatividade, nem sempre apresentando os melhores resultados.

A partir dos grupos de imagens, foi realizado o processamento SfM e geradas nuvens de pontos variadas. Todas as nuvens geradas tiveram seu tempo de processamento cronometrado, para que se pudesse avaliar o trabalho computacional envolvido na geração de cada uma delas. Algumas amostras foram geradas com apenas uma nuvem, porém outras são produto de diversas nuvens, juntadas no *software* CloudCompare. O processo está ilustrado na Figura 13.

Figura 13: Processo de tratamento e integração de nuvens de pontos de varredura 3D.

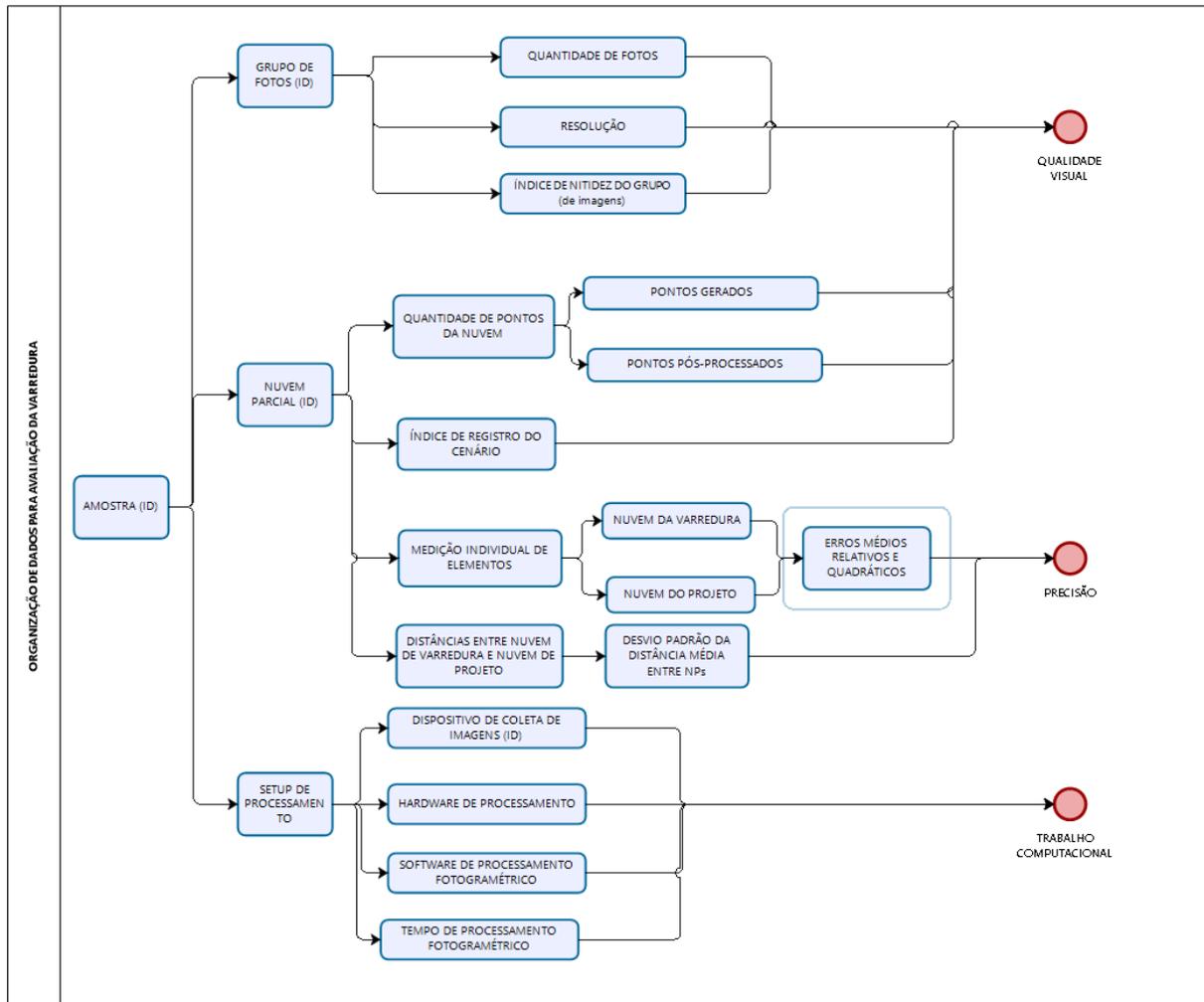


Fonte: Autor

Para que se pudesse analisar as nuvens de pontos, foram adotados indicadores que pudessem dar maiores informações a respeito da nuvem resultante da varredura, tendo como principais parâmetros: a qualidade visual, precisão e tempo computacional. Na Figura 14 se pode verificar a estrutura de análise realizada em cada amostra, baseada em Bhatla *et al.* (2012).

Conforme demonstrado na Figura 14, os dados gerados foram classificados e analisados em diversas camadas, até que pudessem apresentar alguma relação com os parâmetros principais de análise, citados anteriormente.

Figura 14: Processo de avaliação das nuvens de pontos resultantes das varreduras 3D para cada amostra.



Fonte: Autor

Inicialmente, foi feita a cronometragem do tempo de processamento SfM para os grupos de imagens. Como houve amostras processadas em diferentes “hardwares”, houve a necessidade de avaliação de cada um dos equipamentos usados, principalmente de dois que participaram do processamento de dados das amostras analisadas. Foi realizada avaliação da capacidade de processamento através de ferramenta de avaliação do 3DF Zephyr.

A avaliação consiste no processamento de um conjunto de imagens padrão do *software*, onde é avaliado o desempenho do *hardware* durante o processo e o resultado é o tempo de processamento em cada etapa e no total. Através desta análise, foi determinado, um fator de comparação entre *hardwares*, para ser aplicado no tempo cronometrado.

Na sequência foi realizada a contabilização dos IQIs (Índice de Qualidade das Imagens) das imagens dos grupos de cada uma das vistorias. Nesta etapa, foram consideradas uma quantidade equivalente a 10% do total de imagens do grupo, ordenados pelo valor do seu IQI, de acordo com análise da ferramenta do *software* 3DF Zephyr. Com esta parcela de 10% das melhores fotos, foi determinado o ING (Índice de Nitidez do Grupo). O ING foi obtido a partir da razão entre o IQI médio das 10% melhores fotos pelo IQI da melhor foto do grupo, conforme equação abaixo:

$$\text{ING} = \frac{\text{IQI}_1 + \text{IQI}_2 + \dots + \text{IQI}_n}{n \cdot \text{IQI}_{\text{MÁX}}} \quad (1)$$

$$\text{ING} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{IQI}_i}{n \cdot \text{IQI}_{\text{MÁX}}} \quad (2)$$

Onde:

n = quantidade equivalente à 10% do total do grupo

IQI = nota dada pela ferramenta de avaliação do 3DF Zephyr para cada imagem do grupo baseada em sua nitidez

IQI_{MÁX} = nota da imagem com melhor nitidez do grupo, de acordo com a ferramenta de avaliação do 3DF Zephyr

A Resolução teve variação no grupo de imagens da Vistoria-4, em função das mesmas serem originadas de fotos e sequências de vídeos. Desta forma, para esta vistoria foi adotada uma Resolução Média ponderada, considerando, do grupo de 10% das imagens com maior nitidez, o peso do IQI de cada imagem, que foi calculado conforme a equação abaixo:

$$\text{Resolução Média} = \frac{\text{Resolução}_1 \cdot \text{IQI}_1 + \text{Resolução}_2 \cdot \text{IQI}_2 + \dots + \text{Resolução}_n \cdot \text{IQI}_n}{\text{IQI}_1 + \text{IQI}_2 + \dots + \text{IQI}_n} \quad (3)$$

$$\text{Resolução Média} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Resolução}_i \cdot \text{IQI}_i}{\sum_{i=1}^n \text{IQI}_i} \quad (4)$$

Para a análise das nuvens de pontos geradas pelas varreduras 3D realizadas nas vistorias em obra, foi necessário o processamento das nuvens de pontos

parciais. As Nuvens de Pontos Parciais são nuvens geradas de forma particionada, ou seja, devem receber tratamento (rotações, translações, escala, limpeza dos pontos não necessários) manual, e posteriormente são unidas as demais nuvens parciais, formando assim uma nuvem resultante, contemplando todas as áreas da obra que foram varridas naquela ocasião. Nesta etapa, duas informações são colhidas: a quantidade de pontos da nuvem logo após ser gerada, e mais tarde, verificação da quantidade de pontos restantes após as etapas de tratamento. A razão entre estes dois valores indica a variável Índice de Aproveitamento da Nuvem, ou seja, o percentual da nuvem original que foi mantido após os ajustes e limpezas necessários. A intenção é analisar principalmente a quantidade de pontos considerados “outliers” da varredura 3D, bem como a captura de cenários que não interessam fazer parte da nuvem de pontos resultante.

Outra variável que foi usada para tentar avaliar a qualidade visual da nuvem de pontos e a eficiência da varredura 3D é o Índice de Registro do Cenário. Ele é determinado a partir da razão entre a quantidade total de pontos gerados e a quantidade total de pixels de todas as imagens pertencentes ao grupo. Esta quantidade é determinada através das seguintes equações:

$$\text{Quant. Pixels Captados} = \text{Quant. Fotos (un)} \times \text{Resolução (MP)}$$

Então,

$$\text{IRC} = \frac{\text{Pontos Gerados}}{\text{Quantidade de pixels captados}} \quad (5)$$

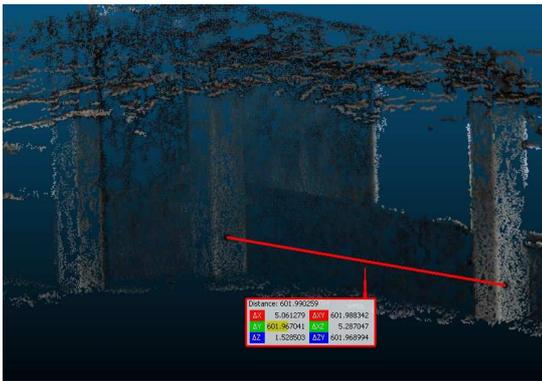
Quanto maior o valor deste índice, maior é a efetividade das imagens usadas na geração das nuvens de pontos deste grupo.

Com relação à precisão, foram previstos dois tipos de variáveis: uma para análise local, comparando medidas de elementos isolados entre varredura 3D e projeto, e outra para análise global, verificando as distâncias entre pontos na mesma vizinhança, entre a nuvem de varredura e a nuvem de projeto (referência).

Para as verificações locais foram sobrepostas a nuvem resultante de varredura e a nuvem de projeto. Como já explicado anteriormente, a nuvem resultante de varredura é o resultado do levantamento realizado “in loco” através de imagens colhidas a partir de dispositivos móveis. Já a nuvem de projeto foi gerada

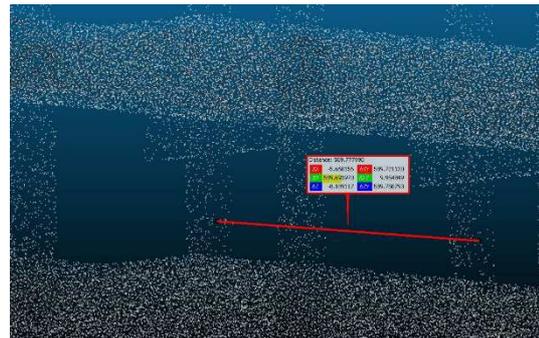
através do modelo 3D BIM da obra. Desta forma, foram escolhidos aleatoriamente 8 (oito) locais ou elementos construtivos para serem realizadas medições, tanto na nuvem de varredura como na de projeto, conforme pode-se visualizar um exemplo na Figura 15 e Figura 16.

Figura 15: Medida através da nuvem de varredura no 2º Pavimento



Fonte: Autor

Figura 16: Medida do mesmo local da figura ao lado, porem através da nuvem de projeto



Fonte: Autor

No total, foram realizadas 112 medições isoladas em nuvens de pontos de elementos e locais, considerando todas as vistorias. Esta forma de avaliação foi baseada em Bhatla *et al.* (2012)

Os resultados eram anotados e, a partir de suas diferenças, foram calculados: Erro Absoluto e o Erro Relativo de cada elemento. Com isso, foi possível calcular o Erro Médio Relativo e o Erro Médio Quadrático para medições isoladas locais. Os cálculos foram realizados conforme as equações abaixo.

$$EA = |Med_{projeto}| - |Med_{varredura}| \quad (6)$$

$$ER = \frac{EA}{Med_{projeto}} \quad (7)$$

Então,

$$EMR = \sum_{i=1}^n \frac{ER}{n} \quad (8)$$

$$EMQ = \sum_{i=1}^n \left(\frac{EA}{n} \right)^2 \quad (9)$$

Onde:

$Med_{projeto}$ = Medidas colhidas na nuvem do modelo 3D do projeto

$Med_{varredura}$ = Medidas colhidas na nuvem resultante de varredura 3D

EA = Erro Absoluto

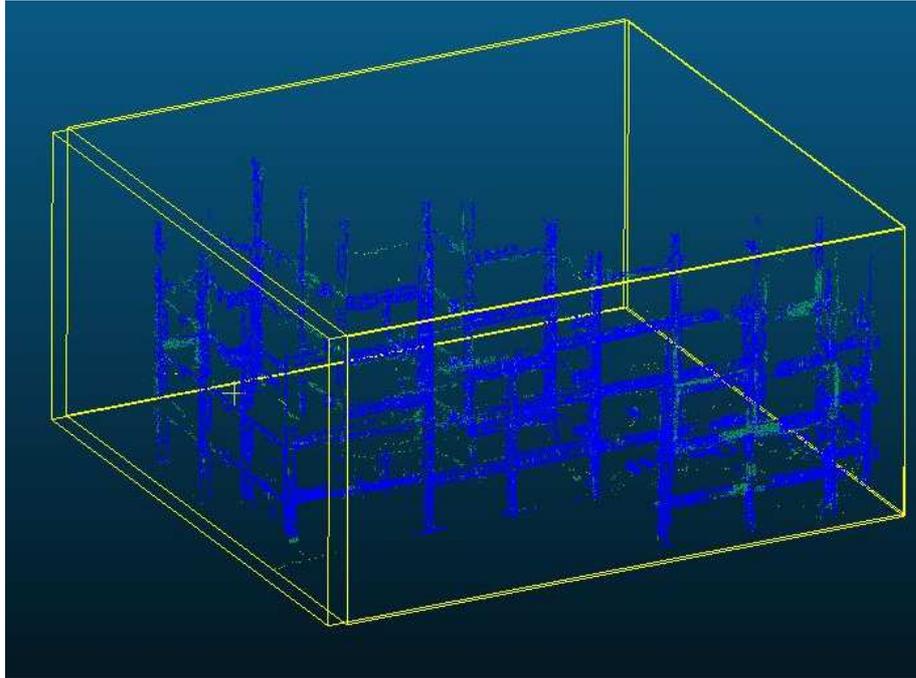
ER = Erro Relativo

EMR = Erro Médio Relativo

EMQ = Erro Médio Quadrático

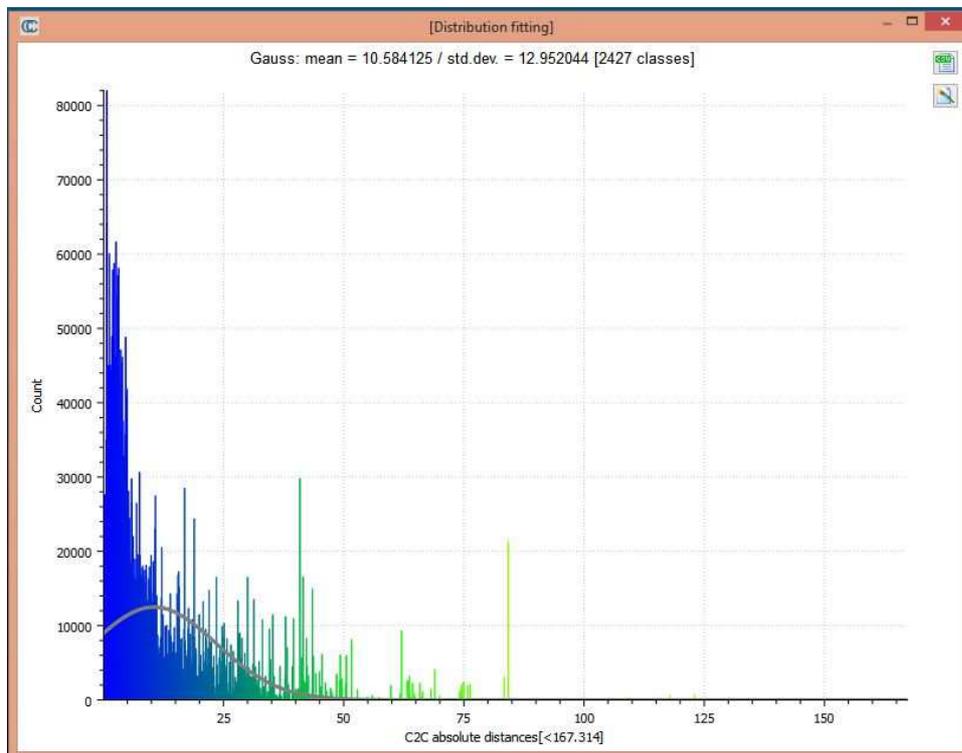
Para as verificações globais foram consideradas as nuvens como um elemento único, onde através de medições no *software* CloudCompare, foi possível determinar a Distância Média entre nuvens e o Desvio Padrão da mesma. Para isso foi necessário em um primeiro momento, ajustar as nuvens de projeto com as de varredura. Isso porque as nuvens de projeto carregavam muito mais informações que as de varredura, que informavam apenas o que estava executado até aquela data. Desta forma, através de algoritmo do CloudCompare, foi possível manter nas duas nuvens (de projeto e de varredura) apenas os pontos “vizinhos” indicando que representavam elementos que coexistiam nos dois modelos, ou seja, pontos que estavam praticamente sobrepostos em uma mesma região, representando elementos projetados que após a varredura, foi confirmado que realmente estavam executados, como mostra a Figura 17, onde a cor azul indica a proximidade entre as nuvens e os pontos mais claros indicam que as distâncias entre elas são maiores. As variáveis relacionadas às distâncias entre nuvens foram obtidas como pode-se observar na Figura 18, onde *mean* indica a distância média entre as nuvens de varredura e projeto, e *std. dev.* indica o desvio padrão. Esta forma de avaliação foi baseada em Khalloufi *et al.* (2020).

Figura 17: Nuvens de pontos sobrepostas.



Fonte: Autor

Figura 18: Gráfico das distâncias entre NPs



Fonte: Autor

3.2.2.4 Análise estatística dos dados

Após todas as informações terem sido devidamente calculadas, planilhadas e organizadas, a estrutura de dados ficou mais clara para ser observada. A intenção, a partir de uma análise estatística foi verificar se existe correlação entre as variáveis levantadas em cada visita realizada.

Tendo por base Larson; Farber (2015), definiu-se que as etapas para se verificar a correlação entre variáveis deveria ser: a) identificar as variáveis dependentes e independentes, b) verificar se a distribuição pode ser considerada normal, utilizando o teste de Shapiro-Wilk, c) calcular o coeficiente de correlação r para determinar se existe a probabilidade de haver relação entre as mesmas, utilizando o método de Pearson; d) caso seja verificada a correlação, utilizar a Regressão Linear para determinar a equação da reta que melhor modela os dados. Foi utilizado o *software* PAST 3.21 para realização da inferência estatística dos dados obtidos. A Tabela 4 mostra a organização das variáveis e as verificações de correlação entre as mesmas.

Tabela 4: Identificação das variáveis da pesquisa e suas análises comparativas

VARIÁVEIS INDEPENDENTES		VARIÁVEIS DEPENDENTES								
		QUANTITATIVA CONTÍNUA	QUANTITATIVA CONTÍNUA							
	TIPO DE VARIÁVEL									
		ING (%)	IANP (%)	IRC (un/MP)	Dist. Média NPs (cm)	Desvio Padrão (cm)	EMR (cm)	EMQ (cm)	TEMPO PROCES. P/ FOTO (s)	
QUANTITATIVA CONTÍNUA	QUANT. DE FOTOS (un)	REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	REGRESSÃO LINEAR SIMPLES							
QUALITATIVA ORDINAL	RESOLUÇÃO (MP)	REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	REGRESSÃO LINEAR SIMPLES							

Fonte: Autor

Definiu-se que nesta pesquisa não analisar as variáveis qualitativas nominais, visto que o foco é o uso de dispositivos móveis para varredura, e que diante de uma grande diversidade de opções existentes no mercado, optou-se por utilizar a variável qualitativa ordinal Resolução para representar os mesmos, não entrando no mérito a avaliação da qualidade dos dispositivos ou dos fabricantes dos mesmos, bem como a avaliação dos *softwares* utilizados.

Em função da aparente dispersão entre valores de variáveis, decidiu-se identificar a existência de *outliers* que pudessem trazer distorções aos resultados. De acordo com Larson; Farber (2015), *outliers* são calculados para determinação dos limites superiores e inferiores para os grupos de dados, a partir das equações demonstradas abaixo, utilizando a amplitude interquartil.

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (10)$$

$$\text{Lim}_{\text{superior}} = \text{Média das amostras} + (1,5 \times IQR) \quad (11)$$

$$\text{Lim}_{\text{inferior}} = \text{Média das amostras} - (1,5 \times IQR) \quad (12)$$

Onde,

IQR = Amplitude interquartil

Q1 e Q3 = Quartis 1 e 3 da amostra

Lim_{superior} = Limite superior

Lim_{inferior} = Limite inferior

Seguindo o roteiro adotado, foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk utilizando o *software* PAST 3.21 onde o resultado p(normal) maior que 0,05 caracteriza que as mesmas são consideradas com distribuição normal. (HAMMER, 2018)

A próxima etapa foi a verificação do coeficiente de correlação r de Pearson, entre as variáveis.

Seguindo adiante, foi realizada a análise através de Regressão Linear Simples nas correlações identificadas na etapa anterior, para verificar se realmente pode-se considerar estas relações entre variáveis. Foi mais uma vez utilizado o PAST 3.21, no módulo *Model Linear Bivariate*.

3.3 ETAPA 3: APLICAÇÃO EM ROTINAS DE ACOMPANHAMENTO DE OBRAS

Nesta aplicação, o objetivo foi buscar utilizar varreduras 3D obtidas a partir de dispositivos móveis, de forma prática e útil, em processos cotidianos da rotina de acompanhamento de obras, nesse caso, medição de avanço físico de obra.

A aplicação foi realizada na mesma obra da segunda experiência, descrita no item 3.2.2.1, sendo que as fotos e algumas nuvens utilizadas são remanescentes desse experimento.

Nesta aplicação, o objetivo foi coletar fotos da obra, gerar nuvens de pontos que poderiam ser juntadas, formando uma nuvem de pontos resultante mostrando o cenário da obra naquela data, integrar esta nuvem resultante ao modelo 3D BIM da obra, e através dele retirar quantitativos de produção acumulada até aquela data.

Neste caso, a nuvem de pontos atuou como uma referência visual, a fim de auxiliar a identificação dos elementos construídos, no modelo BIM, e facilitar sua seleção para filtragem de fase de obra e uso desta informação em relatórios de quantitativos.

Nas fases de integração da varredura 3D com o modelo BIM da obra foram experimentadas formas de integração das nuvens e malhas geradas ao modelo 3D da obra, sem realizar a segmentação e ajustes finos da nuvem junto ao modelo de projeto, como os realizados na experiência anterior. A intenção é que a nuvem fosse utilizada o menos processada possível, a fim de se testar um método com baixo grau de complexidade e maior atratividade para o uso cotidiano. A partir dessa integração, era esperado ser possível a identificação dos elementos estruturais e a comparação visual entre o realizado e o projetado.

Como já exposto anteriormente, a documentação oficial da obra não continha modelagem 3D BIM. Em função disso, a equipe de apoio à pesquisa, realizou a modelagem utilizando o *software* de modelagem BIM Autodesk Revit versão estudantil.

Com o Revit, foram configurados filtros de fase de modo a promover a separação dos elementos que são cobertos pelas nuvens ou malhas, dos demais elementos do modelo BIM. Dessa forma foi possível efetuar listagens de quantitativos de materiais e serviços através deste *software* BIM. De posse das nuvens de pontos de cada uma das vistorias, foram realizados testes para integração das mesmas ao modelo 3D projetado da obra.

Com o uso dos filtros de fase foi possível identificar e parametrizar os elementos que tinham relação com a nuvem de pontos de cada vistoria, e posteriormente obter listagens de quantitativos dos mesmos.

Após a geração da nuvem de pontos resultante da data da vistoria, a mesma foi inserida no modelo BIM para que se fizesse a sobreposição dos dois objetos e se

processasse a integração e interpretação da influência da nuvem sobre o modelo, para que fosse realizada a seleção dos elementos executados no período e parametrizados de forma a poderem ser identificados posteriormente em listagens de quantitativos.

A seguir são descritos os processos de integração da nuvem de pontos resultante dos registros de cada uma das quatro vistorias realizadas ao modelo BIM da obra.

3.3.1 Vistoria 1: Integração da Nuvem de Pontos Resultante com o modelo BIM

Desde a primeira etapa de tratamento dos dados foi verificado que o *software* Revit não abria arquivos com a extensão ply. e nem uma outra extensão disponível no CloudCompare. Desta forma, deveria ser feita a conversão dos dados para alguma das extensões aceitas pelo Revit. Para realizar a conversão, foram testados alguns programas alternativos como o Meshlab e o Autodesk Recap.

No Meshlab, a nuvem de pontos ply foi aberta e salva como dxf, porém o Revit não conseguiu abrir este arquivo dxf. Outra alternativa utilizada foi a exportação de nuvem de pontos com extensão fbx diretamente do 3DF Zephyr, para o Autodesk Autocad, e na sequência, salvar como um arquivo dxf e novamente retornar à tentativa de abri-lo no Revit. Embora esse caminho tenha funcionado, todas as nuvens de cada vistoria deveriam ser montadas diretamente no Revit, e isso demandaria um longo e complexo trabalho, o que resultou em abortar essa alternativa, pois a mesma não seria uma solução viável.

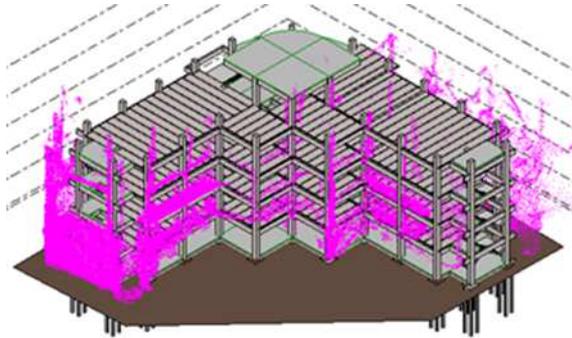
Através de pesquisa na internet, no fórum do site <https://www.danielgm.net/> ("Forum CloudCompare", acessado em 29/10/20) se verificou que a versão do CloudCompare que estava sendo usada era muito antiga e a partir da atualização do *software*, a exportação da nuvem em extensão dxf tornou-se possível.

Foi então realizado o salvamento da nuvem resultante do CloudCompare em extensão dxf com interface no *software* Autodesk Revit. A nuvem de pontos foi carregada no Revit com uma única cor tipo RGB (Figura 19), ao contrário do CloudCompare, que apresentava a textura colorida das fotos (Figura 20). Infelizmente não se conseguiu evoluir nesta questão.

Figura 19 - Nuvem de pontos em uma

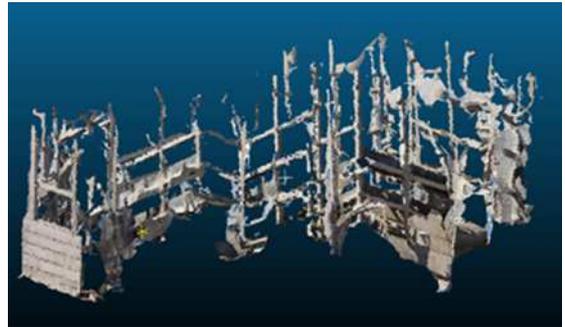
Figura 20 - Nuvem de pontos com

única cor RGB (magenta)



Fonte: Registrado pelo autor.

textura real

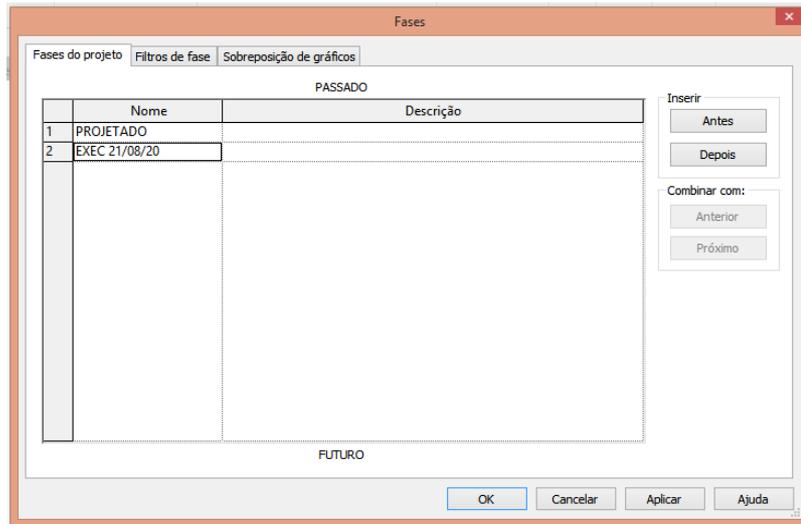


Fonte: Registrado pelo autor.

Ao fazer a integração da Nuvem de Pontos Resultante da Vistoria 1 com o modelo BIM (Figura 19), verificou-se desajustes de escala, o que comprova a baixa precisão geométrica do sistema. O ajuste na nuvem foi feito através de um aumento de 8% em sua escala, mesmo assim alguns locais ainda não obtiveram total integração. Pelo entendimento do autor, isso se deu não apenas em função da baixa qualidade da nuvem de varredura utilizada, devendo se buscar melhores exemplares nas próximas integrações que contariam com nuvens de melhor qualidade, mas também pela falta de experiência do pesquisador na operação do *software* CloudCompare.

O recurso “Fases” do Revit foi usado para gerenciar esta integração, através da organização dos elementos e geração de tabelas quantitativas que foram usadas para as medições de obra. A Figura 21 mostra a tela de configuração desta ferramenta.

Figura 21 - Tela da ferramenta “Fases” do *software* Revit utilizada para filtragem de visualização dos elementos

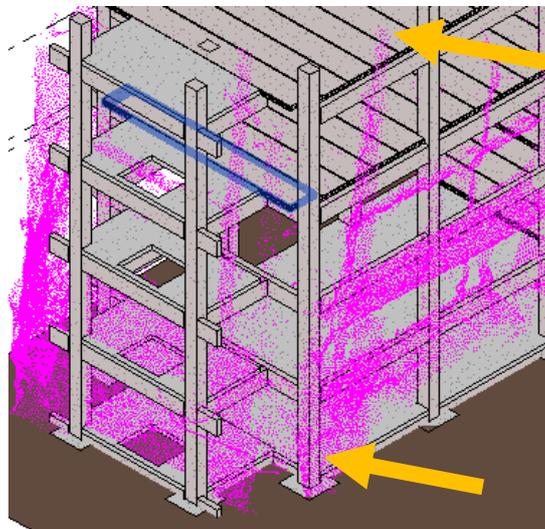


Fonte: Registrado pelo autor.

Como é possível observar na Figura 21, o modelo 3D BIM foi inicialmente configurado na fase “PROJETADO”. A nuvem de pontos da Vistoria 1, bem como todos os elementos e locais do modelo BIM que estiverem sob sua projeção, foram alterados para a fase “EXEC 21/08/20”.

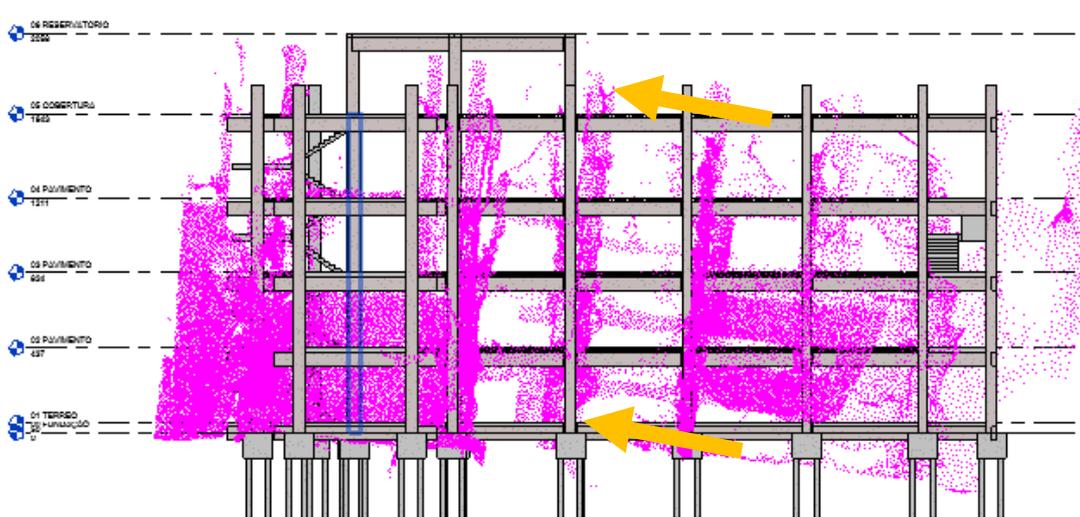
Logo que a nuvem foi integrada ao modelo, necessitou receber alguns ajustes para que fossem tratadas algumas inconsistências geométricas com ajustes de escala e movimentos de translação e rotação nos eixos XYZ. A Figura 22 e a Figura 23 apresentam alguns exemplos. As setas laranjas indicam as distorções entre os pontos dos pilares e o modelo.

Figura 22 - A nuvem de pontos quando é inserida no arquivo do modelo BIM.



Fonte: Registrado pelo autor.

Figura 23 - Projeção do pilar da nuvem, inclinado em relação ao modelo BIM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Realizados os ajustes, se iniciou o processo de seleção dos elementos do modelo projetado. Para facilitar este trabalho, o modelo foi aberto por pavimentos em planta baixa, onde a sobreposição da nuvem de pontos ficou com uma visibilidade melhor para se realizar a seleção. A Figura 24 mostra esse processo. Os elementos em azul representam tudo o que está sombreado pela nuvem de pontos, e, portanto, será alterado em sua fase passando de PROJETADO para EXECUTADO ATÉ 21/08/20

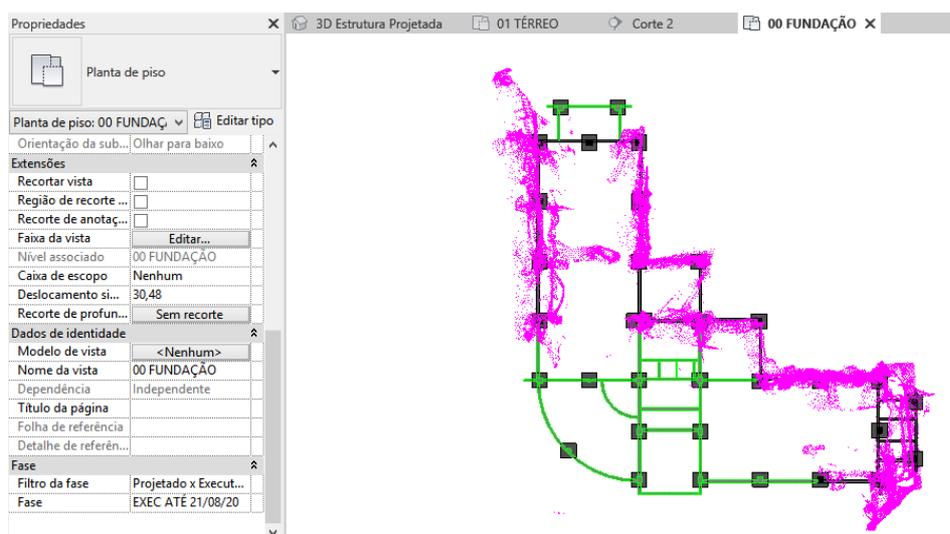
Figura 24 – Seleção para alteração de fase de obra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O filtro de fase Projetado x Executado foi configurado para apresentar os elementos do projeto original que ainda não foram executados, com linhas na cor verde. Desta forma, fica mais fácil a visualização, como se pode verificar na Figura 25.

Figura 25 – Apresentação do modelo com o filtro de fase acionado

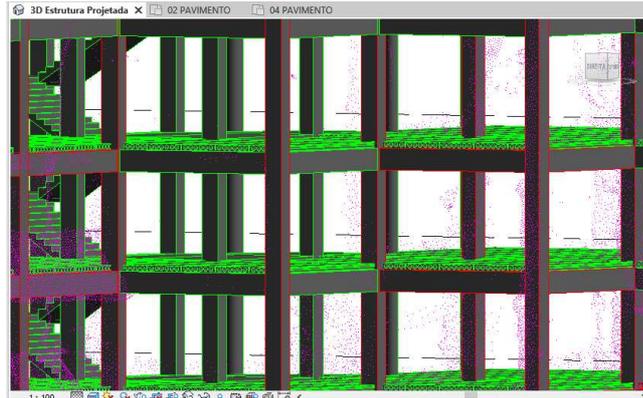


Fonte: Elaborado pelo autor.

Como verificado na Figura 25, é mostrada a vista em planta-baixa do nível da fundação, onde se observa os pilares e as vigas baldrame fora da influência da nuvem de pontos, em verde. Os blocos de fundação já estavam executados na data da vistoria, porém não foram identificados pela nuvem de pontos em função da forma como ela foi trabalhada nas etapas anteriores, desprezando o terreno e mantendo no modelo apenas as estruturas superficiais. Mas caso fosse necessário, a identificação da superfície dos blocos de fundação seria possível.

Com o filtro Projetado x Executado, o que foi PROJETADO tem linhas verdes e o que foi EXECUTADO tem linhas vermelhas (Figura 26). Isto facilita na identificação dos elementos quando necessitam de seleção individual, seu reconhecimento e diferenciação entre as peças.

Figura 26 – Filtro de fase acionado, realçando o projetado x executado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após os elementos serem incluídos na fase relativa à medição, o filtro é acionado, e visualmente podem ser verificados os itens medidos.

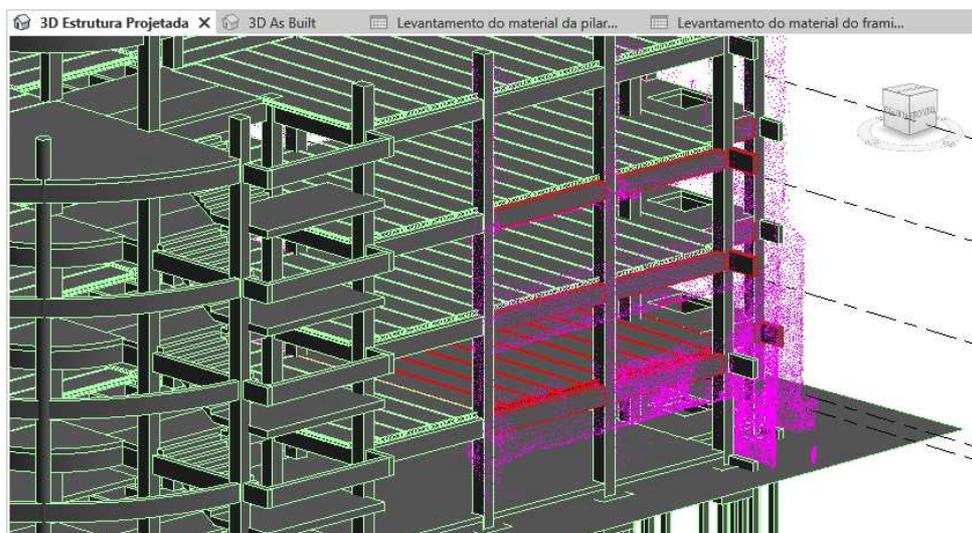
3.3.2 Vistoria 2: Integração da Nuvem de Pontos com o modelo BIM

Com o aprendizado obtido no modelo realizado com os dados coletados na primeira vistoria à obra, a geração do modelo com os dados coletados na Vistoria 2 foi mais fácil.

A identificação dos elementos para a mudança de fase de “projetado” para “executado” se deu através da seleção das peças da estrutura de concreto que estavam sob influência da nuvem de pontos, mas que ainda não haviam sido selecionados para a fase “executado” até a Vistoria 2, ou seja, foi feita apenas uma atualização da seleção dos elementos sob influência da Nuvem de Pontos Resultante.

A Figura 27 mostra os elementos em vermelho que estavam sob a influência da nuvem de pontos (em magenta) que estavam na fase “projetado” e foram alterados para a fase “executado”, indicando o avanço físico ocorrido entre a Vistoria 1 e a Vistoria 2.

Figura 27 – Elementos sobrepostos à nuvem de pontos que tiveram sua fase alterada

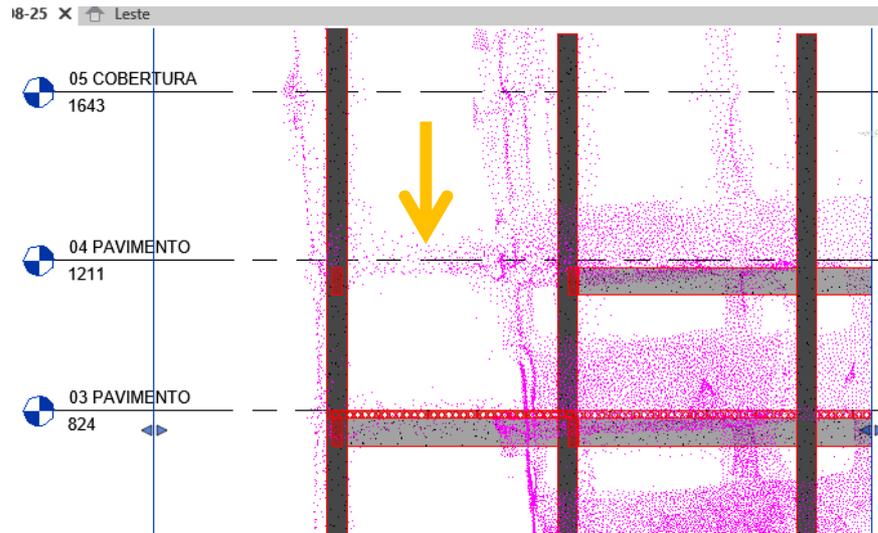


Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Figura 27, o filtro destaca em vermelho apenas o que estiver na fase “executado” até a Vistoria 2, sendo que em verde claro estão tanto os elementos da fase “projetado” como os elementos da fase “executado” até a Vistoria 1. O ideal é que estes dois últimos também estivessem destacados em cores diferentes entre si. Desta forma, se decidiu usar um recurso das configurações de filtros, que é juntar fases, de maneira que o modelo mostrará os elementos executados de forma acumulada, exigindo que cada medição fosse salva em arquivo separado, para que as informações da evolução do processo não se perdessem.

Os filtros se mostraram úteis ao processo, visto que facilitaram a visualização e identificação de elementos. Apesar das distorções e falta de precisão da nuvem de pontos, quando a mesma é projetada sobre o modelo com filtro de fase acionado, mostra bem os elementos que estão sobre sua influência, tanto os que precisam ser selecionados quanto os que por ventura forem selecionados de forma equivocada. Como se pode ver na Figura 28, a seta laranja destaca uma viga que estava presente na nuvem de pontos e que por equívoco não havia sido selecionada anteriormente, comprovando a eficácia desta sobreposição na identificação e medição das peças estruturais, mesmo que ela apresente distorções, irregularidades, superfícies contorcidas ou precisão geométrica não totalmente confiável.

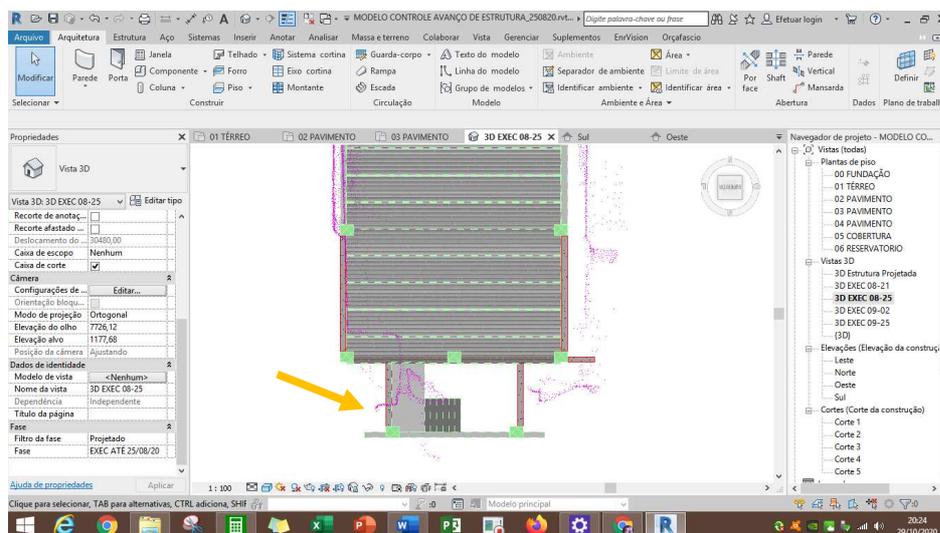
Figura 28 - Viga prevista na nuvem de pontos que não foi incluída na fase de medição



Fonte: Elaborado pelo autor.

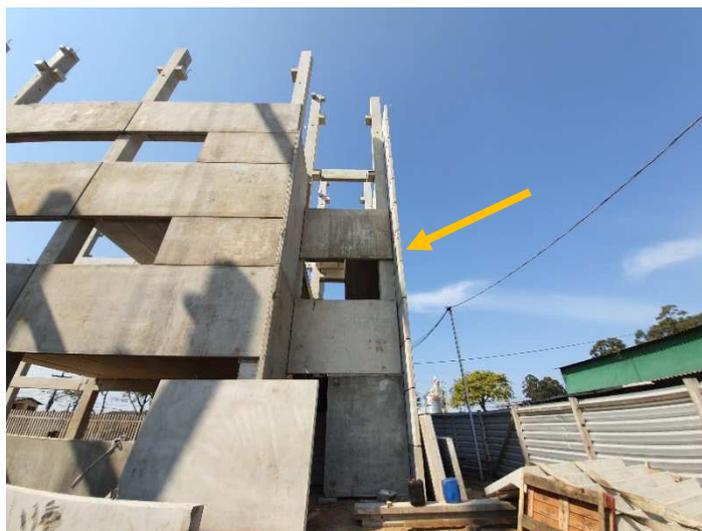
Mesmo assim, algumas situações geram dúvidas, principalmente em cantos e extremidades, onde o entendimento não é direto, e existe a necessidade de recorrer à fotos. Na Figura 29 pode ser visualizada uma distorção na nuvem de pontos que apenas analisando com o modelo BIM, não se tem condições de entendimento do que está acontecendo neste local. Nestes casos, deve-se recorrer as fotografias (Figura 30) para dirimir dúvidas.

Figura 29 - Distorções da nuvem de pontos em extremidades e cantos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Uso da foto para dirimir dúvidas sobre distorções na nuvem de pontos.



Fonte: Registrado pelo autor.

3.3.3 Vistoria 3: Integração da Nuvem de Pontos Resultante com o modelo BIM

Antes da integração da nuvem da Vistoria 3, a mesma foi novamente trabalhada no *software* CloudCompare, aproveitando o aprendizado no uso de recursos no modelo anterior para fazer o máximo possível de ajustes de limpeza e escala, tentando reduzir ao máximo as distorções e desalinhamentos, além de melhorar mais a exclusão de pontos sem relevância, para que a nuvem chegasse mais adequada possível ao *software* Revit.

O resultado desta operação foi positivo. A nuvem se apresentou mais alinhada e menos distorcida que a original, conforme mostrado na Figura 31, Figura 32 e Figura 33, mostrando as nuvens originais (Figura 31 e Figura 33 à esquerda) e nuvens retrabalhadas no CloudCompare (Figura 32 e Figura 33 à direita) antes de ir para o Revit, após limpeza de pontos sem relevância, alinhamentos de vigas e prumo de pilares.

Figura 31 - A nuvem resultante antes do reajustes no CloudCompare.

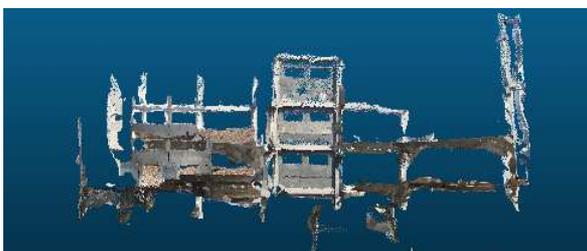
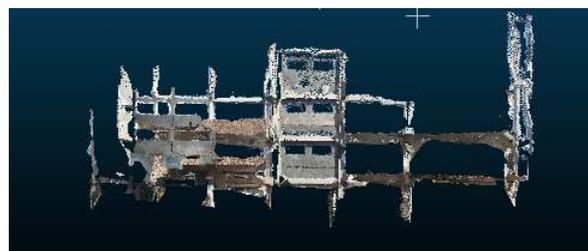


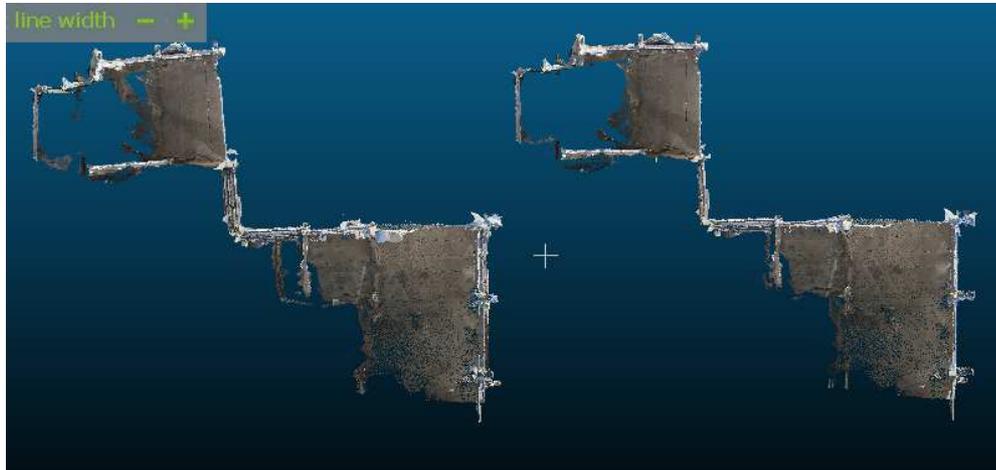
Figura 32 - A mesma nuvem após reajustes no CloudCompare.



Fonte: Registrado pelo autor.

Fonte: Registrado pelo autor.

Figura 33 - Nuvens de pontos, antes e depois dos ajustes no CloudCompare



Fonte: Registrado pelo autor.

Na Figura 33, a nuvem da esquerda é a original, e a da direita é a nuvem retrabalhada. Notam-se diferenças nos ângulos, principalmente rotações nos cantos do prédio.

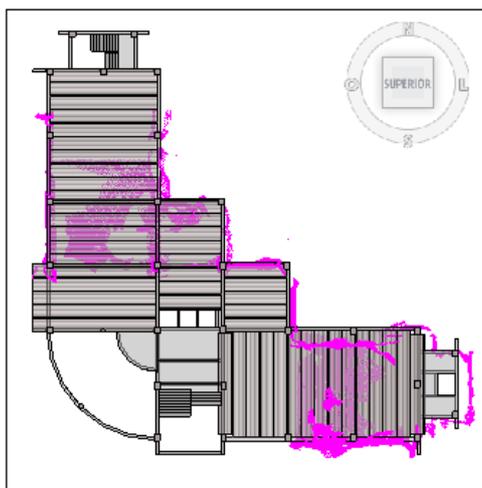
Concluídos os ajustes na Nuvem de Pontos Resultante foi então feita a importação da mesma em dxf para o Revit, para sobreposição ao modelo BIM da obra. Neste modelo, com o auxílio da Caixa de Corte da vista 3D (Figura 34 e Figura 35), foi possível isolar as lajes dos pavimentos, possibilitando realizar seleção dos elementos por pavimento, incrementando a visibilidade e melhorando a confiabilidade da medição.

Figura 34 - Vista frontal da Caixa de Corte da vista 3D



Fonte: Registrado pelo autor.

Figura 35 - Vista superior da Caixa de Corte da vista 3D



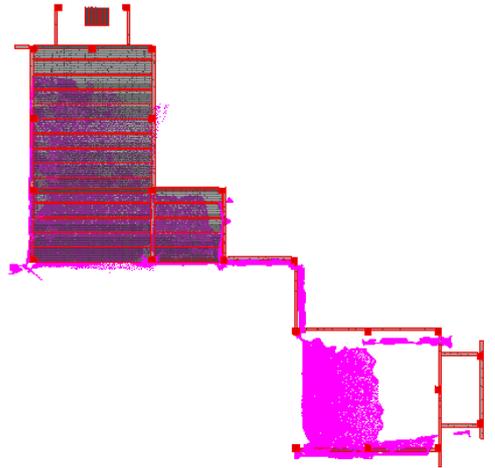
Fonte: Registrado pelo autor.

A Figura 34 mostra a Caixa de Corte através de vista frontal do prédio simulando um corte vertical, já a Figura 35 mostra a Caixa de Corte através de vista superior, simulando uma planta-baixa. Nas duas figuras pode-se notar em destaque na cor magenta a Nuvem de Pontos Resultante, e sua área de influência no modelo BIM.

Após a seleção dos elementos que haviam sido executados, e aplicados os filtros de fase, verificou-se que na Vistoria 2, o avanço físico daquele período se deu em grande parte, pela execução de lajes.

Em função das fotos terem sido tiradas de uma longa distância, nota-se na Figura 36 que a nuvem mostra apenas as lajes mais próximas das bordas. Caso o responsável pela medição tenha alguma dúvida sobre a área real de lajes executadas, ele pode recorrer às fotos deste local para confirmar estas informações.

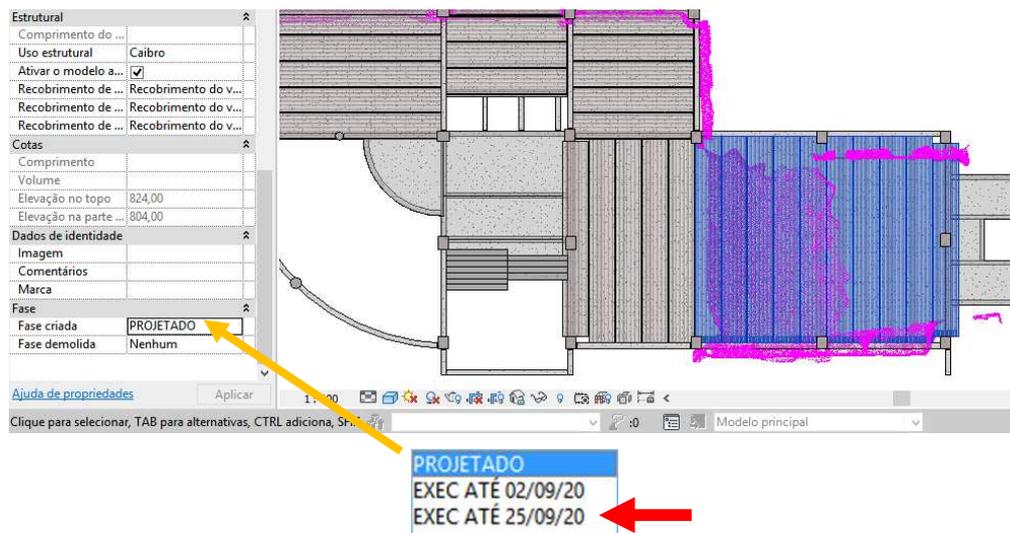
Figura 36 - A nuvem indicando que ainda havia lajes à medir no 3º Pavimento.



Fonte: Registrado pelo autor.

A Figura 37 mostra o momento em que as lajes são alteradas da fase “PROJETADO” para a fase “EXEC até a Vistoria 3”.

Figura 37 – Alteração da fase das lajes selecionadas



Fonte: Registrado pelo autor.

As lajes foram selecionadas, e alteradas no menu da fase “PROJETADO” para a fase “EXEC até 25/09/20”.

3.3.4 Vistoria 4: Integração da Nuvem de Pontos Resultante com o modelo BIM

Mais uma vez, no CloudCompare, a nuvem de pontos foi melhorada em relação às suas distorções e desalinhamentos, além da limpeza de pontos sem

relevância, antes de ser enviada ao Revit. A Figura 38 mostra a nuvem original à esquerda, antes do retrabalho e, à direita, após o retrabalho no CloudCompare. Além das melhorias visuais, a redução do número de vértices (pontos) da nuvem também reduz o tamanho do arquivo, melhorando o processamento dos dados.

Figura 38 – Nuvem de pontos da Vistoria 4, antes e depois dos ajustes no CloudCompare



Fonte: Registrado pelo autor.

A Figura 38 mostra a nuvem de pontos da Vistoria 4, sendo a da esquerda a original e a da direita após limpeza e ajustes no CloudCompare.

Os processos de integração foram os mesmos das vistorias anteriores, resultando no modelo integrado.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DA ETAPA 1: CONTEXTUALIZAÇÃO

A partir da pesquisa realizada na bibliografia e em consulta a *webpages* de fornecedores, optou-se pela utilização de dispositivos do tipo *smartphone*, *tablet*, sensores e câmeras digitais, tendo como base a função de serem móveis, ou seja, fáceis de manusear, operar e transportar, com um custo acessível a maioria dos profissionais da área de gestão de construções. A partir destes critérios, e em função da disponibilidade, optou-se pelo uso dos seguintes dispositivos (Tabela 5):

Tabela 5: Análise descritiva dos dispositivos usados na pesquisa

DISPOSITIVO	FABRICANTE /MODELO	DADOS TÉCNICOS	FONTE
GALAXY N8	Samsung Galaxy Note 8	<ul style="list-style-type: none"> Resolução - Câmera Traseira 12.0 MP + 12.0 MP Abertura – Número F da Câmera Traseira F1.7, F2.4 Foco Automático - Câmera Traseira Estabilizador Óptico de Imagem - Câmera Traseira Zoom - Câmera Traseira: Zoom Óptico de 2x, Zoom Digital de até 10x Resolução - Gravação de Vídeos UHD 4K (3840 x 2160) @30fps Localização: GPS, Glonass, Beidou, Galileo Sensores: Acelerômetro, Barômetro, Sensor de Impressão Digital, Giroscópio, Geo Magnético, Sensor de Efeito Hall, Sensor HR, Iris Sensor, Sensor de Luz RGB, Sensor de Pressão, Sensor de Proximidade 	("Especificações técnicas Galaxy Note 8", [s.d.])
GALAXY N10	Samsung Galaxy Note 10 Lite	<ul style="list-style-type: none"> Resolução - Câmeras Traseiras (Múltiplas): 12.0 MP + 12.0 MP + 12.0 MP Abertura - Número F das Câmeras Traseiras (Múltiplas): F1.7, F2.4 , F2.2 Foco Automático - Câmera Traseira Estabilizador Óptico de Imagem - Câmera Traseira Zoom - Câmera Traseira: Zoom Óptico de 2x, Zoom Digital de até 10x Resolução - Gravação de Vídeos UHD 4K 	("Especificações técnicas Galaxy Note 10 Lite", [s.d.])

		<p>(3840 x 2160) @60fps</p> <ul style="list-style-type: none"> Localização: GPS, Glonass, Beidou, Galileo Sensores: Acelerômetro, Sensor de Impressão Digital, Giroscópio, Geo Magnético, Sensor de Efeito Hall, Sensor de Luz RGB, Sensor de Proximidade 	
XIAOMI N6	Xiaomi Redmi Note 6 Pro	<ul style="list-style-type: none"> Câmera primária: 12MP, 1.4µm, abertura f/1.9, Foco automático Dual Pixel, Fotografia aprimorada em pouca luz, HDR, Panorama, Modo de captura sequencial, EIS para gravação de vídeo, Bokeh dinâmico Navegação: GPS, AGPS, GLONASS, BeiDou Sensores: Emissor de IR Giroscópio Bússola eletrônica Acelerômetro Sensor de proximidade Sensor de iluminação Sensor de impressão digital traseiro 	("Especificações técnicas Redmi Note 6", [s.d.])
IPAD 6	Apple iPad (6a. geração) Wi-fi 128 Gb	<ul style="list-style-type: none"> Chip: Chip A10 Fusion com arquitetura de 64 bits Coprocessador M10 integrado Câmera: Câmera de 8 MP, Live Photos, Foco automático, Panorama (até 43 MP), HDR para fotos, Controle de exposição Modo contínuo, Abertura f/2.4, Lente de cinco elementos, Filtro IV híbrido, Retro iluminação, Estabilização automática de imagem Gravação de vídeo HD de 1080p, Estabilização de imagem de vídeo, Zoom de vídeo 3x Localização Wi-Fi: Bússola digital, Wi-Fi Microlocalização iBeacon, Fotos com localização geográfica, Vídeos com localização geográfica Sensores: Touch ID, Giroscópio de três eixos, Acelerômetro, Barômetro, Sensor de luz ambiente 	("Especificações técnicas iPad 6a Geração", [s.d.])
SSO	Structure Sensor by Occipital	<ul style="list-style-type: none"> Resolução: VGA (640 x 480), QVGA (320 x 240) Taxa de quadros: 30/60 frames por segundo Iluminação: projetor de luz infravermelha estruturada, LEDs infravermelhos uniformes Campo de visão: Horizontal 58 graus e Vertical 45 graus Distância mínima/máxima recomendada: 40cm/350cm Precisão: 0,5mm a 40cm (0,15%); 30mm à 	("Especificações técnicas Structure Sensor by Occipital", [s.d.])

		300cm (1%)	
CANON SX510	Canon PowerShot SX510 HS	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo: Câmera digital compacta com flash embutido e zoom óptico 30x, zoom digital 4x e zoom combinado 120x com estabilizador óptico de imagem. • Sensor de imagem: Sensor CMOS 12.1 megapixels de 1/2.3 polegadas. Pixels totais Aprox. 12.8 megapixels Pixels efetivos Aprox. 12.1 megapixels • Lentes: Distância Focal 4.3 (W) - 129.0 (T) mm (equivalente - filme de 35mm: 24 – 720mm), Zoom óptico 30x, Zoom digital 4x, Alcance de Foco Normal: 2.0 pol. (5cm) - infinito (W), 4.6 pés (1.4m) - infinito (T), Auto/Manual: 0 pol (0cm) - infinito (W), 4.6 pés (1.4m) - infinito (T), Macro AF: 0 pol. - 1.6 pés (0-50cm) (W), Sistema de Auto Foco TTL, Manual • Abertura e Obturador: Abertura Máxima f/3.4 (W) - f/5.8 (T), Velocidade do Obturador 1-1/1600 seg., 15-1/1600 seg. (modos Tv e M) • Controle de exposição: Sensibilidade Auto, ISO 80-3200, Método de Medição de Iluminação, Medição de avaliação (Brilho facial é avaliado no auto foco de Detecção de Rosto), Medição média a partir do peso central, Medição de pontos (Quadro de medição fixado ao centro), Sistemas de Controle de Exposição • Sistemas de Controle de Exposição: Exposição Manual, Mudança de Programa, Mudança de Segurança, Travamento de Exposição Automática (EA) • Compensação da exposição: Fotos ± 2 paradas em incrementos de 1/3 de parada, Vídeos ± 2 paradas em incrementos de 1/3 de parada (não disponível na gravação de vídeos) <ul style="list-style-type: none"> • Balanço de branco automático: Automático (Câmera automaticamente escolhe a melhor velocidade ISO de acordo com o modo de disparo), Dia, Nublado, Luz de Tungstênio, Luz Fluorescente, Luz Fluorescente H, Customizado 	("Especificações técnicas Canon sx510 hs", [s.d.])

Fonte: Autor

Com relação aos *softwares* usados, eles foram divididos pela etapa do processo em que atuavam de forma mais efetiva, como é apresentado a seguir:

- Processamento DSM ou SfM: Regard 3D, 3DF Zephyr, Agisoft Photoscan e Metashape, Autodesk Recap Photo e Visual SfM.
- Tratamento de Nuvens de Pontos e Malhas Triangulares: Meshlab e CloudCompare
- Modelagem 3D e Integração BIM: Autodesk Revit e Freecad

O primeiro *software* testado foi o Regard 3D, onde foram consideradas diversas tentativas de configuração diferentes. A tentativa que obteve melhores resultados utilizou o algoritmo *Shading-Aware Multi-View Stereo* (SMVS) para a geração da nuvem de pontos densa. O processo total durou 03 horas e 17 minutos. O resultado final foi uma malha triangular com bastante irregularidades e falhas.

O Regard 3D, de acordo com seu site oficial <https://www.regard3d.org/> (“Regard 3D”, acessado em 22/10/2020), é um *software* de SfM de código aberto e acesso gratuito, que cria modelos 3D de objetos através de imagens do mesmo, tiradas de diferentes pontos de vista .

Em seu site, são indicadas as etapas para o processamento das imagens e modelagem 3D, auxiliando não apenas o entendimento da operação deste *software*, mas também apresentam conceitos importantes para o processo geral de DSM, com qualquer *software*.

Estas etapas estão listadas a seguir:

- 1) **Key points**: para cada imagem, pontos chave são detectados. Estes pontos são algumas características presentes no objeto que tem grande probabilidade de serem encontrados em diferentes imagens do mesmo objeto, por exemplo, cantos, bordas, etc. Neste processo, o Regard 3D utiliza o A-KAZE, um algoritmo de detecção e descrição de recursos 2D multiescala, em espaços de escala não-linear (ALCANTARILLA et al. 2012). Maiores detalhes podem ser pesquisados à publicações de seus criadores disponíveis em <http://www.robSAFE.com/personal/pablo.alcantarilla/publications.html> (“A-KAZE”, acessado em 22/10/2020).
- 2) **Matches**: para cada ponto chave, um descritor matemático é calculado, afim de identificar o mesmo ponto em diferentes imagens obtidas de diferentes pontos de vista de um mesmo objeto. Nesta etapa, o Regard 3D utiliza o LIOP (Padrão de Ordem de Intensidade Local).

Os descritores de imagens diferentes são combinados e filtrados geometricamente, resultando em um conjunto de correspondências entre cada par de imagens, formando trilhas.

As trilhas são então calculadas, e cada característica identificada em um par de imagens, é pesquisada também em outras imagens. Caso algumas condições sejam atendidas, como por exemplo, a trilha ser vista em pelo menos 3 imagens diferentes, a trilha é validada e gerada.

- 3) **Triangulação:** nesta etapa todas as correspondências de todos os pares de imagens são usadas para calcular:
- a. A posição 3D e as características da câmera (ou dispositivo), ou seja, o local onde cada imagem foi captada.
 - b. A posição 3D de cada trilha

O resultado da fase de triangulação é uma nuvem de pontos esparsa.

- 4) **Densificação:** a partir da nuvem de pontos esparsa, e com a utilização de alguns algoritmos disponibilizados pelo Regard 3D, é gerada a nuvem de pontos densa, que aumenta o detalhamento do objeto 3D. Esses algoritmos são: CVMS/PVMS (FURUKAWA *et al.*, 2010), *Multi-View Environment (MVE)* e *Shading-Aware Multi-View Stereo (SMVS)*. A escolha do algoritmo depende das características da imagem e do resultado final esperado, variando drasticamente no tempo de processamento e condicionado a capacidade computacional disponível.
- 5) **Geração de superfície:** a última etapa é a geração de superfície a partir da nuvem de pontos densa, apresentando vértices coloridos ou com a textura original das imagens.

Recomendações na operação:

- a. Quanto maior a quantidade de imagens do mesmo objeto, melhor;
- b. Todas as imagens devem ser tiradas de pontos de vista ligeiramente diferentes;
- c. Quanto maior a resolução da imagem, mais detalhado será o modelo;
- d. Quanto mais pontos de vista diferentes forem usados para captar o objeto, menores serão as quantidades de furos (espaços vazios) no modelo resultante.
- e. O modelo da câmera com suas informações intrínsecas deve estar cadastrado no banco de dados do *software*.

O segundo teste foi com o 3DF Zephyr, seguindo os passos do assistente de novos projetos, no modo avançado. As configurações são mais simples e de melhor operabilidade que o Regard 3D. Além disso o tempo de processamento total foi de 1 hora e 4 minutos, gerando uma malha triangular com melhor acabamento visual, apresentando mais regularidade que a malha gerada pelo Regard 3D.

O 3DF Zephyr também foi um *software* bastante utilizado na pesquisa. De acordo com o site oficial <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-photogrammetry-software/> (“3DF Zephyr Free”, acessado em 22/10/2020) o 3DF Zephyr é um *software* de reconstrução 3D para fotogrametria que funciona automaticamente a partir de fotos e vídeos de diversos tipos de sensores e dispositivos diferentes.

A versão utilizada é a gratuita, onde a licença é liberada para uso máximo de 50 fotos por modelagem, porém existem outras opções de licenças com maiores recursos, porém pagas. As principais diferenças entre elas, além do limite de capacidade de fotos e vídeos, é a disponibilidade de recursos de importação e exportação de texturas, processamento computacional, ferramentas de medição, criação automática e manipulação de linhas e poli linhas em 2D e 3D, entre outros.

Considerando as dificuldades no uso do *software* livre Freecad, e a interoperabilidade entre os arquivos gerados, Remondino (2006) relata que intercâmbio de dados 3D entre diferentes *softwares* tem se mostrado um problema recorrente. Principalmente em função de que cada desenvolvedor tem seu próprio formato (binário), e mesmo permitindo a exportação e abertura do arquivo, não é garantida que sua visualização e funcionalidade.

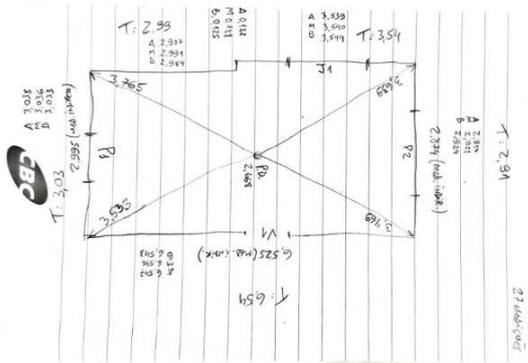
4.2 RESULTADOS DA ETAPA 2: INVESTIGAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO

4.2.1 Estudo comparativo entre sistemas de medição tradicionais e sistemas de varredura 3D

De posse dos quatro modelos 3D BIM gerados a partir dos sistemas de medição e varredura 3D testados (trena laser, estação total, LEIV e FDT), iniciaram as investigações e as comparações entre os mesmos, tendo como base os critérios anteriormente definidos. As figuras Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42 mostram respectivamente os resultados das medições com trena laser, estação total, e as varreduras 3D com sensor LEIV e com por FDT. As malhas triangulares

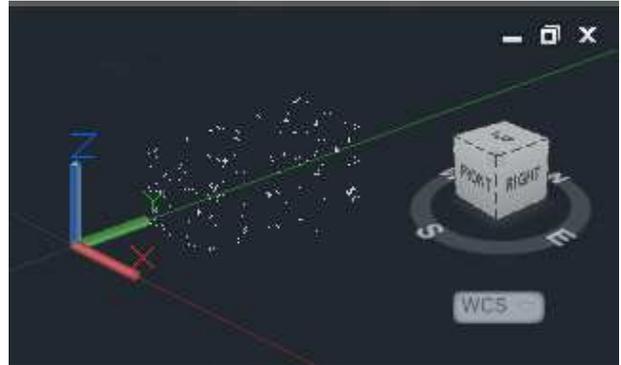
geradas a partir de FDT utilizando o Regard 3D e o 3DF Zephyr, apesar de utilizarem as mesmas fotos como base, apresentaram resultados diferentes.

Figura 39 - Croqui manual contendo as medidas obtidas com a trena laser



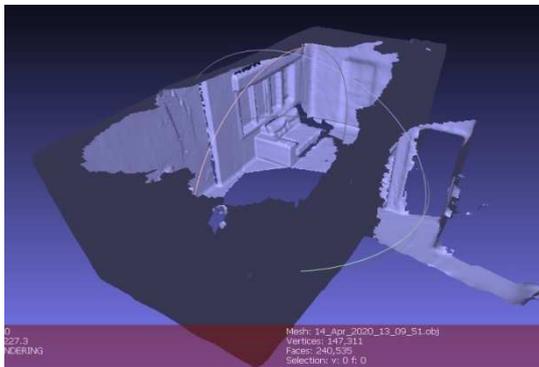
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 - Nuvem de pontos esparsa gerada pela estação total



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 - Malha triangular gerada pelo sensor LEIV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 - Malha triangular gerada por FDT



Fonte: Elaborado pelo autor.

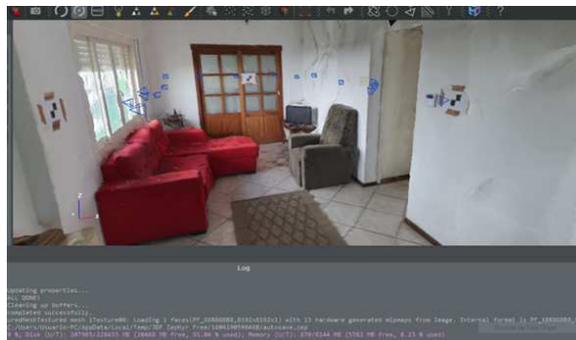
A malha triangular do 3DF Zephyr (Figura 42 e Figura 44) teve um acabamento bastante superior ao do Regard 3D (Figura 43), apresentando uma textura mais realista, com poucas falhas e irregularidades, como é mostrado na Figura 44, onde a imagem foi captada de um ponto de vista interno ao modelo.

Figura 43 - Malha triangular gerada por FDT no Regard 3D



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Malha triangular gerada por FDT no 3DF Zephyr



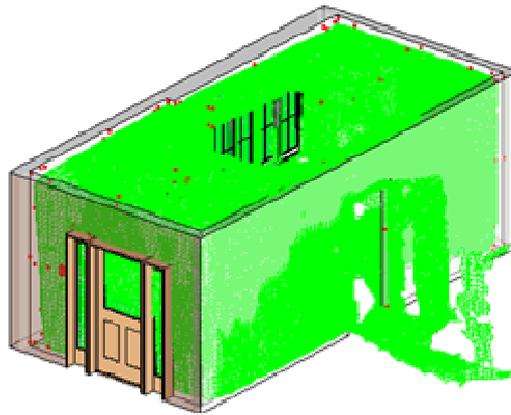
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os itens seguintes apresentam o desempenho dos sistemas de varredura 3D estudados comparados com trena laser e estação total, em termos de precisão, duração, complexidade de operação, logística de transporte e custo de aquisição.

4.2.1.1 Precisão

Inicialmente se fez a sobreposição da malha 3D (LEIV), com os pontos 3D (estação total) e o modelo principal, executado a partir de croqui e medições com trena laser (Figura 45). Verificou-se coerência geométrica e dimensional entre as medições com trena laser e a estação total. Porém, em relação à malha gerada pelo sensor LEIV, houve distorções que afetaram a geometria do ambiente e suas dimensões, ao compará-lo com os demais levantamentos. Posteriormente foi realizado o levantamento fotográfico para geração do modelo FTD, que apresentou melhores resultados comparado ao sensor LEIV.

Figura 45 - Comparativo Modelo 3D x Malha x Pontos 3D



Fonte: Elaborado pelo autor.

Realizou-se a tabulação das medidas obtidas e a comparação dos dados provenientes de “Trena X Estação Total”, “LEIV X Estação Total” e “FDT x Estação Total”, considerando tolerâncias de 0,1cm/m, 0,5cm/m, 1cm/m e 3cm/m. A verificação da precisão foi realizada aplicando-se a soma e a subtração da tolerância na média entre as duas medidas (13), obtendo-se um intervalo admissível entre um valor de medida mínima (14) e máxima (15). Para estar em conformidade com a tolerância considerada, a medida obtida com cada equipamento deverá estar contida no intervalo gerado entre a medida mínima e máxima.

$$Medida_{m\acute{e}dia} = \frac{Medida_{equip\ A} + Medida_{equip\ B}}{2} \quad (13)$$

$$Medida_{m\acute{i}n} = Medida_{m\acute{e}dia} - Toler\acute{a}ncia \quad (14)$$

$$Medida_{m\acute{a}x} = Medida_{m\acute{e}dia} + Toler\acute{a}ncia \quad (15)$$

A comparação entre os levantamentos realizados com trena e estação total foi realizada a fim de verificar se a medição realizada com a estação total seria confiável, em função da pouca experiência de operação do pesquisador (Tabela 6).

Tabela 6: Comparativo Trena Laser x Estação Total para uma tolerância de 0,1 cm/m

DESCRIÇÃO	TRENA LASER	ESTAÇÃO TOTAL	MÉDIA	TOLERÂNCIA 0,1 cm/m			RESULTADOS COMPARATIVOS			
				cm	MÁX.	MÍN.	TRENA LASER		ESTAÇÃO TOTAL	
PAR 1	292,1	292,3	292,2	0,3	292,5	291,9	OK		OK	
PAR 2	654,5	654,9	654,7	0,7	655,4	654,0	OK		OK	
PAR 3	303,7	304,1	303,9	0,3	304,2	303,6	OK		OK	
PAR 4	298,5	298,9	298,7	0,3	299	298,4	OK		OK	
PAR 5	12,5	12,5	12,5	0,0	12,5	12,5	OK		OK	
PAR 6	354,1	353,9	354,0	0,4	354,4	353,6	OK		OK	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando que na tolerância de 0,1cm/m, todas as medidas foram aprovadas, verificou-se a qualidade do levantamento com a estação total e definiu-se que este seria considerado o parâmetro para comparativo dos demais equipamentos e métodos de medição.

Foram realizadas individualmente as comparações dos resultados de levantamentos com LEIV e com FDT, e comparados a levantamentos com a estação total. Na primeira fase, se arbitrou uma tolerância de 0,5 cm/m (Tabela 7 e Tabela 8).

Tabela 7: Comparativo LEIV x Estação Total para uma tolerância de 0,5 cm/m.

DESCRIÇÃO	LEIV	ESTAÇÃO TOTAL	MÉDIA	TOLERÂNCIA 0,5 cm/m			RESULTADOS COMPARATIVOS			
				cm	MÁX	MÍN.	LEIV		ESTAÇÃO TOTAL	
PAR 1	295	292,3	293,7	1,5	295,1	292,2	OK		OK	
PAR 2	655,5	654,9	655,2	3,3	658,5	651,9	OK		OK	
PAR 3	320,8	304,1	312,5	1,6	314,0	310,9	8,35	3%	-8,35	-3%
PAR 4	306,4	298,9	302,7	1,5	304,2	301,1	3,75	1%	-3,75	-1%
PAR 5	13,5	12,5	13,0	0,1	13,1	12,9	0,5	4%	-0,5	-4%
PAR 6	353	353,9	353,5	1,8	355,2	351,7	OK		OK	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8: Comparativo FDT x Estação Total para uma tolerância de 0,5 cm/m

DESCRIÇÃO	FOTOGRA METRIA	ESTAÇÃO TOTAL	MÉDIA	TOLERÂNCIA 0,5 cm/m			RESULTADOS COMPARATIVOS			
				cm	MÁX	MÍN.	FOTOGRA METRIA		ESTAÇÃO TOTAL	
PAR 1	291,6	292,3	292,0	1,5	293,4	290,5	OK		OK	
PAR 2	653,8	654,9	654,4	3,3	657,6	651,1	OK		OK	
PAR 3	302,8	304,1	303,5	1,5	305,0	301,9	OK		OK	
PAR 4	301,1	298,9	300,0	1,5	301,5	298,5	OK		OK	
PAR 5	12,2	12,5	12,4	0,1	12,4	12,3	0,1	-1%	0,1	1%
PAR 6	356,5	353,9	355,2	1,8	357,0	353,4	OK		OK	

Fonte: Elaborado pelo autor.

No levantamento com o LEIV (Tabela 7), as medidas das paredes 3, 4 e 5 não foram aprovadas, obtendo variações de 1% a 4%. No levantamento com FDT (Tabela 8), apenas a parede 5 não foi aprovada, por uma variação de 1%.

Na segunda fase, a tolerância foi aumentada para 1cm/m (Tabela 9 e Tabela 10).

Tabela 9: Comparativo LEIV x Estação Total para uma tolerância de 1 cm por metro

DESCRIÇÃO	LEIV	ESTAÇÃO TOTAL	MÉDIA	TOLERÂNCIA 1 cm/m			RESULTADOS COMPARATIVOS			
				cm	MÁX	MÍN.	LEIV		ESTAÇÃO TOTAL	
PAR 1	295	292,3	293,7	2,9	296,6	290,7	OK		OK	
PAR 2	655,5	654,9	655,2	6,6	661,8	648,6	OK		OK	
PAR 3	320,8	304,1	312,5	3,1	315,6	309,3	8,35	3%	-8,35	-3%
PAR 4	306,4	298,9	302,7	3	305,7	299,6	3,75	1%	-3,75	-1%
PAR 5	13,5	12,5	13,0	0,1	13,1	12,9	0,5	4%	-0,5	-4%
PAR 6	353	353,9	353,5	3,5	357,0	349,9	OK		OK	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10: Comparativo FDT x Estação Total para uma tolerância de 1 cm por metro

DESCRIÇÃO	FOTOGRA METRIA	ESTAÇÃO TOTAL	MÉDIA	TOLERÂNCIA 1 cm/m			RESULTADOS COMPARATIVOS			
				cm	MÁX	MÍN.	FOTOGRA METRIA		ESTAÇÃO TOTAL	
PAR 1	291,6	292,3	292,0	2,9	294,9	289,0	OK		OK	
PAR 2	653,8	654,9	654,4	6,5	660,9	647,8	OK		OK	
PAR 3	302,8	304,1	303,5	3,0	306,5	300,4	OK		OK	
PAR 4	301,1	298,9	300,0	3,0	303,0	297,0	OK		OK	
PAR 5	12,2	12,5	12,4	0,1	12,5	12,2	OK		OK	
PAR 6	356,5	353,9	355,2	3,6	358,8	351,6	OK		OK	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta fase, a LEIV continuou apresentando os mesmos resultados anteriores, porém a FDT obteve aprovação total, caracterizando-se então como o sistema de varredura 3D mais preciso desta experiência, com uma tolerância mínima de 1 cm por metro. Por fim, os comparativos com o LEIV continuaram sendo realizados até a tolerância de 3 cm/m, onde a parede 5 ainda permanecia 0,1 cm acima da medida máxima (Tabela 11).

Tabela 11: Comparativo LEIV x Estação Total para uma tolerância de 3 cm por metro

DESCRIÇÃO	LEIV	ESTAÇÃO TOTAL	MÉDIA	TOLERÂNCIA 3 cm/m		
				cm	MÁX	MÍN.
PAR 5	13,5	12,5	13,0	0,4	13,4	12,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1.2 Duração da operação (tempo)

Para a comparação da dimensão “duração da operação”, o período de tempo utilizando a trena laser considerou a execução do croqui e as medições propriamente ditas. O tempo do levantamento utilizando a estação total considerou desde a instalação do equipamento até a conclusão da coleta dos pontos. O tempo do levantamento utilizando o LEIV foi considerado desde a instalação do equipamento até a conclusão da realização das varreduras e o tempo da FDT considerou a coleta das fotos.

Quanto ao tempo de modelagem, em todos os sistemas foi considerado todo o processamento dos dados, desde a preparação, manipulação, ajustes até a modelagem final.

Conforme observa-se na

Tabela 12, o LEIV foi o método de menor duração (mais rápido), levando aproximadamente 52% do tempo comparado ao uso da trena e croqui, e aproximadamente 35% do tempo comparado ao uso de estação total. A FDT, em função da necessidade de criação de um modelo fotogramétrico, acaba exigindo um número maior de processos, o que torna esse método mais demorado na obtenção do modelo final.

Tabela 12: Informações sobre o tempo de duração dos levantamentos

SISTEMA	LEVANTAMENTO	OBSERVAÇÃO	MODELAGEM	OBSERVAÇÃO	TEMPO TOTAL
TRENA	00:17:04	Realização do croqui manual e das 27 medições	00:50:59	Modelagem volumétrica inicial no Autocad (em função dos alinhamentos não perfeitos), e posterior modelagem semântica no Revit	01:08:03
ESTAÇÃO	01:14:22	Montagem do equipamento e a captura dos 205 pontos	00:27:21	Não considerado tempo de descarga dos pontos da estação no computador devido a problemas técnicos de compatibilização de software, que descaracterizariam o processo. O tempo considerou a partir do arquivo TXT gerado e convertido em script para ser aberto no Autocad, e posteriormente ser modelado no Revit.	01:41:43
LEIV	00:03:24	Montagem do equipamento e varredura do ambiente	00:31:59	Considerado o tempo de descarga do arquivo no computador, abertura e ajustes no Meshlab, exportação em DXF para abertura e modelagem no Revit.	00:35:23
FOTOGRA METRIA	00:06:47	Coleta de 23 fotos com "smartphone"	01:22:30	Considerado o tempo de descarga das fotos no computador, abertura e processamento no 3D Zephyr, exportação em PLY, ajustes no Cloud Compare, exportação em DXF para abertura e modelagem no Revit.	01:29:17

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1.3 Complexidade da operação

O comparativo dos sistemas em termos de complexidade da operação, com base na percepção dos pesquisadores, indicou que, em função da instalação e operação do equipamento, a estação total é o método mais complexo, visto que além desses, o processo de descarga dos pontos no computador depende de conhecimento de *software* e *hardware*.

A FDT mostrou ser o sistema mais simples de coleta de dados, porém o processamento dos dados acaba gerando certo grau de complexidade em função do aprendizado necessário para utilização dos *softwares*. Porém após a aprendizagem o processo pode ser entendido como simples.

O LEIV se mostrou bastante intuitivo, apresentando certo grau de complexidade apenas no processamento da malha em virtude de a mesma não ser disponibilizada gratuitamente com a textura real da imagem (o aplicativo oferece um serviço pago para fornecimento de malha texturizada) como no caso da FDT. A

realização dos levantamentos com o uso de croqui e trena é o método menos complexo de todos.

4.2.1.4 Logística para a realização dos levantamentos

A estação total necessita maiores cuidados no transporte e manuseio. O LEIV acoplado ao dispositivo móvel *tablet* pode ser transportado em uma mochila pequena, desde que se evite choques e contato com água. O sistema de croqui e trena é o mais simples, pois pode ser transportado em uma mochila. A FDT depende apenas de um *smartphone* que pode ser transportado no bolso, logo é o mais ágil de todos.

4.2.1.5 Custo de aquisição dos equipamentos

Quanto à aquisição dos equipamentos, em pesquisa realizada no dia 03 de novembro de 2020 na *web*, foram levantados os custos de aquisição dos mesmos, sem considerar frete (Tabela 13).

Observação: há de se considerar que a maioria deles é diretamente influenciada pelas variações cambiais.

Tabela 13: Custos de aquisição dos equipamentos necessários aos sistemas de medição e varredura 3D (em maio/2020)

SISTEMA	TRENA LASER	ESTAÇÃO TOTAL	LEIV	FOTOGRAMETRIA
EQUIPAMENTO	MEDIDOR DE DISTÂNCIA TIPO TRENA LASER BOSCH GLM 250 VF	ESTAÇÃO TOTAL KOLIDA KTS 442 R6LC COMPLETA COM ACESSÓRIOS	KIT SCANNER 3D + IPAD 7 10,2 32GB	"SMARTPHONE" XIAOMI REDMI NOTE 8 64GB QUADCAMERA (48MP + 8MP + 2MP + 2MP)
FONTE	www.ferramentaskennedy.com.br/40731/trena-digital-a-laser-de-005-a-250-metros-glm-250-vf-bosch	https://loja.allcomp.com.br/estacao-total-kolida-kts-442-r6lc-p-topografia	https://www.sensorcanvas.com.br/product-page/kit-scanner-ipad-6-32gb	https://www.extra.com.br/TelefonesCelulares/Smartphones/Android/smartphone-xiaomi-redmi-note-8-4gb-64gb-dual-space-black-preto-1501012424
VALOR DE AQUISIÇÃO	R\$ 2.356,39	R\$ 16.200,00	R\$ 7.999,00	R\$ 1.389,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta análise, não estão considerados os custos de treinamento de mão de obra, visto que todos os equipamentos necessitam de pessoal capacitado, principalmente na fase de modelagem 3D BIM. Os custos de *softwares* e computadores também não estão sendo considerados, tendo em vista que as configurações são semelhantes para todos. Porém, dependendo da qualidade e

poder computacional do *hardware* instalado, podem-se ter grandes ganhos em termos de tempo de processamento.

4.2.1.6 Comparação entre os sistemas de medição e varredura 3D

A Tabela 14 mostra as dimensões estudadas e a classificação dos sistemas, considerando a cor verde para um melhor desempenho, seguindo pela cor amarela (desempenho regular) e a cor vermelha para um desempenho ruim. Para facilitar a avaliação, foram dados valores para cada cor.

Legenda:

	Ótimo	5 pontos
	Regular	3 pontos
	Ruim	1 pontos

Tabela 14: Classificação dos sistemas de acordo com o desempenho em cada uma das dimensões analisadas

DIMENSÃO	SISTEMAS MEDIÇÃO		SISTEMAS VARREDURA 3D	
	TRENA LASER	ESTAÇÃO TOTAL	LEIV	FOTOGRAF. TERRESTRE
Precisão				
Duração,				
Complexidade				
Logística				
Custo				
RESULTADO	19 pontos	9 pontos	15 pontos	19 pontos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da Tabela 14 indicam que dentre as opções de varredura 3D testadas para acompanhamento de avanço de obras, a FDT se mostrou como a melhor opção, alcançando 19 pontos, contra 15 pontos do LEIV. É uma metodologia que apresenta adequada precisão geométrica, possui um método de coleta de informações *in loco* extremamente simples, que acaba compensando o maior tempo e complexidade durante o processamento dos dados, além disso, o equipamento é transportado no bolso do operador e envolve um baixo custo de investimento.

4.2.2 Estudo de nuvens de pontos geradas em vistorias de acompanhamento de obra

Com relação a terceira vistoria, as tentativas de processamento SfM do *software* 3DF Zephyr, usando fotos com lente angular acoplada não obtiveram sucesso. Supõe-se que a moldura circular escura ao redor da imagem principal possa ter causado uma situação que não pode ser reconhecida pelo *software*. Portanto, não foi possível dar continuidade ao processo com estas fotos. Foi feita então a seleção das fotos com lente normal. A curta distância do alinhamento das fachadas acabou deixando as fotos com grande distorção nas partes mais altas da edificação e trazendo pouca informação do cenário. Uma ideia que se tinha de se manter esta curta distância, seria uma tentativa de que as fotos ficassem mais ortogonais à fachada, evitando movimentos laterais com a câmera que aumentariam a distorção causada pela perspectiva lateral. Porém as únicas que puderam ser consideradas ortogonais foram as tiradas em nível com a altura da câmera.

As informações iniciais das amostras estão apresentadas na Tabela 15.

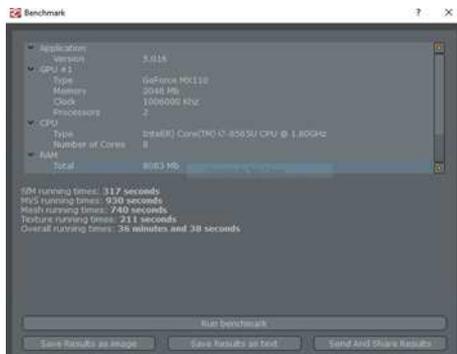
Tabela 15: Amostras do experimento

EVENTO	AMOSTRAS	QUANT. DE FOTOS	RESOLUÇÃO	DISPOSITIVO	HARDWARE	SOFTWARE
VISTORIA 01	VISTORIA-01	420	3024x4032	Galaxy N10	Notebook	Visual SfM
VISTORIA 02	VISTORIA-02_A	50	3024x4032	Galaxy N10	Desktop	3DF Zephyr
	VISTORIA-02_B	143	3024x4033	Galaxy N10	Desktop	Visual SfM
VISTORIA 03	VISTORIA-03_A	128	3000x4000	Xiaomi N6	Desktop	Visual SfM
	VISTORIA-03_B	63	3024x4033	Galaxy N10	Desktop	Visual SfM
	VISTORIA-03_C	41	2448x2448	IPAD 6	Desktop	Visual SfM
VISTORIA 04	VISTORIA-04	644	VARIÁVEL	Canon SX510	Desktop	Visual SfM

Fonte: Autor

Inicialmente, foi feita a cronometragem do tempo de processamento SfM para os grupos de imagens. Como houve amostras processadas em diferentes *hardwares*, houve a necessidade de avaliação de cada um dos equipamentos usados, principalmente de dois que participaram do processamento de dados das amostras analisadas. Foi realizada avaliação da capacidade de processamento através de ferramenta de avaliação do 3DF Zephyr, onde os resultados são mostrados nos relatórios da Figura 46 e Figura 47.

Figura 46: Relatório do Notebook com tempo total de 36 minutos e 38 segundos



Fonte: Autor

Figura 47: Relatório do Desktop com tempo total de 20 minutos e 22 segundos



Fonte: Autor

A avaliação consiste no processamento de um conjunto de imagens padrão do *software*, onde é avaliado o desempenho do *hardware* durante o processo e o resultado é o tempo de processamento em cada etapa e no total. Através desta análise, foi determinado, um fator de comparação entre *hardwares*, para ser aplicado no tempo cronometrado. O tempo de processamento por foto, foi retificado com o fator de comparação (Tabela 16) na Vistoria-01, que foi a única que participou da pesquisa, utilizando o Notebook. Todas as demais utilizaram o Desktop para processamento SfM.

Tabela 16: Determinação do fator de comparação entre *hardwares*

HARDWARE	RESULTADO DA AVALIAÇÃO	FATOR DE COMPARAÇÃO
Notebook	00:36:38	0,555960
Desktop	00:20:22	1

Fonte: Autor

A Tabela 17 mostra a determinação do tempo de processamento por foto, já retificado com o fator de comparação na Vistoria-01.

Tabela 17: Determinação do Tempo de Processamento por foto, usando o fator de comparação de *hardware* para fazer a compensação na Vistoria-01

AMOSTRA	HARDWARE	SOFTWARE	QUANT. DE FOTOS (un)	TEMPO DE PROCESSAMENTO (h:m:s)	FATOR DE COMPARAÇÃO DE HARDWARE	TEMPO DE PROCESSAMENTO POR FOTO (s)
VISTORIA-01	Notebook	Visual SfM	420	02:51:09	0,555960	14
VISTORIA-02_A	Desktop	3DF Zephyr	50	00:40:00	1	48
VISTORIA-02_B	Desktop	Visual SfM	143	01:08:28	1	29
VISTORIA-03_A	Desktop	Visual SfM	128	00:33:47	1	16
VISTORIA-03_B	Desktop	Visual SfM	63	00:07:39	1	07
VISTORIA-03_C	Desktop	Visual SfM	41	00:03:47	1	06
VISTORIA-04	Desktop	Visual SfM	644	03:27:27	1	19

Fonte: Autor

A determinação da Resolução e Resolução Media (Vistoria 4), além do cálculo do Índice de Nitidez do Grupo de imagens (ING) podem ser verificadas na Tabela 18. A Figura 48: Parte do relatório da ferramenta de avaliação do Índice de Qualidade de Imagem, relativo a Vistoria-04, relativa a Vistoria-04, apresenta o relatório do 3DF Zephyr, onde são apresentados os IQIs (coluna "Score") e a Resolução (coluna "Resolution") para cada imagem do grupo.

Tabela 18: Apresentação dos resultados das variáveis Resolução e ING das imagens colhidas nas vistorias

AMOSTRA	QUANT. DE FOTOS (un)	RESOLUÇÃO (MP)	Média IQI 10% melhores	IQI MÁX	ING (%)
VISTORIA-01	420	12,2	3,6362085	4,626907	78,59%
VISTORIA-02_A	50	12,2	3,0939528	3,230493	95,77%
VISTORIA-02_B	143	12,2	2,842435	3,230493	87,99%
VISTORIA-03_A	128	12	2,542479	3,40503	74,67%
VISTORIA-03_B	63	12,2	3,9946358	4,457861	89,61%
VISTORIA-03_C	41	6	4,1156916	4,765189	86,37%
VISTORIA-04	644	11,23*	1,875172	3,933677	47,67%

* Utilizada Resolução Média apenas na Vistoria-04

Fonte: Autor

Figura 48: Parte do relatório da ferramenta de avaliação do Índice de Qualidade de Imagem, relativo a Vistoria-04

	Image	Score	Resolution	Sensor size
1	IMG_6606	3.933677	8.99MP	6.197600mm
2	IMG_6600	3.817240	8.99MP	6.197600mm
3	IMG_7077b	3.458521	4.16MP	N/A
4	IMG_6583	2.869457	8.99MP	6.197600mm
5	IMG_7129	2.851065	12.00MP	6.197600mm
6	IMG_6704	2.845140	12.00MP	6.197600mm
7	IMG_6709	2.726984	12.00MP	6.197600mm
8	IMG_6699	2.632390	12.00MP	6.197600mm

Fonte: Autor

A determinação do Índice de Aproveitamento da Nuvem de pontos foi calculada, e os resultados estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Determinação do Índice de Aproveitamento da Nuvem de Pontos

AMOSTRA	QUANT. DE FOTOS (un)	RESOLUÇÃO (MP)	Pontos Gerados (un)	Pontos Pós Processamento (un)	Índice de Aproveitamento da NP (%)
VISTORIA-01	420	12,2	487.575	482.685	99,0%
VISTORIA-02_A	50	12,2	620.582	620.582	100,0%
VISTORIA-02_B	143	12,2	931.545	597.495	64,1%
VISTORIA-03_A	128	12	1.148.854	605.315	52,7%
VISTORIA-03_B	63	12,2	175.690	145.418	82,8%
VISTORIA-03_C	41	6	66.609	53.365	80,1%
VISTORIA-04	644	11,23	8.259.692	6.380.122	77,2%

Fonte: Autor

A determinação da variável IRC pode ser verificada na Tabela 20.

Tabela 20: Determinação do Índice de Registro do Cenário

AMOSTRA	QUANT. DE FOTOS (un)	RESOLUÇÃO (MP)	Pontos Gerados (un)	Quant. Pixels Captados (MP)	Índice de Registro do Cenário (un/MP)
VISTORIA-01	420	12,2	487.575	5.124	95
VISTORIA-02_A	50	12,2	620.582	610	1.017
VISTORIA-02_B	143	12,2	931.545	1.745	534
VISTORIA-03_A	128	12	1.148.854	1.536	748
VISTORIA-03_B	63	12,2	175.690	769	229
VISTORIA-03_C	41	6	66.609	246	271
VISTORIA-04	644	11,23	8.259.692	7.232	1.142

Fonte: Autor

Os resultados da comparação entre medidas de elementos isolados, de projeto e de varredura, estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Comparativo de medidas de elementos isolados projeto x varredura e determinação dos Erros Médios (Relativos e Quadráticos)

AMOSTRA	ELEMENTO 01				ELEMENTO 02				ELEMENTO 03				ELEMENTO 04				ELEMENTO 05			
	Medprojeto	Medvarredura	EA	ER	Medprojeto	Medvarredura	EA	ER	Medprojeto	Medvarredura	EA	ER	Medprojeto	Medvarredura	EA	ER	Medprojeto	Medvarredura	EA	ER
VISTORIA-01	600	700	100	0,17	500	464	36	0,07	500	566	66	0,13	500	415	85	0,17	4320	4572	252	0,06
VISTORIA-02_A	585	510	75	0,13	500	473	27	0,05	700	700	0	0,00	500	469	31	0,06	4568	4453	115	0,03
VISTORIA-02_B	513	527	14	0,03	1046	1024	22	0,02	540	527	13	0,02	828	780	48	0,06	1255	1295	40	0,03
VISTORIA-03_A	387	391	4	0,01	542	529	13	0,02	1788	1735	53	0,03	534	519	15	0,03	319	329	10	0,03
VISTORIA-03_B	590	602	12	0,02	540	542	2	0,00	317	294	23	0,07	322	379	57	0,18	513	528	15	0,03
VISTORIA-03_C	50	64	14	0,28	540	541	1	0,00	537	536	1	0,00	300	280	20	0,07	536	527	9	0,02
VISTORIA-04	60	50	10	0,17	990	1009	19	0,02	457	469	12	0,03	2145	2143	2	0,00	317	337	20	0,06

AMOSTRA	ELEMENTO 06				ELEMENTO 07				ELEMENTO 08				ERROS MÉDIOS	
	Medprojeto	Medvarredura	EA	ER	Medprojeto	Medvarredura	EA	ER	Medprojeto	Medvarredura	EA	ER	EMR (cm)	EMQ (cm)
VISTORIA-01	5400	5683	283	0,05	500	518	18	0,04	500	494	6	0,01	0,09	20854
VISTORIA-02_A	500	450	50	0,10	675	603	72	0,11	12550	12392	158	0,01	0,06	6649
VISTORIA-02_B	1040	1020	20	0,02	1846	1766	80	0,04	389	410	21	0,05	0,03	1499
VISTORIA-03_A	60	52	8	0,13	976	973	3	0,00	70	73	3	0,04	0,04	425
VISTORIA-03_B	129	133	4	0,03	590	577	13	0,02	298	294	4	0,01	0,05	544
VISTORIA-03_C	367	374	7	0,02	366	370	4	0,01	32	49	17	0,53	0,12	129
VISTORIA-04	1190	1187	3	0,00	990	1024	34	0,03	2411	2393	18	0,01	0,04	312

Fonte: Autor

Os resultados das distâncias médias entre nuvens de pontos, bem como seus desvios padrão são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Apresentação das Distâncias entre NPs e Desvio Padrão

AMOSTRA	Distância Média NPs (cm)	Desvio Padrão (cm)
VISTORIA-01	40,99	53,88
VISTORIA-02_A	10,62	17,61
VISTORIA-02_B	16,42	24,00
VISTORIA-03_A	13,31	22,72
VISTORIA-03_B	10,82	10,59
VISTORIA-03_C	7,10	5,60
VISTORIA-04	10,58	12,95

Fonte: Autor

Após o levantamento de todos os dados das amostras (Tabela 23), foi feita a análise estatística dos mesmos.

Tabela 23: Amostras e variáveis a serem analisadas

AMOSTRA	QUANT. DE FOTOS (un)	RESOLUÇÃO (MP)	ING (%)	IANP (%)	IFC (un/MP)	Dist. Média NPs (cm)	Desvio Padrão (cm)	EMR (cm)	EMQ (cm)	TEMPO PROCES. P/ FOTO (s)
VISTORIA-01	420	12,20	78,59%	99,0%	95	40,99	53,88	0,09	20854	0,00016
VISTORIA-02_A	50	12,20	95,77%	100,0%	1.017	10,62	17,61	0,06	6649	0,00056
VISTORIA-02_B	143	12,20	87,99%	64,1%	534	16,42	24,00	0,03	1499	0,00033
VISTORIA-03_A	128	12,00	74,67%	52,7%	748	13,31	22,72	0,04	425	0,00018
VISTORIA-03_B	63	12,20	89,61%	82,8%	229	10,82	10,59	0,05	544	0,00008
VISTORIA-03_C	41	6,00	86,37%	80,1%	271	7,10	5,60	0,12	129	0,00006
VISTORIA-04	644	11,23	47,67%	77,2%	1.142	10,58	12,95	0,04	312	0,00022

Fonte: Autor

O primeiro passo foi a verificação da existência de *outliers* (Tabela 24).

Tabela 24: Determinação de *outliers*

AMOSTRA	QUANT. DE FOTOS (un)	RESOLUÇÃO (MP)	ING (%)	IANP (%)	IRC (un/MP)	Dist. Média NPs (cm)	Desvio Padrão (cm)	EMR (cm)	EMQ (cm)	TEMPO PROCES. P/ FOTO (s)
VISTORIA-01	420	12,2	78,59%	99,0%	95	40,99	53,88	0,09	20,854	0,00016
VISTORIA-02_A	50	12,2	95,77%	100,0%	1.017	10,62	17,61	0,06	6,649	0,00056
VISTORIA-02_B	143	12,2	87,99%	64,1%	534	16,42	24,00	0,03	1,499	0,00033
VISTORIA-03_A	128	12	74,67%	52,7%	748	13,31	22,72	0,04	425	0,00018
VISTORIA-03_B	63	12,2	89,61%	82,8%	229	10,82	10,59	0,05	544	0,00008
VISTORIA-03_C	41	6	86,37%	80,1%	271	7,10	5,60	0,12	129	0,00006
VISTORIA-04	644	11,23	47,67%	77,2%	1.142	10,58	12,95	0,04	312	0,00022

ANÁLISE DA PRESENÇA DE "OUTLIERS"

MÉDIA	212,71	11,15	0,80	0,79	577	15,69	21,05	0,06	4,345	0,00023
DESV-PAD	213,60	2,13	0,15	0,16	376	10,66	14,71	0,03	7,069	0,00016
Quartil 1	50	11,23	0,75	0,64	229	10,58	10,59	0,04	312	0,00008
Quartil 3	420	12,2	0,90	0,99	1.017	16,42	24,00	0,09	6,649	0,00033
IQR	370	0,97	0,15	0,35	789	5,84	13,41	0,05	6,336	0,00025
LIMITE-superior	767,71	12,60	103%	132%	1.760	24,44	41,16	0,13	13,849	0,00060
LIMITE-inferior	342,29	9,69	58%	27%	607	6,94	0,94	0,01	5,160	0,00014

Fonte: Autor

A Vistoria-01 apresentou três variáveis com valores superiores ao limite superior calculado. As Vistorias 03_C e 04 apresentaram uma variável cada, abaixo do limite inferior calculado. Optou-se pela não remoção dos mesmos, deixando, conforme recomendado por Larson; Farber (2015), apenas para avaliação do leitor.

Foi então realizado o teste de Shapiro-Wilk para verificação da normalidade da distribuição dos dados, conforme Tabela 25.

Tabela 25: Teste de Shapiro-Wilk – 1ª Rodada

Tests for normal distribution								
	ING (%)	IANP (%)	IRC (un/MP)	Dist. Média NPs (cm)	Desvio Padrão (cm)	EMR (cm)	EMQ (cm)	TEMPO PROCES. P/ F
N	7	7	7	7	7	7	7	7
Shapiro-Wilk W	0,8478	0,9421	0,8941	0,6804	0,8331	0,8724	0,8669	0,8813
p(normal)	0,1172	0,6573	0,2967	0,002256	0,08568	0,1949	0,1745	0,2321

Fone: Autor

Na primeira rodada de testes, a variável Dist. Média entre NPs não apresentou distribuição normal. Considerando que há um "outlier" nesta variável, decidiu-se então retirar a amostra Vistoria-01 da análise, para que se desse continuidade aos testes.

Na segunda rodada (Tabela 26), a variável EMR não apresentou distribuição normal. Foi feita novamente a verificação de novos "outliers", e verificou-se que a Vistoria-03_C apresentava dois valores fora dos limites calculados (Tabela 27). Portanto, esta amostra também foi retirada da análise.

Tabela 26: Teste de Shapiro-Wilk – 2ª Rodada

Tests for normal distribution								
	ING (%)	IANP (%)	IRC (un/MP)	Dist. Média NPs (cm)	Desvio Padrão (cm)	EMR (cm)	EMQ (cm)	TEMPO PROCES. P/ F
N	6	6	6	6	6	6	6	6
Shapiro-Wilk W	0,8264	0,9757	0,9123	0,9387	0,9511	0,7768	0,9111	0,9055
p(normal)	0,1002	0,9285	0,4517	0,6484	0,7492	0,03595	0,444	0,4073

Fonte: Autor

Tabela 27: Segunda verificação de *outliers*

AMOSTRA	QUANT. DE FOTOS (un)	RESOLUÇÃO (MP)	ING (%)	IANP (%)	IRC (un/MP)	Dist. Média NPs (cm)	Desvio Padrão (cm)	EMR (cm)	EMQ (cm)	TEMPO PROCES. P/ FOTO (s)
VISTORIA-02_A	50	12,2	0,96	1,00	1.017	10,62	17,61	0,06	6.649	0,00056
VISTORIA-02_B	143	12,2	0,88	0,64	534	16,42	24,00	0,03	1.499	0,00033
VISTORIA-03_A	128	12	0,75	0,53	748	13,31	22,72	0,04	425	0,00018
VISTORIA-03_B	63	12,2	0,90	0,83	229	10,82	10,59	0,05	544	0,00008
VISTORIA-03_C	41	6	0,86	0,80	271	7,10	5,60	0,12	129	0,00006
VISTORIA-04	644	11,23	0,48	0,77	1.142	10,58	12,95	0,04	312	0,00022
MÉDIA	178,17	10,97	0,80	0,76	657	11,47	15,58	0,06	1.593	0,00024
DESV-PAD	211,84	2,25	0,16	0,15	347	2,86	6,55	0,03	2.303	0,00017
Quartil 1	47,75	9,9225	0,68	0,61	260	9,71	9,34	0,04	266	0,00008
Quartil 3	268,25	12,2	0,91	0,87	1.049	14,08	23,04	0,07	2.787	0,00039
IQR	220,5	2,2775	0,23	0,26	788	4,37	13,70	0,04	2.520	0,00031
LIMITE-superior	508,92	14,39	115%	115%	1.839	18,03	36,12	0,11	5.373	0,00070
LIMITE-inferior	152,58	7,56	45%	37%	526	4,91	4,97	0,00	2.187	0,00022

Fonte: Autor

Na terceira rodada, todas as variáveis apresentaram distribuição normal (Tabela 28).

Tabela 28: Teste de Shapiro-Wilk – 3ª Rodada

Tests for normal distribution								
	ING (%)	IANP (%)	IRC (un/MP)	Dist. Média NPs (cm)	Desvio Padrão (cm)	EMR (cm)	EMQ (cm)	TEMPO PROCES. P/ F
N	5	5	5	5	5	5	5	5
Shapiro-Wilk W	0,8601	0,9893	0,8897	0,791	0,921	0,9609	0,8818	0,9395
p(normal)	0,2285	0,9773	0,3556	0,06824	0,5362	0,814	0,3176	0,6622

Fonte: Autor

E com a nova configuração, nenhum valor foi considerado *outliers* (Tabela 29), sendo que todos os dados foram considerados na análise estatística, explicada a seguir.

Tabela 29: Terceira verificação de *outliers*

AMOSTRA	QUANT. DE FOTOS (un)	RESOLUÇÃO (MP)	ING (%)	IANP (%)	IRC (un/MP)	Dist. Média NPs (cm)	Desvio Padrão (cm)	EMR (cm)	EMQ (cm)	TEMPO PROCES. P/ FOTO (s)
VISTORIA-02_A	50	12,2	0,96	1,00	1.017	10,62	17,61	0,06	6.649	0,00056
VISTORIA-02_B	143	12,2	0,88	0,64	534	16,42	24,00	0,03	1.499	0,00033
VISTORIA-03_A	128	12	0,75	0,53	748	13,31	22,72	0,04	425	0,00018
VISTORIA-03_B	63	12,2	0,90	0,83	229	10,82	10,59	0,05	544	0,00008
VISTORIA-04	644	11,23	0,48	0,77	1.142	10,58	12,95	0,04	312	0,00022

MÉDIA	205,60	11,97	0,79	0,75	734	12,35	17,57	0,04	1885,83	0,00028
DESV-PAD	222,12	0,38	0,17	0,16	329	2,28	5,25	0,01	2418,38	0,00016
Quartil 1	56,50	11,62	0,61	0,58	381	10,60	11,77	0,04	368,69	0,00013
Quartil 3	393,50	12,20	0,93	0,91	1080	14,86	23,36	0,05	4073,88	0,00044
IQR	337,00	0,58	0,32	0,33	698	4,26	11,59	0,02	3705,19	0,00031
LIMITE-superior	711,10	12,84	1,26	1,25	1782	18,74	34,96	0,07	7.443,61	0,00
LIMITE-inferior	299,90	11,09	0,32	0,26	-314	5,96	0,19	0,02	-3.671,96	0,00

Fonte: Autor

Na etapa de testagem de correlação entre variáveis, de acordo com a tabela padrão (LARSON; FARBER, 2015, Tabela B.1, pg. 564), o coeficiente de correlação r de Pearson, para um grupo de 8 amostras e um nível de significância $\alpha = 0,05$, tem um valor crítico de 0,707. Analisando os resultados da Tabela 30, verifica-se grifadas em amarelo as correlações que atendem ao requisito.

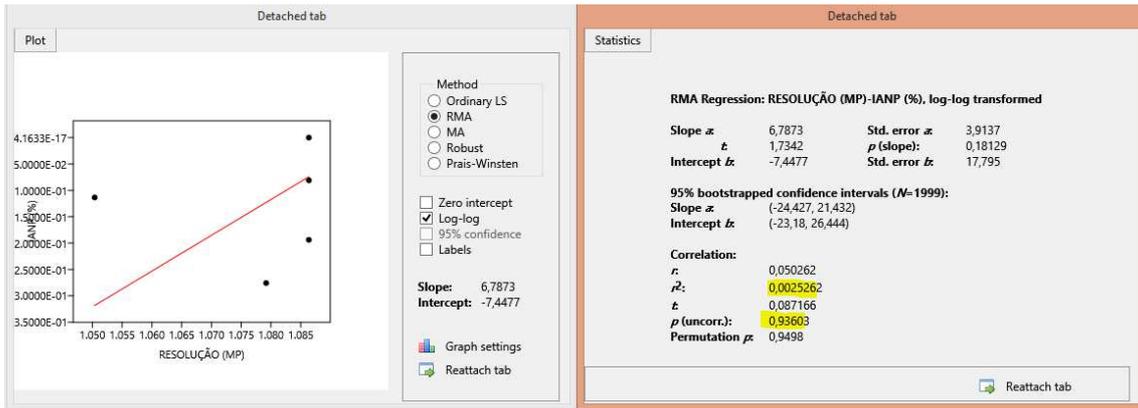
Tabela 30: Teste de correlação r de Pearson

Table		Correlation								
	Plot	RESOLUÇÃO (MP)	ING (%)	IANP (%)	IRC (un/MP)	Dist. Média NPs (cm)	Desvio Padrão (cm)	EMR (cm)	EMQ (cm)	
RESOLUÇÃO (MP)			0,0053257	0,8771	0,54587	0,55654	0,5637	0,69237	0,73705	
ING (%)		0,97293		0,60161	0,81459	0,73178	0,70724	0,50114	0,61551	
IANP (%)		0,096677	0,31836		0,047193	0,20578	0,29852	0,081689	0,6632	
IRC (un/MP)		0,36494	0,14614	-0,88299		0,14299	0,16204	0,28374	0,7918	
Dist. Média NPs (cm)		0,35596	0,21226	-0,68082	0,75155		0,079111	0,11979	0,51378	
Desvio Padrão (cm)		0,34995	0,23203	-0,58657	0,72929	0,83404		0,39318	0,36094	
EMR (cm)		0,24406	0,40299	0,83038	-0,601	-0,77989	-0,49803		0,95441	
EMQ (cm)		-0,20803	-0,30686	-0,26776	0,16426	-0,39217	-0,52752	0,035814		

Fonte: Autor

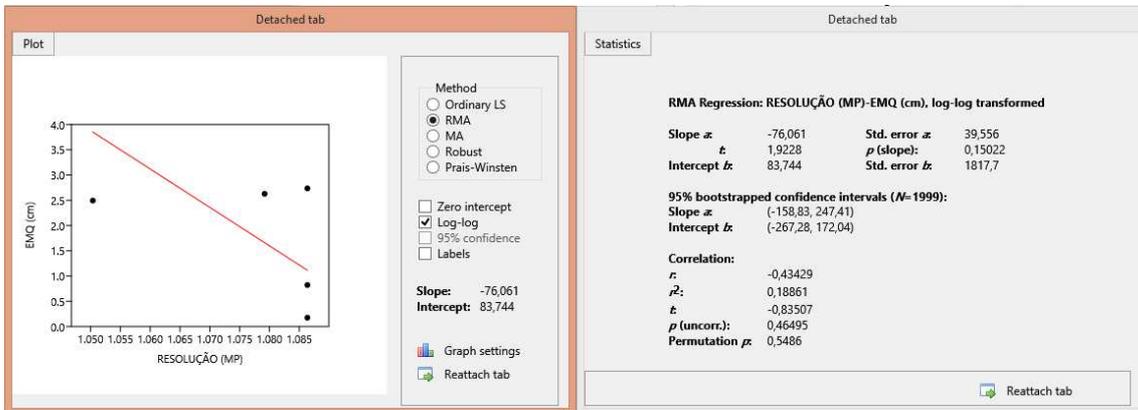
As correlações grifadas em amarelo foram então testadas. Os relatórios gerados são apresentados nas figuras Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52, Figura 53, Figura 54, Figura 55, e os resultados são apresentados na Tabela 31.

Figura 49: Correlação Resolução x IANP



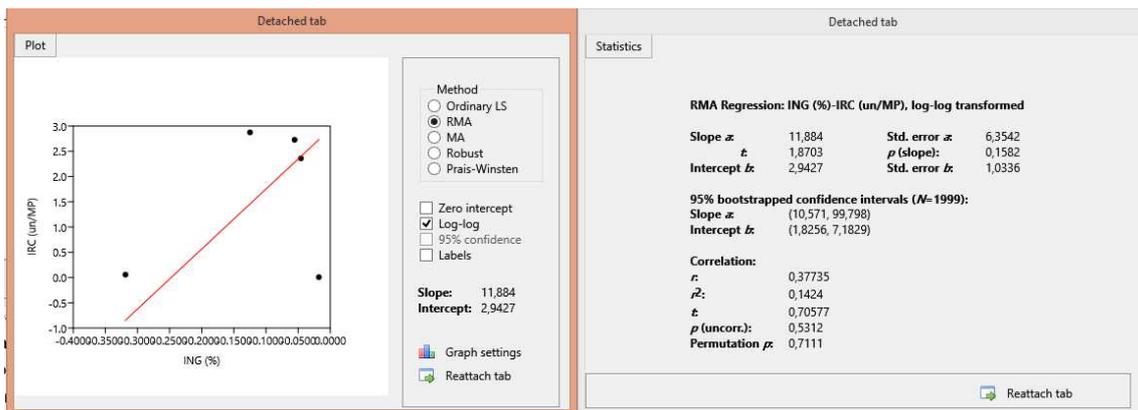
Fonte: Autor

Figura 50: Correlação Resolução x EMQ



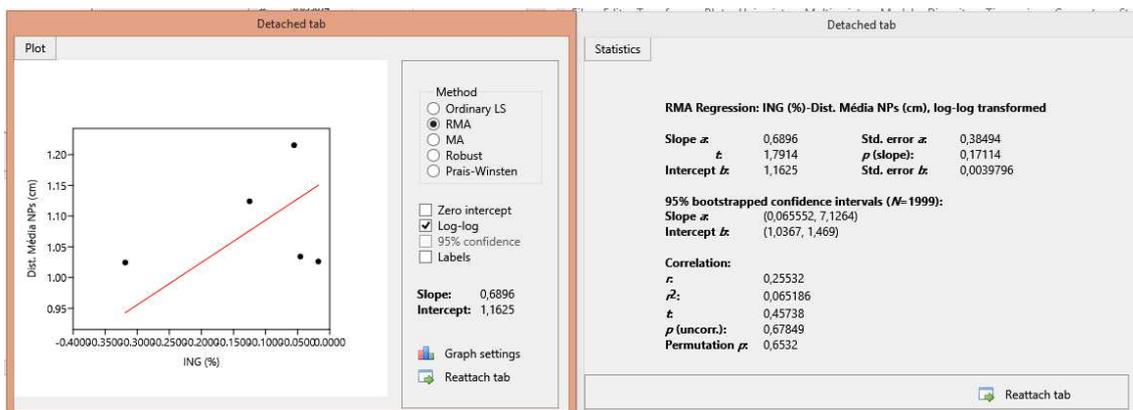
Fonte: Autor

Figura 51: Correlação ING x IRC



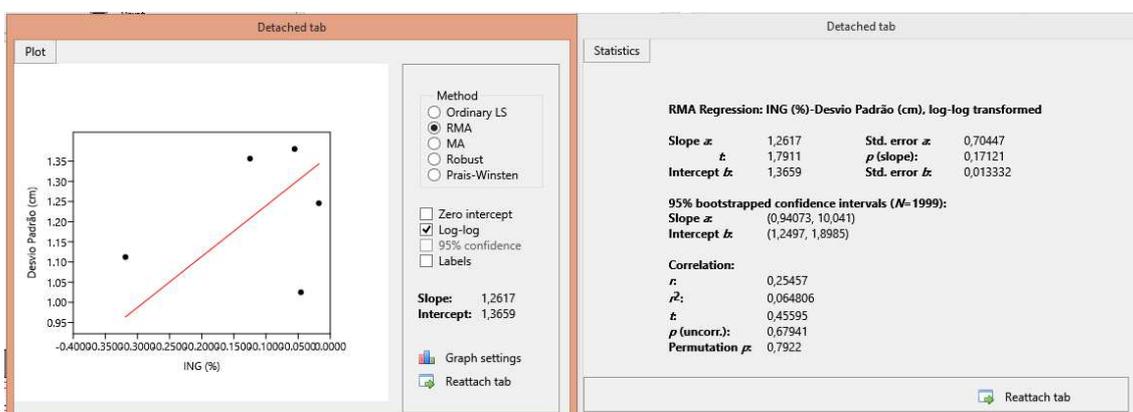
Fonte: Autor

Figura 52: Correlação ING x Distância Média entre Nuvens de Pontos



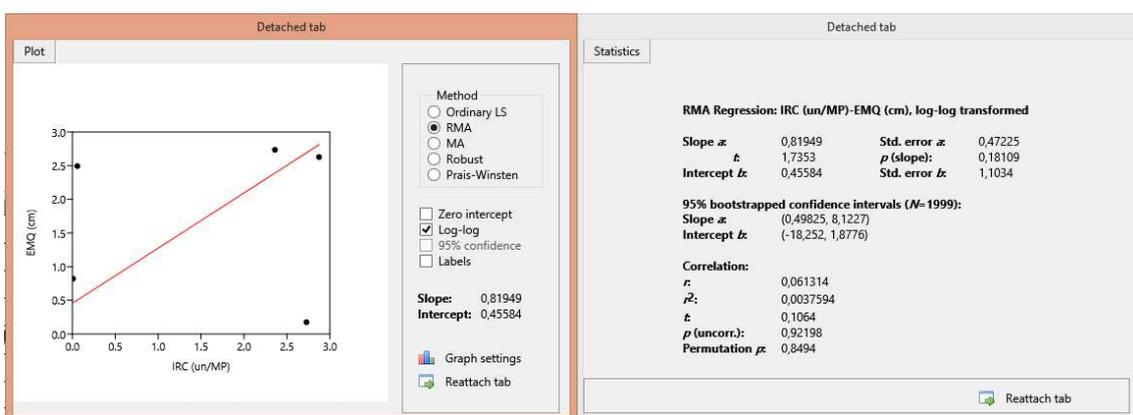
Fonte: Autor

Figura 53: Correlação ING x Desvio Padrão Dist. Média NPs



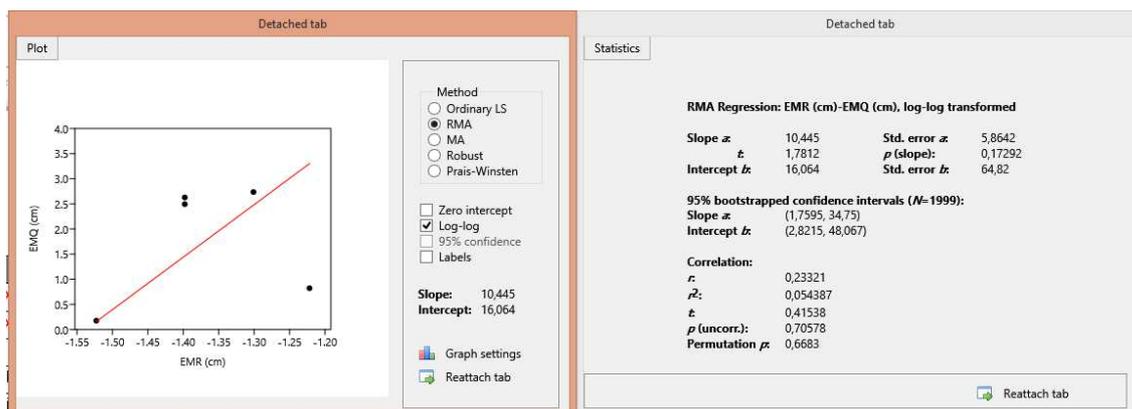
Fonte: Autor

Figura 54: Correlação IRC x EMQ



Fonte: Autor

Figura 55: Correlação EMR x EMQ



Fonte: Autor

Tabela 31: Resultados dos testes de Correlações

CORRELAÇÕES	COEFICIENTE r^2	ρ
Resolução x IANP	0,0025	0,9360
Resolução x EMQ	0,1886	0,4649
ING x IRC	0,1424	0,5312
ING x Dist. Média NPs	0,0652	0,6785
ING x Desvio Padrão Dist. Média NPs	0,0648	0,6794
IRC x EMQ	0,0038	0,9220
EMR x EMQ	0,0544	0,7058

Fonte: Autor

Os resultados apresentados na Tabela 31 indicam que nenhuma das relações tem significância estatística. As que apresentaram maior chance de correlação são a Resolução x EMQ, que indica que existe uma probabilidade de 53,51% de que a variação na Resolução tem 18,86% de chance de influenciar no Erro Médio Quadrático. E na correlação entre ING x IRC, indica que existe uma probabilidade de 46,88% de que a variação no Índice de Nitidez do Grupo de imagens tem 14,24% de chance de influenciar no Índice de Registro do Cenário.

Mesmo com baixa significância estatística, o resultado mostra coerência com a literatura, indicando que a resolução influencia na qualidade da nuvem de pontos. Outro resultado coerente é a relação entre a qualidade de nitidez das imagens e a geração de pontos na nuvem, que depende diretamente do reconhecimento de pixels idênticos em diferentes imagens.

4.3 RESULTADOS DA ETAPA 3: APLICAÇÃO EM ROTINAS DE ACOMPANHAMENTO DE OBRAS

4.3.1 Aplicação: Acompanhamento do avanço de obra de estrutura de concreto

Considerando as informações colhidas e processadas a partir de nuvens de pontos resultantes das vistorias e sobrepostas ao modelo 3D BIM, obtiveram-se os resultados que são apresentados a seguir.

Entende-se que uma das grandes vantagens do modelo BIM é a o apelo visual de informações. Intrínseco aos elementos modelados existe a possibilidade do carregamento do máximo de informação possível ou que tenha alguma relevância, não apenas durante o período de obra, mas por todo o ciclo de vida do empreendimento. A qualidade da informação obtida através do BIM é diretamente ligada à qualidade e detalhamento do modelo. Esta decisão está nas mãos do profissional responsável pela modelagem. Seu empenho em inserir o máximo de informação relevante possível é que garantirá a qualidade dos relatórios fornecidos.

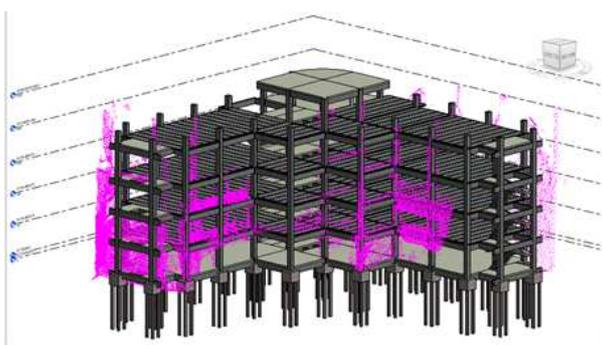
Os modelos gerados a partir dos dados coletados nas quatro vistorias, através dos filtros de fase, têm a possibilidade de gerar um modelo com todas as informações da data em questão. Com isso, foram gerados relatórios de quantitativos de fundações, pilares, vigas, lajes e escadas, para cada período que seria avaliado. (EASTMAN *et al.*, 2014)

Para a modelagem e posterior integração do BIM com a varredura 3D, a ideia inicial era utilizar o *software* Freecad, que tem código livre e seu uso é gratuito. Porém o aprendizado nele foi bastante complicado. Por diversas vezes, ao se carregar o modelo pronto em extensão ifc, o mesmo não se apresentava com todos os elementos modelados, mesmo que estes elementos aparecessem listados entre os componentes do modelo. Foram muitas tentativas sem obter sucesso. Decidiu-se continuar com a experiência, para verificar o comportamento do *software* carregando a nuvem de pontos sobreposta ao modelo (mesmo sem que todos os elementos estivessem visualmente presentes no projeto), a fim de se obter mais informações sobre o funcionamento do programa. Porém, mais uma vez, o Freecad se mostrou problemático, algumas vezes carregando a nuvem de pontos, mas não conseguindo ajustar sua escala frente ao modelo, e outras vezes nem mesmo conseguindo abrir a nuvem de pontos. Todos esses “contratempos” acabaram causando desinteresse na

continuidade de uso do mesmo na pesquisa. Partiu-se então para a realização das experiências utilizando o Autodesk Revit versão estudantil.

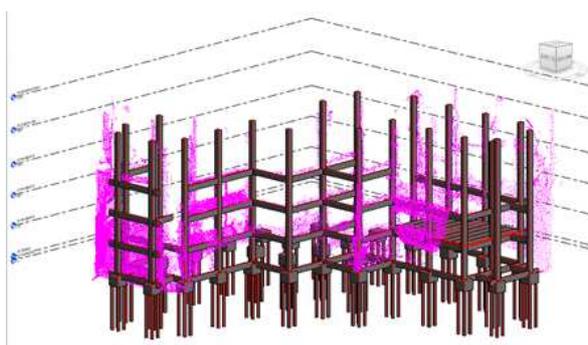
Os resultados visuais da Vistoria 1 pode ser observado a seguir(Figura 56 e Figura 57):

Figura 56 - Filtro de fase = Nenhum,
Fase = EXECUTADO até 21/08/20



Fonte: Elaborado pelo autor.

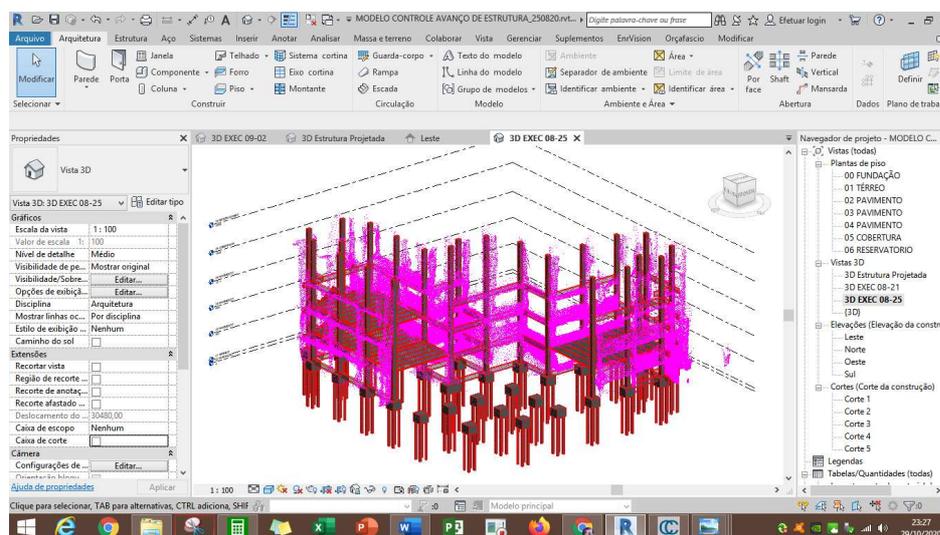
Figura 57 - Filtro de fase = Executado,
Fase = EXECUTADO até 21/08/20



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado visual da Vistoria 2 pode ser observado na Figura 58, após a aplicação do filtro de fases, mostrando o avanço da obra até aquele momento.

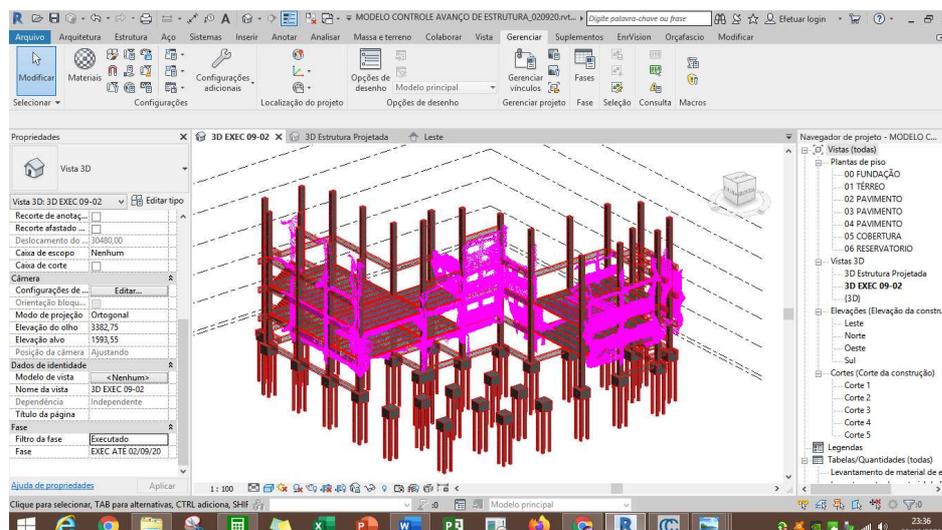
Figura 58 - Filtro de fase = Executado, Fase = EXEC ATÉ 25/08/20



Fonte: Registrado pelo autor.

A Figura 59 mostra o resultado final da integração realizada na Vistoria 3. Lembrando que a nuvem mostra as placas de fachada, que não foram modeladas em BIM e, portanto, não foram consideradas nessa pesquisa.

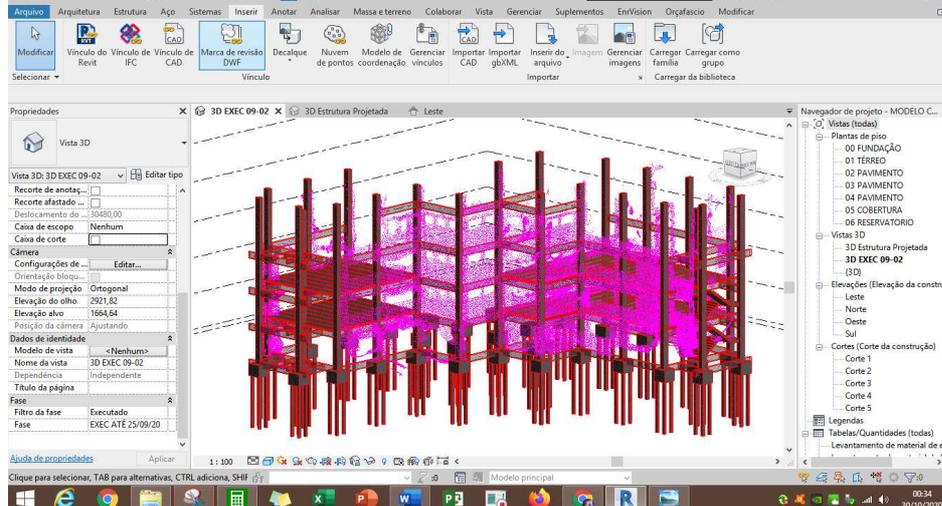
Figura 59 - Modelo resultante do avanço da estrutura até a Vistoria 3.



Fonte: Registrado pelo autor.

Os processos de integração da Vistoria 4 foram os mesmos das vistorias anteriores, resultando no modelo integrado conforme pode ser visto na Figura 60.

Figura 60 - Modelo 3D da estrutura produzida até a Vistoria 4.



Fonte: Registrado pelo autor.

O Autodesk Revit possui recursos para emissão de relatórios de quantitativos de elementos. A Figura 61 mostra um desses relatórios, sem nenhum filtro aplicado. Desta forma, os dados apresentados são os totais do modelo. A figura indicada mostra a listagem de quantitativos de lajes pré-moldadas, cujo total da obra é de 251,55 m³, como mostra a seta. Como não se teve acesso as quantidades oficiais, este valor não pode ser aferido. Portanto a análise foi realizada usando valores

percentuais, e para isso, foi considerado o valor indicado como o equivalente a 100% das lajes projetadas da obra.

Figura 61 - Listagem de quantitativos de lajes sem filtro de fase.

tipo	EXEC ATÉ 25/09/20	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20	1,38 m³
^	EXEC ATÉ 25/09/20	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20	1,38 m³
	EXEC ATÉ 25/09/20	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20	1,38 m³
	EXEC ATÉ 25/09/20	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20	1,38 m³
n...	EXEC ATÉ 25/09/20	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20	1,38 m³
	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20		251,55 m³
^	PROJETADO	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,16 m³
	PROJETADO	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,16 m³
	PROJETADO	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,16 m³
^	EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,32 m³
	EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,32 m³
	EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,20 m³
	PROJETADO	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,16 m³
	PROJETADO	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,16 m³

Fonte: Registrado pelo autor.

A Figura 62 apresenta o mesmo relatório anterior, porém agora com o filtro de fase acionado, mostrando um volume de 90,52 m³ de laje pré-moldada executadas até a Vistoria 4 (ou seja, apenas a fase Executado até 25/09/20), o que corresponde a 35,98%.

Figura 62 - Listagem de quantitativos de lajes com filtro de fase.

EXEC ATÉ 25/09/20	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20	1,38 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20	1,38 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20	1,38 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20	1,38 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20	1,38 m³
	Laje pré-moldada de núcleo vazado: 125x20	90,52 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,32 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,32 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,20 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,35 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,35 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,20 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,32 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,32 m³
EXEC ATÉ 25/09/20	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	0,20 m³
	Viga retangular pré-moldada: EF - 200 RB 500	2,58 m³

Fonte: Registrado pelo autor.

Este processo foi repetido com os demais elementos estruturais presentes no modelo BIM, realizado pela equipe de pesquisa, não contemplando a totalidade de elementos reais da obra, limitado aos elementos de pilares, vigas, lajes e escadas.

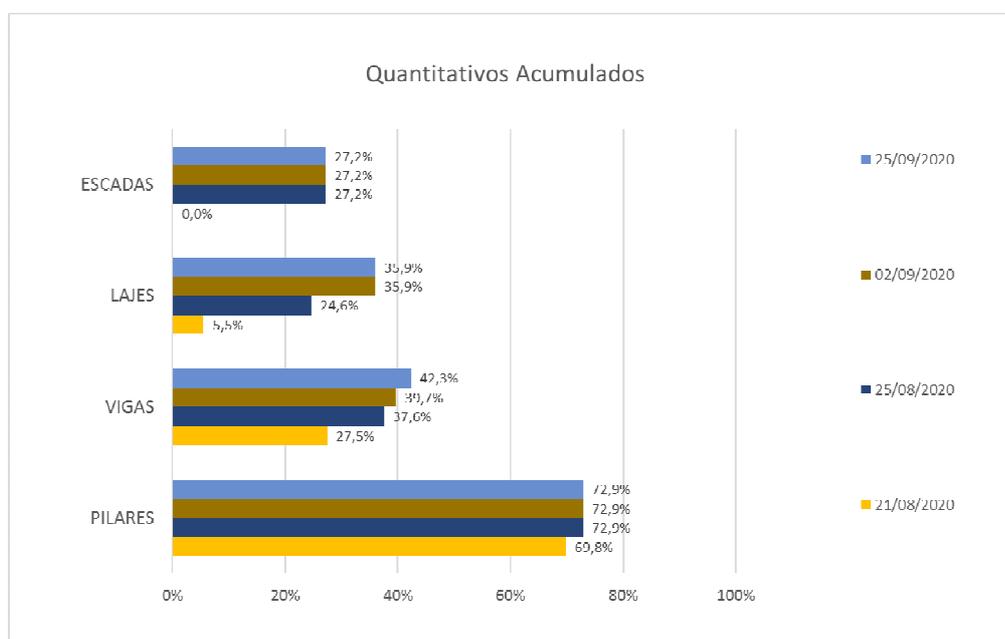
Os dados foram exportados do Revit em formato de arquivo txt, pois facilita que o mesmo possa ser aberto na grande maioria dos *softwares* de processamento de dados, principalmente nos de planilha eletrônica. Porém, cada caso necessita que sejam feitas algumas correções de sintaxe, como por exemplo, o uso de ponto e

vírgula e apóstrofo para delimitar colunas e palavras. Mas isso varia conforme o *software* que seja utilizado.

Neste caso, foi utilizado o Microsoft Excel para tratamento dos dados e geração de gráficos. O Excel não abre diretamente o arquivo txt, mas insere seu conteúdo como dados de texto em uma planilha já aberta, tomando o cuidado para que as sintaxes sejam configuradas corretamente.

Após a organização dos dados em planilhas, foi possível perceber a evolução da montagem da estrutura, e de forma visual, comparando os percentuais avançados em cada vistoria, relativo a diferentes elementos da obra (estacas, blocos de fundações, pilares, vigas, lajes e escadas). O gráfico da Figura 63 apresenta as quatro vistorias em cores distintas: laranja para a Vistoria 1, azul escuro para a Vistoria 2, marrom para a Vistoria 3 e azul claro para a Vistoria 4.

Figura 63 - Gráfico de evolução da estrutura de concreto ao longo das vistorias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se notar que as escadas e os pilares tiveram um avanço entre as Vistorias 1 e 2, e posteriormente não avançaram mais. Já as vigas e lajes foram os elementos estruturais que apresentaram maiores variações de avanço, sendo que as lajes não apresentaram avanço entre as Vistorias 3 e 4.

5 DISCUSSÃO

No estudo comparativo entre sistemas de medição tradicionais e sistemas de varredura 3D, a trena laser e a estação total tiveram resultados muito similares, o que garantiu a confiabilidade em ambos. O LEIV apresentou menor precisão em suas medidas. A FDT apresentou precisão superior, comparada ao LEIV. Quanto ao tempo de operação, o levantamento com LEIV teve grande vantagem sobre os demais, considerando a coleta de dados e a modelagem BIM sobre a malha 3D. A FDT não apresentou bom resultado em função do tempo de processamento computacional, porém a aquisição das fotos no local foi a forma mais rápida de coleta de dados *in loco* dentre todos os sistemas testados. Em relação à complexidade de operação, com exceção da estação total, os demais são simples e acessíveis. A coleta de fotos para a FDT utilizando a câmera do dispositivo móvel se mostrou extremamente simples e ágil. Analisando o custo do investimento, a estação total é o equipamento que exige um maior investimento, o LEIV apresentou um custo intermediário entre a estação total e a trena ou *smartphone*. Já a trena a laser usada na pesquisa é uma das melhores comercializadas nacionalmente e seu custo é alto comparado a outras trenas em função dela possuir mira visual, podendo ser utilizada por apenas um operador e em ambientes externos. O *smartphone*, com capacidade para gerar fotos de qualidade para FDT tem um custo inferior aos demais equipamentos.

Quanto ao sistema de varredura através de luz estruturada infravermelho (LEIV), os resultados indicaram como pontos positivos: a) equipamento de fácil operação; b) malha triangular gerada pode ser verificada em tempo real, enquanto se está realizando o escaneamento. Portanto, caso ocorra algum contratempo ou distorção, o levantamento pode ser abortado e reiniciado sem a necessidade de estar concluído para que se possa verificar apenas o resultado final; c) a malha gerada já está pronta para ser manipulada logo após a conclusão do levantamento, logo após ser baixada da nuvem onde é processada; d) sob contratação extra pelo fabricante através do aplicativo, ele pode liberar a malha triangular com textura, o que facilita muito a identificação dos elementos escaneados; e) investimento é baixo se comparado a um Laser Scanner

Como pontos negativos, o sistema de varredura através de luz estruturada infravermelho (LEIV) apresentou: a) impossibilidade de uso em locais com incidência

direta de luz; b) baixa precisão dimensional, portanto não é recomendado para uso em controle de qualidade dimensional; c) o levantamento deve ser feito em partes pequenas, a fim de evitar distorções da superfície gerada e se obter uma maior confiabilidade de medidas e ângulos, aumentando mais o trabalho manual de tratamento e modelagem.

No segundo experimento, foi realizado estudo de nuvens de pontos geradas a partir de diferentes dispositivos móveis em vistorias de acompanhamento de obras, usando FDT, onde o objetivo era que se pudesse avaliar a qualidade da varredura.

Nesta experimentação foram confirmadas situações previstas no referencial teórico (BHATLA *et al.*, 2012) como o desafio à modelagem de locais com pouca ou com falta de textura, peças muito esbeltas (pilares e vigas por exemplo) e extremidades de seções. Com relação a precisão, revendo o segundo experimento, onde em um ambiente menor, com uma boa iluminação e distâncias menores dos alvos, se obteve uma precisão relativa de 0,01 cm/cm. Se compararmos a média obtida entre os EMR das amostras na aplicação, que foi de 0,06 cm/cm, vemos uma grande diferença entre eles. Esta diferença pode explicada a partir de algumas possíveis razões:

- Algumas distorções e enviesamentos na nuvem de pontos da varredura poderiam ter sido evitadas, conforme indicado por Klein; Li; Becerik-Gerber (2012); e Bhatla *et al.* (2012), com alguns cuidados no levantamento, entre eles, o uso de pontos de escala espalhados pelas fachadas a fim de reduzir o impacto na cena reconstruída causada pelas linhas de visão limitadas.
- As medidas de referência foram retiradas do modelo de projeto, e não medidas reais do local. Portanto, poderia haver diferenças entre o projetado e o realizado. Infelizmente, no momento das vistorias não foram colhidas medidas locais para posterior confirmação.

A análise estatística das nuvens de pontos, apesar de não ter atingido os parâmetros necessários para se ter comprovada significância estatística, de certa forma confirmou algumas impressões já observadas na literatura, como a confirmação de Remondino (2006), de que o uso de imagens de boa qualidade e definição (superiores a 10 MP), gerariam bons resultados nas nuvens de pontos resultantes. Como foi verificado no cruzamento de dados entre as variáveis, se verificou uma probabilidade de 53,51% de que a variação na Resolução tem 18,86%

de chance de influenciar no Erro Médio Quadrático. Além disso, ainda relacionado a qualidade das imagens, o estudo apontou uma probabilidade de 46,88% de que a variação no Índice de Nitidez do Grupo de imagens tem 14,24% de chance de influenciar no Índice de Registro do Cenário.

Na aplicação em obra, a principal vantagem verificada na varredura 3D com o uso da FDT foi a formalização da memória de medição, cuja documentação gerada teve pouca participação humana, além da seleção manual dos elementos da estrutura. Geralmente, as medições são realizadas individualmente, lançando manualmente os valores para cada elemento em grandes listagens de elementos, aumentando o risco de erro humano em várias etapas do processo. Com relação à coleta dos dados através das fotografias, verificou-se que para o acompanhamento do avanço de obras de estrutura de um porte maior, mostraram melhores resultados quando obtidas a uma distância maior, e mesmo perdendo um pouco do detalhamento conseguiam apresentar maior capacidade de transmitir informação ao modelo, sem contar que o cenário pode ser retratado em um número menor de fotos, tornando a etapa de processamento computacional mais rápida.

A integração S2B mostrou facilidade de visualização apresentou as seguintes conclusões: a) o registro da medição é formalizado de forma visual tornando-o mais fácil de ser conferido ou auditado; b) a apresentação visual do histórico de avanço da obra torna-se mais didática c) a formalização tridimensional do cenário real consegue evidenciar o progresso do empreendimento; d) o processo apresentado ainda tem muitas etapas manuais tornando-o lento e cansativo.

A agilidade na coleta de dados é muito superior aos métodos convencionais, ainda mais se tratando de varredura 3D de baixa complexidade, como pode ser visto na Vistoria 4, que com aproximadamente 8 a 9 minutos de filmagem ao redor da obra, foi possível obter subsídios para realizar a medição de avanço de toda a estrutura de concreto da obra, referente aquela vistoria.

O uso de FDT desmistifica o uso da varredura 3D, sem grandes investimentos em equipamentos e *softwares*, mostrando-se um potencial conjunto de ferramentas de inclusão digital que pode ser aproveitado por um grande nicho de profissionais da área de gestão de obras, principalmente os que trabalham com obras de pequeno e médio porte, desde que suas necessidades sejam atendidas por nuvens de pontos com baixo nível de detalhamento e precisão dimensional, em rotinas de baixa complexidade para acompanhamento de obras.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma das vantagens do uso do LEIV associado a dispositivos móveis em ambientes internos, é que o resultado da varredura 3D é verificado em tempo real na tela do dispositivo, garantindo ao operador a verificação da qualidade da malha triangular que está sendo gerada naquele momento. Em novos experimentos, poderia ser utilizado o recurso de redução de vértices vizinhos, durante a fase de tratamento da malha, podendo trazer melhorias aos cantos do levantamento e, possivelmente, melhorias na precisão dimensional.

A FDT demonstrou possibilidade de uso tanto em ambientes internos como em ambientes externos, com uma boa precisão. Uma maior qualidade dimensional vai depender do uso de pontos de controle referenciados no local da varredura, a fim de garantir que a nuvem de ponto possa ser ajustada corretamente em sua translação, rotação e escala, além de facilitar o registro de nuvens que apresentem distorções. O fato de ela ser processada pós-levantamento incorre o risco de, caso a nuvem não tenha gerado superfície em todos os elementos do cenário, isso somente será percebido após o processamento da mesma. Portanto é importante salientar que seu uso deve ser apenas para varreduras de baixa complexidade, e sempre tendo a atenção em revisar a nuvem gerada, através da conferência visual individual ou da sobreposição das fotos (recurso possível no 3DF Zephyr) para verificação de elementos do cenário que não foram modelados na nuvem de pontos.

A curva de aprendizagem ao longo da pesquisa fez com que os processos fossem sendo realizados cada vez com maior rapidez e eficiência, porém não se chegou a uma metodologia padrão de trabalho. Mesmo assim, se concluiu que, para varreduras de baixa complexidade, o uso de dispositivos móveis se mostrou muito promissor. Seu baixo custo de investimento, sua mobilidade, facilidade de operação, aliada a tecnologia que a cada ano evolui de forma significativa em termos de sensores e resolução, aponta que, principalmente os *smartphones*, são uma ferramenta em potencial que, além de já fazerem parte da vida pessoal, terão cada vez mais um importante papel na vida profissional dos trabalhadores da construção civil.

REFERÊNCIAS

3DFLOW. **3DF Zephyr Free**. Versão 5.019. Verona: 3DFLOW, 2020. Disponível em: <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-photogrammetry-software/>. Acesso em: 22 out. 2020.

A. SADEQ, H. Employing Smartphone and Compact Camera in Building Measurements. *In: 4th International Engineering Conference on Developments in Civil & Computer Engineering Applications, 2018, Erbil. Proceedings [...]* Erbil: Erbil Polytechnic University e Ishik University, 2018. p. 134-149

ALCANTARILLA, Pablo. **A-KAZE**. Disponível em: <http://www.robosafe.com/personal/pablo.alcantarilla/publications.html>. Acesso em: 22 out. 2020.

ÁLVARES, Juliana Sampaio. **Monitoramento Visual do Progresso de Obras com uso de Mapeamentos 3D de Canteiros por VANT e Modelos BIM 4D**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019. p. 174-184.

BALLARD, Herman Glenn. **The Last Planner System of Production Control**. 2000. Thesis (Doctor of Philosophy) - Faculty of Engineering of The University of Birmingham, Birmingham. 2000. Capítulo 3, p.15-18.

BASSIER, M.; VERGAUWEN, M.; GENECHTEN, B. VAN. Automated Semantic Labelling of 3D Vector Models for Scan-to-BIM. *In: ACE 2016 - 4th Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering, 2016, Singapore. Proceedings [...]* Singapore: Global Science and Technology Forum, 2016. p. 93-100

BERNARDES, Maurício Moreira da Silva. **Planejamento e controle da produção para empresas de construção civil**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

BHATLA, A. et al. Evaluation of accuracy of as-built 3D modeling from photos taken by handheld digital cameras. **Automation in Construction**, v. 28, New York: Elsevier Inc., 2012. p. 116-127

BIOTTO, C. N.; FORMOSO, C. T.; ISATTO, E. L. Uso de modelagem 4D e Building Information Modeling na gestão de sistemas de produção em empreendimentos de construção. **Ambiente Construído**, v.15, Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2015. p. 79–96.

BRASIL. Decreto Nº 9.983, de 22 de Agosto de 2019. Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modelling. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2019/Decreto/D9983.htm#art15. Acesso em: 28 ago. 2019.

BUENO, M. et al. Automation in Construction 4-Plane congruent sets for automatic registration of as-is 3D point clouds with 3D BIM models. **Automation in Construction**, v. 89, New York: Elsevier Inc., 2018. p. 120–134

Cignoni, P. et al. **Meshlab**. Versão 2016.12. Disponível em:

<https://www.meshlab.net/>. Acesso em: 30 out. 2020.

Cignoni, P. et al. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. *In: Eurographics Italian Chapter Conference, 2008, Salerno. Proceedings [...]* Salerno: Vittorio Scarano- Rosario De Chiara-Ugo Erra, 2008.

COSTANTINO, D.; PEPE, M.; ALFIO, V. S. Point Cloud accuracy of Smartphone Images: Applications in Cultural Heritage. **International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering**, v.9. World Academy of Research in Science and Engineering, 2020. p. 6259-6267

D´AVILA, Edson. **Sistema imageador infravermelho para classificação de frutas por volume**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola na Área de Concentração em Máquinas Agrícolas) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018. p.25-38

DEZEN-KEMPTER, E. et al. Escaneamento 3D a laser, Fotogrametria e Modelagem da Informação da Construção para gestão e operação de edificações históricas. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, v. 10, n.2, São Paulo, 2015, p. 113–124.

DING, L.; ZHOU, Y.; AKINCI, B. Building Information Modeling (BIM) application framework : The process of expanding from 3D to computable nD. **Automation in Construction**, v. 46, New York: Elsevier Inc., 2014. p. 82–93.

DINSMORE, P. C.; CAVALIERI, A. **Como se tornar um profissional em Gerenciamento de Projetos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2007.

EASTMAN, Chuck. et al. **Manual de BIM: Um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2014.

Especificações técnicas Canon SX 510 hs. *In: www.canon.com.br*. Disponível em: <https://www.canon.com.br/produtos/produtos-para-voce/cameras/linha-powershot/serie-sx/sx510-hs>. Acesso em: 30 out. 2020.

Especificações técnicas Galaxy Note 10 Lite. *In: www.samsung.com/br*. Disponível em: <https://www.samsung.com/br/smartphones/galaxy-note/galaxy-note10-lite-aura-black-128gb-sm-n770fzkjzto/>. Acesso em: 30 out. 2020.

Especificações técnicas Galaxy Note 8. *In: www.samsung.com/br*. Disponível em: <https://www.samsung.com/br/smartphones/galaxy-note8/spec-plus/>. Acesso em: 30 out. 2020.

Especificações técnicas iPad 6a Geração. *In: https://support.apple.com*. Disponível em: https://support.apple.com/kb/sp774?locale=pt_BR. Acesso em: 30 out. 2020.

Especificações técnicas Redmi Note 6. *In: www.mi.com/br*. Disponível em: <https://www.mi.com/br/redmi-note-6-pro/specs>. Acesso em: 30 out. 2020.

Especificações técnicas Structure Sensor by Occipital. *In: https://structure.io/*. Disponível em: <https://support.structure.io/article/157-what-are-the-structure-sensors-technical-specifications>. Acesso em: 30 out. 2020.

Estabelecimentos na construção. *In*: Base de Dados CBIC. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/empresas-de-construcao/estabelecimentos-na-construcao>. Acesso em: 28 ago. 2019.

Estratégia BIM-BR *In*: Governo do Brasil - Ministério da Economia, Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/images/REPOSITORIO/sdci/CGMO/26-11-2018-estrategia-BIM-BR-2.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2019.

Fórum CloudCompare. Disponível em: <https://www.danielgm.net/cc/forum/viewtopic.php?t=2449>. Acesso em: 29 out. 2020.

FURUKAWA, Y. et al. Towards internet-scale multi-view stereo. *In*: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010, San Francisco. **Proceedings [...]** San Francisco: Trevor Darrell, David Hogg, David Jacobs, 2010. p. 1434–1441.

GENG, J. **Structured-light 3D surface imaging**: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics* v. 3, Washington DC: OSA – The Optical Society, 2011. p. 128–160.

GNU GPL (General Public License). **CloudCompare**. Versão 2.11.3, 2020. Disponível em: <http://www.cloudcompare.org/release/notes/20171026/>. Acesso em: 22 out. 2020.

GOLPARVAR-FARD, M. et al. Visualization of Construction Progress Monitoring with 4D Simulation Model Overlaid on Time-Lapsed Photographs. **Journal of Computing in Civil Engineering**. Reston: The American Society of Civil Engineers, 2009. p. 391–405.

GOLPARVAR-FARD, M. et al. Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. **Automation in Construction**, v. 20, n. 8, New York: Elsevier Inc., 2011. p. 1143–1155.

GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. DE. Dense Stereo Matching (DSM): conceitos, processos e ferramentas para criação de nuvens de pontos por fotografias. *In*: Congreso de La Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital – SiGraDi 2015, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis: Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, 2012. p. 361-365

GROETELAARS, Natalie Johanna. **Criação de modelos BIM a partir de “Nuvens de Pontos”**: Estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015. p. 68-86

HAMMER, Ø; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. **PAST**: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. Version 3.21. *Paleontologia Eletronica* 4 (1): 9 pp

HAMMER, Ø. **Reference manual** - PAST - PAleontological STatistics Version 3.22. Oslo: Natural History Museum University of Oslo, 2018.

- HASLER, O. Configuration and simulation tool for 360-Degree Stereo Camera RIG. *In: ISPRS Geospatial Week 2019, Enschede. Proceedings [...]* Enschede: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 2019. p. 793–798.
- HEIGERMOSER, D. et al. BIM-based Last Planner System tool for improving construction project management. **Automation in Construction**, v. 104, New York: Elsevier Inc., 2019. p. 246–254.
- HIESTAND, Roman. **Regard 3D**. Versão 1.0.0. Disponível em: <https://www.regard3d.org/index.php/documentation/introduction>. Acesso em: 22 out. 2020.
- KHALLOUFI, H. et al. Low-Cost Terrestrial Photogrammetry for 3D modelling of Historic Sites: A case study of the Marininds' Royal Necropolis City of Fez, Morocco. **Mediterranean Archaeology and Archaeometry**, Vol. 20, No 3, 2020. P. 257-272
- KLEIN, L.; LI, N.; BECERIK-GERBER, B. Imaged-based verification of as-built documentation of operational buildings. **Automation in Construction**, v. 21, n. 1, New York: Elsevier Inc., 2012. p. 161–171.
- KOSKELA, L. et al. **Chapter 14: The foundations of lean construction**. *In: BEST, Rick; DE VALENCE, Gerard. Design and Construction: Building in Value*. New York: Elsevier Inc., 2002. p. 211-226.
- LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística Aplicada**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.
- LIN, J. J.; LEE, J. Y.; GOLPARVAR-FARD, M. Exploring the Potential of Image-Based 3D Geometry and Appearance Reasoning for Automated Construction Progress Monitoring. *In: ASCE - International Conference on Computing in Civil Engineering 2019, Atlanta. Proceedings [...]* Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2019.
- MAALEK, R.; LICHTI, D. D.; MAALEK, S. **Towards Automatic Digital Documentation and Progress Reporting of Mechanical Construction Pipes using Smartphones**. *[S.l.]*. 2020. p. 1–23. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/347534659>. Acesso em: 17 mar. 2021.
- MURA, C. et al. Automatic room detection and reconstruction in cluttered indoor environments with complex room layouts. **Computers and Graphics**, v. 44, New York: Elsevier Inc., 2014. p. 20–32.
- NOCERINO, E. et al. 3D Reconstruction with a Collaborative Approach Based on Smartphones and a Cloud-Based Server. *In: 5th International Workshop Low-Cost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, 2017, Hamburg. Proceedings [...]* Hamburg: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W8, 2017. p. 187-194
- OCHMANN, S. et al. Automatic reconstruction of parametric building models from indoor point clouds. **Computers and Graphics**, v. 54, New York: Elsevier Inc., 2016. p. 94–103.

RAVANELLI, R.; LASTILLA, L.; CRESPI, M. 3D modelling by low-cost range camera: Software evaluation and comparison. *In: 5th International Workshop Low-Cost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, 2017, Hamburg. Proceedings [...]* Hamburg: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W8, 2017. p. 209-212

REBOLJ, D. et al. Point cloud quality requirements for Scan-vs-BIM based automated construction progress monitoring. **Automation in Construction**, v. 84, New York: Elsevier Inc., 2017. p. 323–334.

REISS, Mário Luiz Lopes. **Reconstrução Tridimensional Digital de objetos à curta distância por meio de Luz Estruturada**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Presidente Prudente, 2007. p. 41-74

REMONDINO, F. Image-Based 3D Modelling : A Review. **The Photogrammetric Record**, v. 21, n. 115, Oxford: The Remote Sensing and Photogrammetry Society and Blackwell Publishing Ltd., 2006. p. 269–291.

RIEGEL, Juergen; MAYER, Werner; VAN HAVRE, Yorik. **Freecad**. Versão 0.17. Disponível em: <https://www.freecadweb.org>. Acesso em 17 mar. 2021.

RODRIGUES, Priscilla Borges de Freitas et al. Uma proposta de integração do modelo BIM ao Sistema Last Planner. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 4, Porto Alegre, 2018. p. 301-317

SACKS, R. et al. KanBIM Workflow Management System: Prototype implementation and field testing. **Lean Construction Journal**, [s.l.], 2013. p. 19-35.

SCHEER, S.; MENDES JUNIOR, R.; CAMPESTRINI, T. F. Utilização da modelagem da informação da construção (BIM) no planejamento e controle da produção: um estudo de caso. *In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Maceió, 2014. Anais [...]* Maceió: ENTAC, 2014. p. 2913-2922

SOLOMON, C.; BRECKON, T. **Fundamentos de processamento digital de imagens - Uma abordagem prática com exemplos em MatLab**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2013.

SOUZA, Rogério Püten; KERN, Andrea Parisi; KUNST, Rafael; EMMERICH, Ramiro Gomes. Estudo experimental de sensor de varredura 3d de baixo custo para uso em acompanhamento de obras. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. Anais [...]* Porto Alegre: ANTAC, 2020.

SUBRAMANIAN, P.; GHEISARI, M. Using 360-Degree Panoramic Photogrammetry and Laser Scanning Techniques to Create Point Cloud Data: A Comparative Pilot Study. *In: 55th ASC Annual International Conference, Denver, 2019. Proceedings [...]* Denver: Associated Schools of Construction, 2019. p. 742–750.

TAGHADDOS, H.; MASHAYEKHI, A.; SHERAFAT, B. Automation of construction quantity take-off in a BIM Model. *In: Construction Research Congress 2016, San Juan, 2016. Proceedings [...]* San Juan: University of Puerto Rico-Mayagüez and

the Construction Research Council of the Construction Institute of ASCE, 2016. p.1-10.

TAVANI, S. et al. Smartphone : An alternative to ground control points for orienting virtual outcrop models and assessing their quality. **Geosphere**, v. 15, n. 6, 2019. p. 2043–2052.

TAVANI, S. et al. Terrestrial SfM-MVS photogrammetry from smartphone sensors. **Geomorphology**, v. 367, New York: Elsevier Inc., 2020. p. 1-8

TURKAN, Yelda. **Automated Construction Progress Tracking using 3D Sensing Technologies**. Thesis (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) - University of Waterloo, Ontario, 2012.

VALENTE, Caroline Porto. **Modelo para Concepção de Dispositivos Visuais na Gestão da Produção na Construção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

VINCI, A. et al. A smartphone camera for the structure from motion reconstruction for measuring soil surface variations and soil loss due to erosion. **Hidrology Research**. [S.l.] IWA Publishing, 2017. p. 673–685.

WANG, Q.; KIM, M. Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteen- year review from 2004 to 2018. **Advanced Engineering Informatics**, v. 39, New York: Elsevier Inc., 2019. p. 306–319.

WU, Changchang. **VisualSFM** - A Visual Structure from Motion System. Version 0.5. Disponível em <http://ccwu.me/vsfm>. Acesso em 17 mar. 2021.

ZHU, Z.; BRILAKIS, I. Comparison of Optical Sensor-Based Spatial Data Collection Techniques for Civil Infrastructure Modeling. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 23, n. 3, Reston: The American Society of Civil Engineers, 2009. p. 170–177.