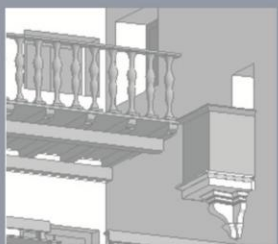




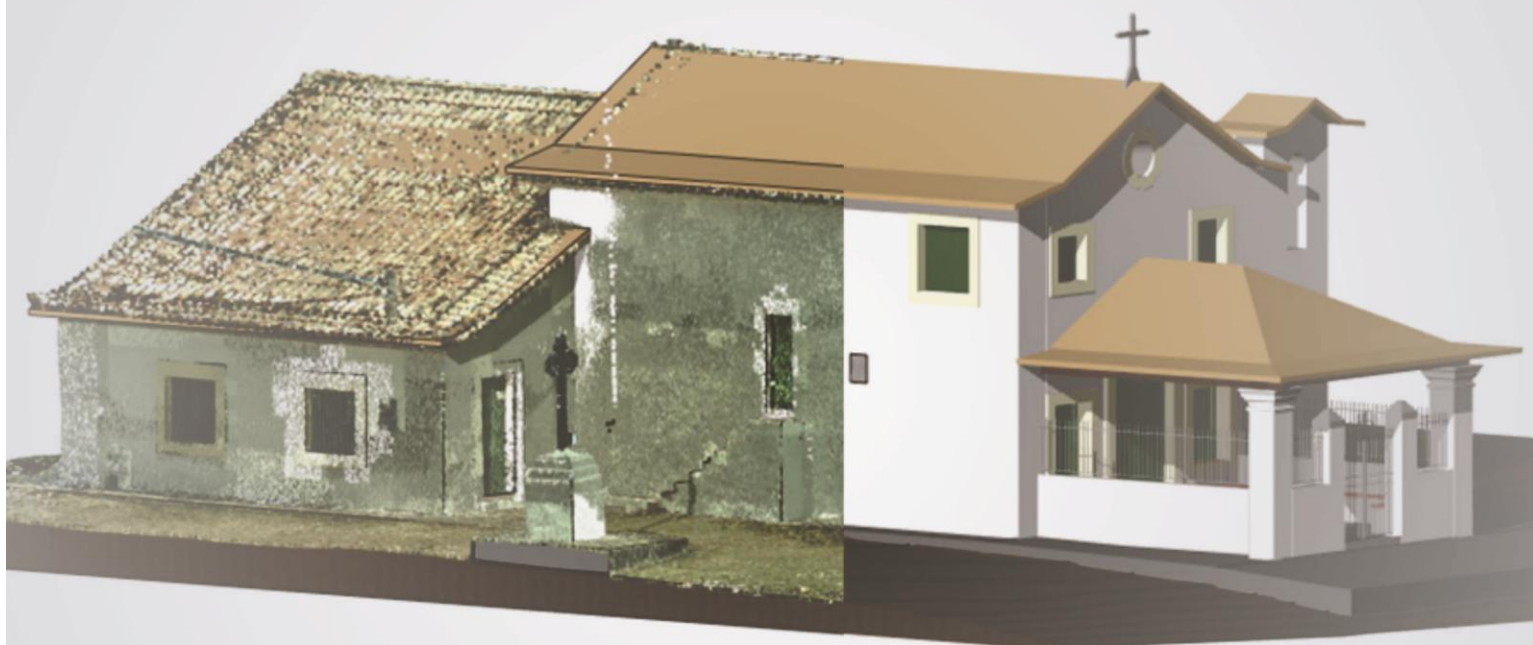
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO



NATALIE JOHANNA GROETELAARS

CRIAÇÃO DE MODELOS BIM A PARTIR DE “NUVENS DE PONTOS”

ESTUDO DE MÉTODOS E TÉCNICAS PARA DOCUMENTAÇÃO ARQUITETÔNICA



SALVADOR - BAHIA
2015

NATALIE JOHANNA GROETELAARS

CRIAÇÃO DE MODELOS BIM A PARTIR DE "NUVENS DE PONTOS": ESTUDO DE MÉTODOS E TÉCNICAS PARA DOCUMENTAÇÃO ARQUITETÔNICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim

SALVADOR - BAHIA,
2015

G874 Groetelaars, Natalie Johanna.

Criação de modelos BIM a partir de “nuvens de pontos”: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica / Natalie Johanna Groetelaars. 2015.

372 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim.

Tese (doutorado) - Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Arquitetura, 2015.

1. Arquitetura - Documentação. 2. Arquitetura - Fotogrametria - Projetos e construção. 3. Arquitetura - Cadastros. I. Universidade Federal da Bahia. Faculdade de Arquitetura. II. Amorim, Arivaldo Leão de. III. Título.

CDU: 72

NATALIE JOHANNA GROETELAARS

CRIAÇÃO DE MODELOS BIM A PARTIR DE "NUVENS DE PONTOS": ESTUDO DE MÉTODOS E TÉCNICAS PARA DOCUMENTAÇÃO ARQUITETÔNICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Salvador, 7 de abril de 2015.

Banca examinadora:

Arivaldo Leão de Amorim - Orientador _____

Doutor em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Carlos Alejandro Nome _____

Doutor em Arquitetura pela Texas A&M University System, Estados Unidos
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

Eva Savina Malinverni _____

Doutora em Ciências Geodésicas e Topografia pelo Politecnico di Milano, Itália
Università Politecnica dele Marche - UNIVPM

Gilberto Corso Pereira _____

Doutor em Geografia pela Universidade Estadual Paulista
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Mário Mendonça de Oliveira _____

Título de Notório Saber em Arquitetura pela Universidade Federal da Bahia
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Para
Sérgio e Marina

AGRADECIMENTOS

Ao querido professor Arivaldo Leão de Amorim, pela orientação dedicada, pelos valiosos ensinamentos, exemplo, apoio e incentivo constante em minha formação e carreira acadêmica.

Aos professores Mário Mendonça de Oliveira, Gilberto Corso Pereira e Carlos Alejandro Nome pelas importantes contribuições durante a etapa de qualificação.

À paróquia da Capela de Nossa Senhora da Escada, através do Padre Kaspar Küster e da Sra. Silvina Cerqueira Maia, pelo acesso à capela e sua documentação.

Ao LCAD – Laboratório de estudos avançados em Cidade, Arquitetura e tecnologias Digitais da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia (FAUFBA), pelo apoio e estrutura disponibilizados.

Ao colega Fabiano Mikalauskas de Souza Nogueira, pelos importantes ensinamentos passados no curso de extensão "Instrumentação para pesquisa: Revit Architecture".

À Universidade Federal da Bahia, pela concessão do afastamento de minhas atividades docentes para a finalização da pesquisa e, especialmente, aos colegas do curso noturno da FAUFBA, pelas contingências decorrentes desse afastamento.

A FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos – pelo apoio ao projeto de pesquisa "Tecnologias da Informação e Comunicação aplicadas à construção de Habitações de Interesse Social" - TIC-HIS, desenvolvido pelo LCAD.

À minha família, pelo carinho, dedicação, confiança, estímulo e apoio permanente.

A Sérgio e à pequena Marina, pelo amor, apoio e presença.

A todos os que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

GROETELAARS, N. J. **Criação de modelos BIM a partir de "nuvens de pontos"**: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica. 2015. 372 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

RESUMO

Este trabalho fundamenta e demonstra o uso do *3D Laser Scanning* e da técnica *Dense Stereo Matching* (DSM) para a captura das informações geométricas, usadas como referência para a Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modeling* - BIM) de edificações existentes. O trabalho foi desenvolvido a partir do embasamento teórico sobre o tema e da realização de experimentos. Os aspectos teóricos estão relacionados a fundamentos de documentação arquitetônica, finalidade e nível de detalhe, estado da arte das técnicas de levantamento cadastral, estudo aprofundado sobre *3D Laser Scanning* e *Dense Stereo Matching* - DSM, métodos de processamento da "nuvem de pontos" e pesquisa sobre uso da tecnologia BIM em edificações existentes, incluindo a integração com o modelo de "nuvem de pontos". Os procedimentos experimentais consistiram no estudo e apreensão de ferramentas para DSM, de programas para processamento de "nuvens de pontos" e de ferramenta CAD/BIM, visando testar processos e avaliar os produtos gerados, e dando suporte ao estudo de caso: modelagem BIM de edificação histórica. A modelagem da Capela de Nossa Senhora da Escada no programa Revit permitiu o teste e a proposição de métodos de trabalho associados às finalidades e características específicas do modelo, aos diferentes níveis de detalhamento e precisão, com uso integrado de diversas técnicas de levantamento, especialmente a varredura a laser e o DSM. Os experimentos realizados permitiram mostrar as potencialidades da integração de tecnologias visando a geração de modelos BIM mais precisos e de maior qualidade, incluindo a modelagem de formas complexas e a aplicação de texturas fotorrealísticas. Apesar dos bons resultados alcançados e da gama de aplicações do modelo BIM, é importante ressaltar alguns aspectos: a morosidade e a complexidade do processo de modelagem BIM de edificações dotadas de alto nível de detalhe, os problemas de interoperabilidade (conversão de formatos de arquivos) e a necessidade de uso integrado de diferentes tecnologias, visando suprir as limitações de cada uma delas.

Palavras-chave: Modelagem da Informação da Construção / Building Information Modeling (BIM). Nuvem de pontos. Varredura a laser. Dense Stereo Matching (DSM). Documentação arquitetônica.

GROETELAARS, N. J. **Creation of BIM models from point clouds**: the study of methods and techniques for architectural documentation. 2015. 372 f. Thesis - Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

ABSTRACT

This thesis demonstrates the use of 3D Laser Scanning and Dense Stereo Matching technique (DSM) to capture geometric information, used as reference for Building Information Modeling (BIM) of a historic building. The work was developed by theoretical and experimental procedures. The theoretical aspects are related to the fundamentals of architectural documentation, purpose and level of detail, state of the art of surveying techniques, detailed study of 3D Laser Scanning and Dense Stereo Matching - DSM, point cloud processing methods and research on the use of BIM technology in existing buildings, including the integration with point cloud data. The experimental procedures consisted in the study and apprehension of DSM tools, point cloud processing software and CAD/BIM tool, in order to test processes and evaluate generated products, and to support the case study: BIM modeling of historical building. The Capela de Nossa Senhora da Escada modeling in Revit software allowed the test and the proposition of workflows associated with the purposes and model-specific features, with the different levels of detail and with accuracy, using different survey techniques, especially 3D Laser Scanning and DSM. The experiments were able to show the potential of technologies integration for the generation of more accurate BIM models and higher quality, including the modeling of complex shapes and applying photorealistic textures. Despite the good results achieved and the several BIM model applications, it is important to highlight some aspects: the complexity and time consuming process for BIM modeling of existing buildings at a high level of detail, the interoperability problems (file format conversion) and the need for integrated use of different technologies, in order to overcome the limitations of each one.

Keywords: Building Information Modeling (BIM). Point cloud. 3D Laser Scanning. Dense Stereo Matching (DSM). Architectural documentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo geométrico fotorrealístico (interior e exterior) do Castelo Valer na Itália, gerado a partir da integração dos métodos fotogramétricos e da varredura a laser.....	50
Figura 2 - Modelo BIM da Sydney Opera House.....	50
Figura 3 - Sistema de informações NUBES disponível na plataforma <i>web</i>	52
Figura 4 - Classificação das principais técnicas de levantamento.....	61
Figura 5 - Funcionamento do DistToPlan (<i>plugin</i> do AutoCAD) para a geração de desenhos a medida em que é feito o levantamento com trena a laser	62
Figura 6 - Equipamento MMC (STRATO-Apex 9166 da Mitutoyo).....	63
Figura 7 - (a) Exemplo de um braço articulado para registro de coordenadas por contato; (b) mesmo equipamento associado a um <i>laser scanner</i> para geração de "nuvens de pontos" de modo indireto	64
Figura 8 - Estação total robotizada: à esquerda o dispositivo de controle, o sistema de rádio e o prisma, e à direita a estação total sobre tripé.....	66
Figura 9 - Exemplos de equipamentos GNSS: (a) <i>datalogger</i> da Blumax; (b) antena PG-51 da Topcon; (c) receptor GRS-1 da Topcon	67
Figura 10 - Exemplos de tomada fotográfica em diferentes situações: (a) monorrestituição; (b) estereorrestituição; (c) restituição de múltiplas fotografias convergentes.....	70
Figura 11 - Tipos de produtos que podem ser obtidos pela monorrestituição, estereorrestituição e restituição a partir de múltiplas fotos convergentes, respectivamente: (a) foto retificada de uma fachada plana; (b) representação em curvas de isovalor de forma complexa; (c) modelo geométrico com foto-textura de edificação.....	71
Figura 12 - Princípio de funcionamento do DSM: (a) fotografias tomadas de diferentes ângulos para a geração de "nuvens de pontos"; (b) processo de associação de pequenas áreas visando a correlação de <i>pixels</i> nas diferentes fotografias.....	72
Figura 13 - Diferentes objetos levantados por DSM: (a) malha TIN de uma fonte; (b) "nuvem de pontos" de uma edificação; (c) "nuvem de pontos" texturizada de um trecho de cidade	73
Figura 14 - Quadros capturados de um vídeo gerado no PhotoModeler Motion mostrando o aumento de volume da areia ao longo do tempo	74
Figura 15 - (a) Panorama esférico; (b) pontos sobre uma esfera, na interseção dos meridianos e paralelos; (c) projeção equirretangular com marcação dos pontos correspondentes à superfície esférica (coordenadas <i>x</i> e <i>y</i>)	75
Figura 16 - Etapas básicas da fotogrametria esférica até a obtenção do modelo renderizado	76
Figura 17 - Modelagem sobre panoramas fotográficos no Autodesk ImageModeler	77
Figura 18 - (a) "Nuvem de pontos" geradas por fotografias comuns (superior) e por panoramas planos (inferior); (b) sobreposição da malha triangular texturizada e da restituição gerada pela fotogrametria esférica (vermelho)	78
Figura 19 - Modelagem de um veículo com a ferramenta VideoTrace: (a) segmentação inicial para geração dos " <i>superpixels</i> "; (b) "nuvem de pontos" esparsa projetada sobre o quadro e o traçado realizado interativamente.....	80

Figura 20 - Exemplos de câmeras de vídeo imersivas: (a) Ladybug®3; (b) Panono camera; (c) 360Heros.....	80
Figura 21 - Geração do modelo geométrico de um trecho do claustro no Agisoft Photoscan: (a) "nuvem de pontos"; (b) malha triangular com posicionamento dos panoramas 360° (em azul)	81
Figura 22 - "Nuvem de pontos" de um trecho urbano obtida através do processamento de vídeos: (a) vista superior de toda a área levantada; (b) e (c) visualização em maior detalhe de algumas edificações	81
Figura 23 - Etapas de criação do modelo: (a) rotação do objeto; (b) rastreamento de feições do objeto à medida em que é movimentado; (c) "nuvem de pontos"; (d) triangulação; (e) aplicação de foto-textura.....	82
Figura 24 – Representação esquemática do <i>scanner</i> terrestre em funcionamento para obtenção da "nuvem de pontos"	83
Figura 25 - Princípio de funcionamento do sistema de luz estruturada	84
Figura 26 - Comparação entre o escaneamento a laser (esquerda) e por luz estruturada (direita) de uma mesma peça	85
Figura 27 - O sistema HDI Advance R3 (pro) durante um escaneamento, permitindo o registro da forma no <i>software</i> FlexScan3D PRO.....	86
Figura 28 - (a) Câmera termográfica VariCAM HD inspect 900; (b) termograma ilustrando problemas de isolamento térmico na região da porta (regiões mais frias na cor azul, conforme legenda).....	86
Figura 29 - Exemplos de imagens termográficas em edificações: (a) identificação das tubulações de aquecimento no piso; (b) zonas de infiltração (mais escuras); (c) localização de elementos estruturais ocultos no forro e áreas com menor isolamento térmico (mais escuras).....	87
Figura 30 - Termogramas de uma edificação antes e após a restauração.....	87
Figura 31 - (a) Equipamento GPR (UtilityScan da GSSI) na inspeção de uma estrada; (b) exemplo de radargrama; (c) modelo processado com informações tridimensionais da área levantada....	89
Figura 32 - (a) Equipamento GPR (StructureScan™ Mini da GSSI) na inspeção de uma laje; (b) radargrama visualizado em tempo real; (c) dado processado para melhor visualização das informações da laje (semelhante a um raio x)	90
Figura 33 - Exemplo de "Time Slice" de uma parede, mostrando diferentes tipos de alvenaria	90
Figura 34 - (a) Filme radiográfico ilustrando o interior de estrutura de concreto; (b) radiografia computadorizada com o registro de uma tubulação com isolamento	91
Figura 35 - (a) Fotografia da obra de Giovanni da Milano; (b) raio X da pintura ilustrando diferentes camadas de pintura e características dos traços	92
Figura 36 - Comparação das técnicas de levantamento em relação ao tamanho (escala) e a complexidade do objeto, com destaque para o <i>Laser Scanning</i> estático (terrestre) e o DSM.....	93
Figura 37 - Espectro eletromagnético	103
Figura 38 - Propriedades da energia eletromagnética: (a) comprimento de onda e amplitude; (b) frequência; (c) fase	104

Figura 39 - Representação esquemática de um <i>laser scanner</i>	105
Figura 40 – <i>Laser scanner</i> estático RIEGL	107
Figura 41 - <i>Laser scanning</i> terrestre dinâmico: a) equipamentos do sistema <i>outdoor mobile scanning</i> montados em um veículo; b) representação do processo de escaneamento de vias e edificações realizado no sistema de varredura móvel da Topcon	108
Figura 42 - (a) Sistema TIMMS; (b) "nuvem de pontos" (vista em planta) da <i>Northwood-Kensett High School</i> ; (c) foto do exterior da escola; (d) "nuvem de pontos" do interior de uma sala de aula com textura aplicada	109
Figura 43 - Sistema <i>laser scanning</i> aerotransportado	110
Figura 44 - Sistemas baseados em tempo de voo	111
Figura 45 - Sistemas baseados em diferença de fase	111
Figura 46 - Coordenadas esféricas (ρ , α , θ) obtidas pelo <i>laser scanner</i> (em amarelo)	112
Figura 47 - Diferentes equipamentos do tipo tempo de voo - LIDAR (os três primeiros) e diferença de fase - DF (dois últimos): (a) Riegl Vz-400; (b) Riegl Vz-6000; (c) Leica ScanStation P20; (d) Faro Focus ^{3D} X 330; (e) Z+F Imager 5010c	112
Figura 48 - Princípio do sistema laser de triangulação	113
Figura 49 - Diferentes técnicas de projeção no sistema de triangulação	114
Figura 50 - Diferentes tipos de <i>scanners</i> baseados no princípio da triangulação: (a) sistema com base giratória; (b) braço digitalizador; (c) sistema com espelho giratório	114
Figura 51 - Técnica " <i>Image-based Modeling</i> " criada por Debevec, Taylor e Malik (1996): (a) fotografia original com a marcação das arestas; (b) modelo geométrico gerado; (c) arestas do modelo projetadas na fotografia; (d) modelo fotorrealístico	120
Figura 52 - Sistema " <i>Photo Tourism</i> " (a) coleções de fotografias desordenadas disponibilizadas na internet; (b) reconstrução dos posicionamentos das câmeras e geração de "nuvem de pontos" esparsa do objeto fotografado; (c) sistema de navegação através das fotos	121
Figura 53 - Síntese das etapas para geração de modelos geométricos através da técnica DSM	125
Figura 54 - Exemplo da interpolação em nível do <i>subpixel</i>	126
Figura 55 - (a) Foto de uma edificação; (b) <i>Keypoints</i> representados por vetores (indicando escala, orientação e localização), através do algoritmo SIFT	126
Figura 56 - Associação de feições para obtenção da "nuvem de pontos" esparsa e determinação dos parâmetros da câmera	127
Figura 57 - Princípio da geometria epipolar	128
Figura 58 - Exemplo de um esteopar com linhas epipolares (amarelo) em duas situações: desalinhadas (imagens superiores) e alinhadas e na horizontal após a retificação epipolar (imagens inferiores)	129
Figura 59 - (a) mapa de profundidade; (b) modelo em malha triangular; (c) modelo com foto-textura aplicada	129

Figura 60 - Esquema em planta dos dados a serem considerados na tomada fotográfica: distância entre as estações (B), distância para o objeto (L) e ângulo entre as tomadas fotográficas (α).....	131
Figura 61 - Exemplos de tomadas fotográficas: (a) exterior de um objeto ou edificação; (b) uma fachada; (c) interior de uma edificação.....	132
Figura 62 - Modelos numéricos para a representação da forma.....	139
Figura 63 - (a) "nuvem de pontos" do exterior de uma edificação; (b) seção selecionada da "nuvem de pontos"; (c) traçado do contorno em planta baixa.....	140
Figura 64 - (a) Modelo de "nuvem de pontos"; (b) ortofoto; (c) seção parcial; (d) fachada.....	140
Figura 65 - Diferentes contornos obtidos pela vetorização de ortofotos geradas por: (a) "nuvem de pontos"; (b) malha triangular texturizada.....	141
Figura 66 - (a) "nuvem de pontos" do interior de uma edificação; (b) ortofoto planificada no programa LupoScan.....	142
Figura 67 - Modelo de arestas sobre "nuvem de pontos".....	145
Figura 68 - (a) Detecção de feições em uma peça mecânica (contornos precisos); (b) "nuvem de pontos" de um elemento arquitetônico; (c) detecção das feições de detalhe arquitetônico (erros de classificação em forma complexa).....	146
Figura 69 - Modelos sólidos originais (imagens superiores, em azul) e arestas extraídas com o comando <i>xedges</i> do AutoCAD.....	146
Figura 70 - Ajuste da primitiva geométrica "esfera" sobre a "nuvem de pontos" selecionada: (a) falsa identificação; (b) correta identificação da esfera.....	148
Figura 71 - Modelo de superfícies a partir do ajuste de primitivas sobre a "nuvem de pontos".....	149
Figura 72 - Modelos gerados por diferentes operações sobre um mesmo perfil: (a) perfil original; (b) revolução; (c) extrusão com diretriz reta; (c) extrusão com diretriz curva.....	149
Figura 73 - Modelos gerados por curvas (a) duas seções transversais; (b) quatro seções, sendo duas em cada direção.....	150
Figura 74 - (a) Superfície NURBS na forma de um segmento de plano; (b) deslocamento de dois pontos de controle para alteração da forma; (c) forma gerada, sem a visualização dos pontos de controle.....	151
Figura 75 - (a) Operações booleanas realizadas nos objetos de cores cinza e azul; (b) criação de superfície (amarelo) conectando dois objetos preexistentes (cinza), através do <i>blend</i>	152
Figura 76 - Edição de dois tipos de modelo: (a) NURBS - manipulação interativa de pontos de controle; (b) "revolved surface" - alteração do parâmetro "ângulo de revolução" (de 296 para 40 graus).....	153
Figura 77 - Diferentes operações de modificação em superfícies: (a) surfextend; (b) surfillet; (c) surftrim; (d) surfpatch; (e) surfoffset.....	153
Figura 78 - Etapas de processamento do sistema de varredura a laser.....	154
Figura 79 - Tipos de alvos para levantamento arquitetônico: (a) planos; (b) giratórios; (c) esféricos.....	156

Figura 80 - Tipos de alvos para pequenos objetos: (a) colados no objeto; (b) rede; (c) moldura; (d) na base	156
Figura 81 - (a) "nuvem de pontos" da cena 1; (a) "nuvem de pontos" da cena 2; (c) "nuvem de pontos" após o registro.....	157
Figura 82 - Detecção e remoção de <i>outliers</i> : (a) identificação de valores mais discrepantes; (b) seleção de pontos mais refinada.....	159
Figura 83 - Surgimento dos <i>phantom points</i> devido à inclinação do raio laser e a divisão do sinal: (a) corte esquemático da incidência de um raio laser em um degrau; (b) <i>phantom points</i> na "nuvem de pontos"	160
Figura 84 - "Pontos falsos" registrados na "nuvem de pontos" do tipo <i>Jumping point</i> e <i>in-depth points</i>	161
Figura 85 - Segmentação de: (a) "nuvem de pontos" de uma edificação, mostrando os planos em diferentes cores; (b) malha triangular de uma peça mecânica	162
Figura 86 - Exemplos de erros geométricos e topológicos da malha triangular	164
Figura 87 - Decimação de malha poligonal: modelos com redução gradativa no número de polígonos	164
Figura 88 - Relatório de precisão gerado no Geomagic Qualify	165
Figura 89 - Primeira geração de programas: (a) "nuvem de pontos"; (b) seções; (c) superfícies	166
Figura 90 - Segunda geração de programas: (a) "nuvem de pontos"; (b) malha TIN; (c) superfície NURBS.....	166
Figura 91 - Terceira geração de programas: (a) "nuvem de pontos"; (b) modelo paramétrico.....	167
Figura 92 - Paradigma BIM abrangendo todo o ciclo de vida da edificação	172
Figura 93 - (a) Foto do estado atual da edificação; (b) modelo BIM da situação existente; (c) perspectiva do projeto de restauro	185
Figura 94 - Sinagoga Kluckygasse: (a) foto antiga; (b) desenho da fachada principal; (c) objetos paramétricos (paredes, teto, telhado, etc.); (d) modelo BIM gerado	186
Figura 95 – (a) Junção do modelo geométrico da edificação com a "nuvem de pontos" para verificação da precisão, através do uso de cores; (b) comparação do modelo BIM (projeto) com as "nuvens de pontos" da edificação capturadas durante a construção	188
Figura 96 - Edificações na King Street East: (a) "nuvem de pontos"; (b) modelo com as principais paredes; (c) modelo com as instalações	189
Figura 97 - Exemplo de dados históricos em tratado de arquitetura para criação de objetos baseados na gramática da forma, que podem ser combinados para geração de formas mais completas	191
Figura 98 - (a) Inserção e posicionamento preciso de diferentes tipos de informações no ArchiCAD; (b) caixa de diálogo do Parametric Façade e edição gráfica.....	192
Figura 99 - Modelos gerados após a incorporação de componentes paramétricos HBIM de uma rua histórica da Irlanda; (a) perspectiva de um conjunto de edificações; (b) desenho das fachadas de outro trecho.....	192

Figura 100 - Produtos obtidos automaticamente através do modelo BIM: planta baixa, corte, fachada, perspectiva, relação das esquadrias	193
Figura 101 - Uso de diferentes cores para representar as principais fases construtivas da Igreja de Santa Maria	194
Figura 102 - Basílica de Colemaggio: (a) foto tomada por VANT; (b) modelo gerado no Rhino; (c) modelo BIM produzido	195
Figura 103 - Visualização do modo de trabalho com o VirtuSurf: à esquerda realiza-se a seleção dos elementos construtivos sobre o panorama e à direita visualiza-se no Revit os elementos sendo modelados	199
Figura 104 – Fluxo de trabalho com o GreenSpider: (a) "nuvem de pontos" de um trecho da edificação; (b) seccionamento da "nuvem de pontos"; (c) importação dos pontos com <i>splines</i> ; (d) geração do modelo paramétrico no ambiente de massa conceitual	200
Figura 105 - Os cinco níveis de detalhe (LOD 0 a 4) definidos pelo padrão CityGML	205
Figura 106 - Níveis de detalhe dos componentes.....	207
Figura 107 - Síntese do fluxo de trabalho para produção de "nuvens de pontos" pelas ferramentas PhotoModeler Scanner (cinza) e 123D Catch (azul).....	212
Figura 108 - Tomada fotográfica para DSM: (a) posicionamento padrão; (b) posicionamento possível no PhotoModeler, com estações isoladas nas quinas e estações próximas nas faces para a correlação de <i>pixels</i> homólogos	212
Figura 109 - Processo automatizado baseado em alvos codificados: (a) identificação e correlação dos alvos; (b) geração do modelo preliminar (base).....	214
Figura 110 - Seleção das fotos no 123DCatch para <i>upload</i> e processamento	215
Figura 111 - Diversos ângulos do modelo do vaso em malha triangular texturizada	217
Figura 112 - Diferentes possibilidades de representação do vaso cerâmico no PhotoModeler Scanner	217
Figura 113 - Visualização em <i>wireframe</i> e com preenchimento das faces, nas resoluções baixa (imagens superiores) e média (imagens inferiores) do 123D Catch	218
Figura 114 - Resumo dos processos de conversão de formatos, para importação adequada de "nuvens de pontos" e malha TIN no Revit.....	220
Figura 115 - Maquete de papelão: (a) modelo parcial gerado no 123D Catch; (b) "nuvem de pontos" gerada no PhotoModeler Scanner no modo semiautomático.....	222
Figura 116 - Síntese do fluxo de trabalho completo do Geomagic Studio.....	223
Figura 117 - Posicionamento das estações em elevação e em vista superior	225
Figura 118 - Malha triangular texturizada de uma estátua gerada no 123D Catch: (a) em diferentes ângulos com a visualização das faces; (b) em <i>wireframe</i>	226
Figura 119 - Malha TIN antes e após o processo de decimação	226
Figura 120 - Aba "Superfícies exatas" para criação de NURBS	227
Figura 121 - Sequência de comandos para a geração do modelo NURBS	227

Figura 122 - Diferentes formas de visualizar o modelo NURBS: (a) faces, contornos e <i>patches</i> ; (b) contornos e <i>patches</i> ; (c) malha; (d) faces	228
Figura 123 - Análise da precisão do modelo NURBS gerado.....	228
Figura 124 - Fatiamento do modelo para geração de curvas de isovalor (a) seções verticais; (b) seções horizontais.....	229
Figura 125 - Detalhe da estátua processada no Geomagic Studio: (a) malha TIN; (b) superfície NURBS.....	230
Figura 126 - Processos para conversão de formatos visando a importação de malha TIN (em cinza), superfície NURBS e seções (em azul) no Revit	231
Figura 127 - Modelos parciais da "Casa Rosa" gerados no 123D Catch.....	233
Figura 128 - Detalhe da malha triangular gerada no 123D Catch.....	234
Figura 129 - Modelo de "nuvem de pontos" da "Casa Rosa" registrado no Revit Architecture	234
Figura 130 - Comparação da planta baixa e fachada (medição direta) com a "nuvem de pontos"	235
Figura 131 - Trecho com maior diferença entre "nuvem de pontos" e cadastro por medição direta.....	235
Figura 132 - Modelo de superfície parcial da "Casa Rosa" criado no PhotoModeler	236
Figura 133 - Modelo parcial da "Casa Rosa" criado no Revit a partir da "nuvem de pontos"	237
Figura 134 - Modelo parcial da edificação gerado no Revit, a partir do modelo de superfícies do PhotoModeler: (a) sobreposição do modelo BIM com o de superfícies; (b) detalhe de um ornamento modelado	238
Figura 135 - Aplicação de textura no elemento "parede" do Revit, utilizando a ortofoto correspondente.....	238
Figura 136 - (a) Comandos típicos para criação de paredes; (b) tipos de paredes: básicas, cortinas de vidro e compostas	241
Figura 137 - (a) Janela de edição das camadas da parede; (b) alteração na altura da camada de tijolinho (imagem superior) e inclusão de rebaixos e ressaltos na parede (imagens inferiores).....	242
Figura 138 - (a) Diferentes possibilidades de alteração das camadas de uma parede desmembrada; (b) caixa de propriedades de cada camada (<i>part</i>) da parede	242
Figura 139 - (a) Paredes que tiveram o perfil editado; (b) parede curva com rasgos criados com o " <i>wall opening</i> "	243
Figura 140 - Comandos (implícitos) da modelagem conceitual: (a) <i>Extrusion</i> ; (b) <i>Revolve</i> ; (c) <i>Blend</i> e (d) <i>Sweep</i>	245
Figura 141 - Comandos (implícitos) da "modelagem conceitual": (a) <i>Swept blend</i> , gerado através de dois perfis; (b) <i>Swept blend</i> , através de três perfis; (c) <i>Loft</i> a partir de perfis fechados; (d) <i>Loft</i> a partir de perfis abertos	246
Figura 142 - Exemplos de possibilidades de edição do objeto de massa conceitual	246
Figura 143 - Simulação da modelagem de uma parede complexa	247

Figura 144 - (a) Seleção de uma face do objeto de massa conceitual; (b) criação do elemento parede (em cinza)	247
Figura 145 - Problemas na associação de: (a) uma parede; (b) duas paredes	248
Figura 146 - Comandos do modo <i>Model In-Place</i>	248
Figura 147 - Diferentes formas de paredes geradas pela extrusão do perfil em planta baixa ou elevação	249
Figura 148 - (a) Plano de referência criado e nomeado "plano inclinado" na planta baixa; (b) visualizado em perspectiva como plano ativo, de trabalho (<i>Work Plane</i>); (c) linhas de referência dentro da modelagem <i>In-Place</i> com quatro planos associados	250
Figura 149 - Diferentes formas de paredes geradas pelo <i>Blend</i> a partir de perfis da base (em cinza) e da parte superior (em magenta)	250
Figura 150 - Paredes mais complexas geradas com o <i>Blend</i> a partir dos perfis da base (em cinza) e da parte superior (em magenta)	251
Figura 151 - Processo de criação de uma parede mais complexa, a partir de uma parede de sistema: (a) parede original; (b) criação da forma "vazia" (<i>void form</i>); (c) e (d) sobreposição da parede com a forma "vazia"; (e) parede gerada após a subtração do <i>void form</i>	252
Figura 152 - Parede mais complexa gerada pelo método "misto", vista em: (a) planta baixa; (b) corte	252
Figura 153 - Objetos antes e após o comando <i>Explode</i> : (a) <i>spline</i> ; (b) objeto sólido	253
Figura 154 - (a) Superfície NURBS criada no AutoCAD; (b) importada no modo <i>In-Mass</i> do Revit; (c) após o <i>Explode</i>	254
Figura 155 - (a) Malha poligonal (<i>mesh</i>) criada no AutoCAD; (b) importada no modo <i>In-Mass</i> do Revit para associação das paredes (em azul)	254
Figura 156 - Fotografia da fachada principal da Capela de Nossa Senhora da Escada	257
Figura 157 - Planta baixa da capela	258
Figura 158 - Fotografias antigas da Capela de Nossa Senhora da Escada: tiradas em 1940 e 1959, respectivamente	259
Figura 159 - Modelo geométrico da capela gerado no PhotoModeler: (a) em estrutura de arame; (b) com aplicação de foto-texturas	260
Figura 160 - (a) Laser scanner Leica ScanStation C10 sobre tripé; (b) detalhe da unidade de controle com a "nuvem de pontos" gerada	262
Figura 161 - Posicionamento das estações para varredura das diversas cenas	263
Figura 162 - Três tipos de alvos utilizados	264
Figura 163 - Registro entre "nuvens de pontos" geradas nas estações 4 e 5	264
Figura 164 - Visualização da "nuvem de pontos" texturizada do interior e do exterior da capela	265
Figura 165 - Seccionamentos na "nuvem de pontos" para inspeção visual do registro das cenas	265
Figura 166 - Posicionamento das estações em vista superior e em perspectiva no 123D Catch	266
Figura 167 - Diversos ângulos da malha TIN da capela gerada no 123D Catch	267

Figura 168 - Comandos específicos para manipulação da "nuvem de pontos" no AutoCAD 2015.....	268
Figura 169 - Sobreposição da planta baixa (medição direta, em azul) com os modelos de superfícies (Fotogrametria Digital, em vermelho) com a "nuvem de pontos" (varredura a laser, em preto).....	268
Figura 170 - Fachada lateral direita: sobreposição da "nuvem de pontos" com o desenho por medição direta.....	269
Figura 171 - Fachada lateral direita: sobreposição da "nuvem de pontos" com o desenho por medição direta.....	270
Figura 172 - Sobreposição dos modelos de "nuvem de pontos" (texturizada) e de superfícies (em <i>wireframe</i> , cor vermelha)	270
Figura 173 - Fachada lateral direita: sobreposição dos modelos de "nuvem de pontos" e de superfícies (em <i>wireframe</i> , cor vermelha)	270
Figura 174 - Fachada principal: sobreposição dos modelos de "nuvem de pontos" e de superfícies (em <i>wireframe</i> , cor vermelha)	271
Figura 175 - Modelagem das coberturas (visualização em <i>wireframe</i>)	271
Figura 176 - Detalhe do capitel da pilastra antes e após o comando <i>explode</i>	272
Figura 177 - Modelo simplificado gerado no Revit.....	272
Figura 178 - Arquivo JPG contendo as ortofotos de todas as superfícies do modelo do PhotoModeler.....	273
Figura 179 - (a) Seleção da textura da fachada principal; (b) rotação e edição da ortofoto.....	273
Figura 180 - Texturas aplicadas com o <i>Decal</i>	274
Figura 181 - Associação da mesma textura em paredes do mesmo tipo	274
Figura 182 - Uso do <i>Paint</i> para aplicação de materiais em paredes externas da capela	275
Figura 183 - Sobreposição da textura com o modelo de superfície para correção de seu posicionamento	276
Figura 184 - Janela de definição dos valores de deslocamento dos planos que definem a faixa de vista, nesse caso, com profundidade de 2 cm (1.51 - 1.49 m).....	278
Figura 185 - Mesmo trecho da "nuvem de pontos" visualizada com diferentes profundidades: 1,50 e 0,02 m, respectivamente.....	278
Figura 186 - Parede da nave (fachada nordeste) modelada inicialmente com linha (acima), mas substituída por arco (abaixo) para melhor ajuste da forma visualizada na faixa da "nuvem de pontos"	279
Figura 187 - Comandos para modelagem de terreno no Revit.....	280
Figura 188 - (a) Inserção de alguns pontos (em azul) sobre a "nuvem de pontos"; (b) valores das coordenadas tridimensionais dos pontos gerados no AutoCAD	282
Figura 189 - Processo de limpeza no Recap para obtenção do modelo do terreno	282
Figura 190 - Criação das curvas no Geomagic Studio	283

Figura 191 - Traçado interativo sobre curvas produzidas no Geomagic Studio (em preto): (a) Método 3 - criação de polilinhas para representação das curvas de nível (em verde); (b) Método 4 - introdução de novos pontos (em vermelho).....	284
Figura 192 - Modelos de terreno gerados no Revit a partir dos diferentes métodos utilizados.....	285
Figura 193 - Traçados dos perfis das coberturas (a) extrusão, usada na maior parte dos telhados; (b) varredura do perfil para a modelagem do telhado do alpendre.....	287
Figura 194 - Modelagem da capela no nível 1 de detalhe.....	288
Figura 195 - Paredes que apresentaram os maiores desvios horizontais: (a) planta baixa com indicação das paredes; (b) cortes das paredes 1, 2 e 3, respectivamente.....	289
Figura 196 - Exemplos de desvios horizontais, laterais e verticais, respectivamente: (a) parede vista em planta baixa; (b) parede em corte; (c) forro em corte.....	290
Figura 197 - (a) Ajuste do elemento "abertura de parede" (em azul) a partir da visualização das fachadas; (b) sobreposição da abertura com a "nuvem de pontos" vista em planta baixa.....	291
Figura 198 - Diferentes ângulos do modelo com nível de detalhe 2, tanto do exterior como do interior.....	291
Figura 199 - Criação de filtros para visualização dos desvios.....	292
Figura 200 - Visualização de trechos da "nuvem de pontos" da janela: planta baixa, vista do interior e corte.....	294
Figura 201 - Processo da restituição no PhotoModeler: (a) foto com arestas identificadas; (b) ortofoto gerada.....	295
Figura 202 - Traçado das feições da janela a partir da vista interna (ortofoto) e da planta baixa ("nuvem de pontos").....	295
Figura 203 - Família de janela utilizada para o nível 3: exterior e interior, respectivamente.....	296
Figura 204 - Janela no "Editor de famílias" do Revit: (a) planta baixa; (b) vista externa.....	296
Figura 205 - Processo de recorte da área de interesse no Recap: (a) toda a nuvem de pontos; (b) trecho do <i>limit box</i> contendo o púlpito.....	297
Figura 206 - Processo para inserção da "nuvem de pontos" segmentada no Revit.....	297
Figura 207 - "Nuvem de pontos" inserida no Revit para modelagem do púlpito em: (a) perspectiva; (b) plantas baixas partir de diferentes "faixas de vista".....	298
Figura 208 - Base do púlpito: (a) nível de detalhe 2; (b) nível de detalhe 3.....	298
Figura 209 - Modelagem do púlpito no nível 3 de detalhe: (a) extrusão de perfil (magenta) ao longo de um caminho; (b) extrusão ortogonal (azul); (c) subtração de vazios (laranja); (d) modelo final.....	299
Figura 210 - Recorte das vistas para modelagem do gradil do alpendre: (a) planta baixa ilustrando a linha de corte; (b) visualização do corte indicado na planta; (c) perspectiva do trecho de interesse, limitado pela caixa de corte (<i>section box</i>).....	299
Figura 211 - Diversos elementos modelados no nível 3.....	300
Figura 212 - Modelo da capela no nível 3.....	300
Figura 213 - Indicação das paredes modeladas no AutoCAD e substituídas posteriormente.....	301

Figura 214 - Criação das seções da parede da sacristia/sanitário: (a) posicionamento das seções (em azul) em planta baixa; (b) seções em perspectiva; (c) seções em corte; (d) detalhe do prolongamento da seção	302
Figura 215 - Parede da sacristia/sanitário modelada com o <i>loft</i> (sólido) do AutoCAD em três visualizações diferentes: (a) sem nuvem de pontos e com a sobreposição das seções; (b) sem visualização das arestas; (c) com visualização das arestas que compõem o modelo	302
Figura 216 - (a) Seções horizontais e verticais criadas no Geomagic Studio; (b) uso das seções verticais como referência para criação das faixas de "nuvens de pontos" e posicionamento das origens dos sistemas de coordenadas	303
Figura 217 - Diferentes seções verticais criadas com polilinhas, vistas em: (a) corte; (b) perspectiva.....	304
Figura 218 - Primeiro modelo criado a partir de seções geradas por polilinhas.....	304
Figura 219 - Modelo gerado a partir de seções do tipo <i>splines</i> : (a) antes do prolongamento; (b) depois do prolongamento; (c) após subtração preliminar no AutoCAD.....	305
Figura 220 - Cortes nas paredes da sacristia e do arco cruzeiro, respectivamente: (a) paredes inseridas anteriormente (cinza), (b) modelos importados do AutoCAD (vermelho)	305
Figura 221 - (a) Base do púlpito no nível 4 de detalhe; (b) primeira seção traçada; (c) foto; (d) seção refeita	306
Figura 222 - Família de janela utilizada para o nível 4: exterior e interior, respectivamente	306
Figura 223 - Configuração de visibilidade dos elementos da família	307
Figura 224 - Janela no "Editor de famílias" do Revit: (a) planta baixa; (b) vista externa	307
Figura 225 - Seleção (em azul) dos novos elementos incluídos no nível médio de detalhe (nível 4); (b) filtro para seleção desses elementos.....	308
Figura 226 - Os quatro tipos de janelas criados no nível médio de detalhe; (b) parâmetros de um tipo.....	308
Figura 227 - Diversos elementos incluídos/detalhados no nível 4	309
Figura 228 - Modelo da capela no nível 4.....	309
Figura 229 - Modelagem detalhada da base do púlpito: (a) subtração de volume (em azul) para geração das ranhuras; (b) extrusão de perfil da voluta (em magenta); (c) modelo gerado	310
Figura 230 - Base do púlpito: (a) foto; (b) modelo em malha TIN; (c) modelo NURBS	310
Figura 231 - Comparação dos modelos em malha TIN e NURBS em perspectiva	311
Figura 232 - Comparação da malha TIN, superfície NURBS (ambos sem arestas) e do modelo gerado no Revit (com arestas) nas vistas frontal e lateral esquerda.....	312
Figura 233 - Operações sobre o modelo da estátua: (a) gerado por varredura a laser; (b) gerado por DSM	314
Figura 234 - Comparação da estátua a partir do processamento das "nuvens de pontos" geradas pela varredura a laser e por DSM.....	314
Figura 235 - Modelagem da estátua no AutoCAD, com extremidades modeladas separadamente	316

Figura 236 - Estátua inserida no Revit: (a) sem textura; (b) após a associação à textura da foto; (c) vista em <i>wireframe</i>	316
Figura 237 - Produtos gerados no Gemagic Studio e importados no Revit: malha TIN e superfície NURBS.....	317
Figura 238 - Inclusão de detalhes mais complexos: (a) malha TIN texturizada da estátua de Santo Antônio; (b) modelo do púlpito gerado no Revit	318
Figura 239 - Aplicação de texturas obtidas pela retificação de fotos: (a) piso em mármore da capela-mor; (b) lápide da fachada nordeste, marco da invasão holandesa	319
Figura 240 - Parâmetros compartilhados para inclusão de informações semânticas aos elementos construtivos.....	319
Figura 241 - Recursos para fatiamento da "nuvem de pontos" e de modelos gerados no Revit: (a) <i>Section box</i> em perspectiva; (b) seção com pequena profundidade; (c) delimitação da "região de corte" (em azul)	321
Figura 242 - Sobreposição do modelo BIM com a malha TIN (em azul) gerada por DSM, visualizada em dois diferentes ângulos.....	330
Figura 243 - Sobreposição do modelo BIM com a malha TIN gerada por DSM, visualizada em planta baixa.....	331
Figura 244 - Sobreposição do modelo BIM com a malha TIN gerada por DSM (azul): (a) fachada sudoeste; (b) detalhe da escada; (c) detalhe da parede	331
Figura 245 - Trecho de parede modelada (em bege) vista em planta baixa, junto à sobreposição com os obstáculos (quadros e livros) registrados na "nuvem de pontos", que podem confundir a espessura real da parede	333
Figura 246 - Calibração da câmera no PhotoModeler	361
Figura 247 - Parâmetros internos da câmera: (a) simplificados, através do EXIF; (b) completos, através do processo de calibração no PhotoModeler	361
Figura 248 - Relatório de processamento automatizado dos alvos.....	363
Figura 249 - Associação interativa de pontos homólogos no 123D Catch.....	364
Figura 250 - Janela para a geração de "nuvens de pontos" do PhotoModeler Scanner.....	365
Figura 251 - "Nuvem de pontos": (a) com valores pré-configurados; (b) com valores alterados.....	366
Figura 252 - Inclusão de duas fotos da base do vaso cerâmico	366
Figura 253 - Utilização de layers para separação e comparação dos diferentes produtos gerados ...	367
Figura 254 - Operações para otimização da "nuvem de pontos" e da malha TIN	368
Figura 255 - Tabela contendo os modelos de "nuvens de pontos" e malhas triangulares (<i>PointMesh table</i>).....	369
Figura 256 - Modelo do vaso em malha triangular, com problemas na textura.....	369
Figura 257 - Operações possíveis com o modelo do tipo "nuvem de pontos"	371
Figura 258 - Operações possíveis com o modelo do tipo "malha poligonal".....	371
Figura 259 - Operações para geração do modelo do tipo "NURBS"	371

Figura 260 - Operações para geração de superfícies paramétricas	372
Figura 261 - Operação para manipulação de modelos do tipo "CAD"	372

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Níveis de registro do patrimônio segundo Letellier (2007)	55
Quadro 2 - Níveis de detalhe x informações a serem levantadas, segundo o English Heritage (2006).....	56
Quadro 3 - Níveis de precisão x objetivos x informações a levantar, segundo Cramer e Breitling (2007).....	58
Quadro 4 - Alguns critérios para escolha da técnica em função das características do levantamento.....	95
Quadro 5 - Exemplos de aplicações das técnicas não destrutivas em função das informações a serem levantadas	97
Quadro 6 - Comparação de diferentes grupos de classificação do <i>3D Laser Scanning</i>	107
Quadro 7 - Comparação entre equipamentos do tipo LIDAR e diferença de fase	113
Quadro 8 - Principais expressões, na língua portuguesa e inglesa, utilizadas para se referir a conjuntos específicos de <i>pixeis</i> extraídos de fotografias	123
Quadro 9 - Determinação do valor ótimo de R: áreas mais escuras representam valores mais favoráveis.....	131
Quadro 10 - Classificação das ferramentas para DSM.....	133
Quadro 11 - Comparação entre <i>3D laser scanning</i> e <i>Dense Stereo Matching</i>	136
Quadro 12 - Precisão e densidade da "nuvem de pontos" em função da escala	155
Quadro 13 - Exemplos de ferramentas em diversas fases do ciclo de vida da edificação	177
Quadro 14 - Diferentes LOD associados às características geométricas do modelo e suas funções/fases.....	179
Quadro 15 - Características dos elementos "paredes" e "esquadrias" em relação aos LOD	179
Quadro 16 - Associação dos níveis de detalhe com valores de tolerância e tamanhos mínimos do objeto.....	205
Quadro 17 - Associação dos níveis de detalhe (<i>levels</i>) com escalas de representação e espaçamento dos pontos na "nuvem de pontos"	207
Quadro 18 - Comparação de parâmetros da malha TIN do 123D Catch em três tipos de resolução ..	218
Quadro 19 - Diferentes formatos e tamanhos dos arquivos	231
Quadro 20 - Características principais do laser scanner Leica ScanStation C10	262
Quadro 21 - Comparação dos métodos utilizados para modelagem do terreno	284
Quadro 22 - Classificação dos modelos BIM de edificações existentes em cinco níveis de detalhe...	286
Quadro 23 - Alternativas para utilização da "nuvem de pontos" na criação de objetos no editor de famílias do Revit.....	293
Quadro 24 - Comparação dos modelos em malha TIN e NURBS no Geomagic Studio e Revit	313
Quadro 25 - Testes de modelagem complexa realizados no Revit	315

Quadro 26 - Técnicas de modelagem para objetos de baixa ou média complexidade.....	323
Quadro 27 - Técnicas de modelagem para objetos de alta complexidade	324
Quadro 28 - Técnicas para modelagem de paredes complexas	324
Quadro 29 - Técnicas de modelagem para objetos irregulares	326
Quadro 30 - Dois conjuntos de modelos sobrepostos a serem definidos em função das aplicações desejadas.....	327
Quadro 31 - Técnicas para aplicação de texturas no Revit	329
Quadro 32 - Aplicações, vantagens e desvantagens dos métodos de levantamento utilizados.....	334

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
AECO	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação
AIA	American Institute of Architects
BIM	<i>Building Information Modeling</i> / Modelagem da Informação da Construção
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Projeto Auxiliado por Computador)
CIPA	<i>Comité International de Photogrammétrie Architecturale</i> (significado original da sigla em francês), mas hoje denominado <i>CIPA Heritage Documentation</i>
DSM	<i>Dense Stereo Matching</i>
EXIF	<i>Short for EXchangeable Image File</i> , ou formato para armazenamento de informações (metadados) em arquivos de imagens digitais
FAUFBA	Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
HBIM	<i>Historic Building Information Modelling</i>
ICOMOS	<i>Internacional Council on Monuments and Sites</i>
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
ISPRS	<i>International Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
LCAD	Laboratório de estudos avançados em Cidade, Arquitetura e tecnologias Digitais da FAUFBA, anteriormente denominado de Laboratório de Computação Gráfica Aplicada à Arquitetura e ao Desenho da FAUFBA (de 1991 a setembro de 2014)
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LOD	Usado tanto para se referir a <i>Level of Detail</i> , como para <i>Level of Development</i> , apresentando diferentes significados
NURBS	<i>Non-Uniform Rational B-Splines</i>
UFBA	Universidade Federal da Bahia
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VRML	<i>Virtual Reality Modelling Language</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	30
1.1	ANTECEDENTES	33
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E DO PROBLEMA DA PESQUISA	34
1.3	JUSTIFICATIVA	39
1.4	OBJETIVOS	42
1.5	METODOLOGIA	42
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	44
2	AQUISIÇÃO DE DADOS PARA DOCUMENTAÇÃO ARQUITETÔNICA.....	47
2.1	O ESTADO DA ARTE EM DOCUMENTAÇÃO ARQUITETÔNICA	47
2.2	FINALIDADES DA DOCUMENTAÇÃO X NÍVEL DE DETALHE	53
2.2.1	Considerações	58
2.3	TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO	59
2.3.1	Medição direta	61
2.3.2	Máquina de Medição de Coordenadas (MMC)	63
2.3.3	Braço articulado	64
2.3.4	Métodos topográficos	65
2.3.5	GNSS	67
2.3.6	Fotogrametria (<i>stricto sensu</i>)	68
2.3.7	<i>Dense Stereo Matching</i>	72
2.3.8	Fotogrametria esférica	75
2.3.9	Videogrametria	78
2.3.10	<i>3D laser scanning</i>	82
2.3.11	Luz estruturada	84
2.3.12	Termografia infravermelho	86
2.3.13	Georradar	88
2.3.14	Radiografia (por raios X e gama)	90
2.3.15	Discussão sobre as técnicas de levantamento	93
2.4	CONSIDERAÇÕES GERAIS	97
3	TECNOLOGIAS PARA CAPTURA DE "NUVENS DE PONTOS"	100
3.1	3D LASER SCANNING	100
3.1.1	Breve histórico	101
3.1.2	Conceitos relacionados à luz laser	103
3.1.3	Princípios básicos de funcionamento do <i>laser scanner</i>	105
3.1.4	Classificação do <i>3D laser scanning</i>	106
3.1.5	Características do <i>3D laser scanning</i> terrestre e aerotransportado	107
3.1.6	Tecnologias de medição: tempo de voo, diferença de fase e triangulação	110
3.1.7	Considerações	115
3.2	VARREDURA POR FOTOGRAFIAS	116
3.2.1	Breve histórico	117

3.2.2	Princípio básico de funcionamento	122
3.2.3	Etapas para geração de "nuvens de pontos"	124
3.2.4	Tomada fotográfica	130
3.2.5	Ferramentas para DSM	132
3.2.5.1	Processamento remoto gratuito via <i>web</i>	133
3.2.5.2	Programas livres gratuitos	134
3.2.5.3	Programas comerciais	135
3.3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	135
4	PROCESSAMENTO DE "NUVENS DE PONTOS"	139
4.1	REPRESENTAÇÃO NUMÉRICA DA FORMA	139
4.1.1	Criação de modelos de arestas	144
4.1.2	Triangulação	146
4.1.3	Instanciação de primitivas geométricas	147
4.1.4	Operações de <i>sweep</i>	149
4.1.5	Modelos gerados por duas ou mais seções	150
4.1.6	Criação de superfícies de formas livres	150
4.1.7	Operações para modificação dos modelos geométricos	152
4.2	ETAPAS DE PROCESSAMENTO DO <i>3D LASER SCANNING</i>	154
4.2.1	Planejamento do levantamento	155
4.2.2	Aquisição dos dados	155
4.2.3	Pré-processamento	157
4.2.4	Processamento	162
4.2.4.1	Segmentação	162
4.2.4.2	Geração de modelo preliminar	163
4.2.4.3	Otimização e edição do modelo preliminar	163
4.2.5	Análise da precisão e exportação dos produtos	165
4.3	FERRAMENTAS PARA MANIPULAÇÃO DE "NUVENS DE PONTOS"	166
4.4	CONSIDERAÇÕES GERAIS	169
5	MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DE EDIFICAÇÕES EXISTENTES.....	172
5.1	MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO	172
5.1.1	Características	174
5.1.2	Níveis de desenvolvimento (LOD)	177
5.1.3	Aplicações do BIM em Arquitetura e Urbanismo	180
5.2	BIM EM EDIFICAÇÕES EXISTENTES	181
5.2.1	Sobre os conceitos de <i>as-built</i> , <i>as-is</i> e HBIM	182
5.2.2	Aplicações do BIM em edificações existentes	183
5.2.3	Aplicações integradas de "nuvens de pontos" e modelos BIM	187
5.3	ASPECTOS METODOLÓGICOS RELACIONADOS AO <i>AS-IS</i> BIM	195
5.3.1	Panorama de processos para geração de modelos <i>AS-IS</i> BIM	196
5.3.2	Discussão sobre as etapas de modelagem BIM a partir de "nuvens de pontos"	201
5.3.3	Níveis de detalhe	203
5.4	CONSIDERAÇÕES GERAIS	208

6	EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DAS FERRAMENTAS	211
6.1	COMPARAÇÃO DE FERRAMENTAS PARA DSM	211
6.1.1	Aquisição de dados em campo	212
6.1.2	Processamento	213
6.1.2.1	Orientação interna e externa	213
6.1.2.2	Geração da "nuvem de pontos" densa	215
6.1.2.3	Geração da malha triangular e operações de otimização da mesma	216
6.1.3	Geração dos produtos e exportação dos arquivos	217
6.1.3.1	Testes de interoperabilidade para exportação dos arquivos	219
6.1.4	Discussão	221
6.2	OBTENÇÃO DE PRODUTOS DERIVADOS DA "NUVEM DE PONTOS"	223
6.2.1	Geração da malha triangular	224
6.2.2	Processamento dos dados no Geomagic Studio	226
6.2.3	Discussão	229
6.3	MODELAGEM BIM ATRAVÉS DE DIFERENTES MODELOS DE REFERÊNCIA	232
6.3.1	Geração dos modelos de referência para modelagem BIM	232
6.3.1.1	Geração da "nuvem de pontos" por DSM	233
6.3.1.2	Geração do modelo de superfícies fotorrealístico por Fotogrametria Digital	235
6.3.2	Modelagem BIM	236
6.3.2.1	Uso da "nuvem de pontos" como referência	236
6.3.2.2	Uso do modelo de superfícies como referência	237
6.3.3	Discussão	239
6.4	AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA MODELAGEM DE FORMAS MAIS COMPLEXAS NO REVIT	240
6.4.1	Comandos típicos para criação de paredes	241
6.4.2	<i>Conceptual massing</i>	244
6.4.2.1	Paredes criadas através de massa conceitual	246
6.4.3	<i>Model In-Place</i>	248
6.4.4	Importação de modelos geométricos	253
6.5	CONSIDERAÇÕES GERAIS	255
7	MODELAGEM BIM DE UMA EDIFICAÇÃO HISTÓRICA.....	257
7.1	BREVE HISTÓRICO DA CAPELA DE NOSSA SENHORA DA ESCADA	257
7.2	DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE LEVANTAMENTO UTILIZADOS	259
7.2.1	Fotogrametria Digital (<i>stricto sensu</i>)	259
7.2.2	Varredura a laser	261
7.2.3	<i>Dense Stereo Matching</i> (DSM)	266
7.3	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE LEVANTAMENTO	267
7.4	MODELAGEM BIM A PARTIR DE MODELOS DE SUPERFÍCIE	271
7.5	MODELAGEM BIM A PARTIR DE "NUVEM DE PONTOS"	276
7.5.1	Procedimentos gerais adotados	277
7.5.2	Modelagem do terreno	280
7.5.3	Diferentes níveis de detalhe adotados	285
7.5.3.1	Nível 1	287
7.5.3.2	Nível 2	289
7.5.3.3	Nível 3	292

7.5.3.4	Nível 4	301
7.5.3.5	Nível 5	310
7.6	DISCUSSÃO	320
7.6.1	Procedimentos para manipulação da "nuvem de pontos"	320
7.6.2	Métodos e técnicas para modelagem de formas complexas	322
7.6.3	Técnicas para aplicação de texturas fotorrealísticas	328
7.6.4	Métodos de levantamento	330
7.6.5	Níveis de detalhe	334
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	337
8.1	CONCLUSÕES	339
8.2	CONTRIBUIÇÕES	343
8.3	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	343
	REFERÊNCIAS	346
	APÊNDICES	360

Capítulo 1

Introdução

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, tem-se presenciado a acelerada deterioração e destruição crescente do patrimônio arquitetônico brasileiro. Há uma série de fatores que influenciam e levam a essa situação: a especulação imobiliária, o crescimento urbano desordenado, as bruscas mudanças socioculturais, os novos modos de vida, a falta de reconhecimento do valor do imóvel, seja estético ou histórico-cultural, além da edificação estar sujeita a acidentes de todos os tipos e a degradação natural dos materiais, acelerada pelo clima tropical (quente e úmido) que favorece a proliferação de agentes biodegradantes e químicos.

Um grande problema é que a maior parte desse patrimônio não dispõe de registro preciso e detalhado. Além de permitir a preservação da memória, a documentação arquitetônica constitui-se em instrumento básico para a realização de uma série de ações sobre o patrimônio edificado.

Os processos tradicionais de documentação do patrimônio arquitetônico - incluindo as técnicas de medição direta e o uso de fotografia documental para o levantamento dos dados, bem como a utilização de editores de desenho para a produção de plantas baixas, cortes e elevações - possuem limitações, especialmente quando se trata de edificações históricas que apresentam, geralmente, formas mais complexas e irregulares. Além disso, dado ao mal estado de conservação em que se encontram algumas edificações, é comum a instabilidade estrutural e a presença de vários tipos de danos que precisam ser documentados com precisão, com o mínimo contato direto do levantador com a edificação, preservando-o de eventuais acidentes.

Os problemas decorrentes do uso de técnicas tradicionais tornam o processo de documentação moroso, de custo elevado, pouco preciso e muitas vezes inadequado ao registro de formas complexas e/ou de grandes dimensões. É comum haver ambiguidades e inconsistências nos registros dos objetos, uma vez que os desenhos são elaborados individualmente em ferramentas CAD convencionais, sendo necessária uma conferência minuciosa entre eles, de modo a eliminar (ou reduzir) erros de representação.

Nas últimas décadas, foram realizados grandes avanços relacionados às tecnologias para aquisição de dados tridimensionais, ferramentas para processamento, visualização,

gerenciamento e disseminação de dados, visando o desenvolvimento de sistemas de informações cada vez mais complexos.

Há uma busca crescente por representações tridimensionais dos objetos em vários segmentos da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO), incluindo a área de documentação e preservação do patrimônio cultural. O uso desses recursos torna-se cada vez mais viável, pela introdução e desenvolvimento de novas ferramentas e métodos para gerar modelos geométricos de elevada qualidade.

Os modelos geométricos (3D) apresentam grandes vantagens em relação às representações bidimensionais, uma vez que permitem uma comunicação mais efetiva sobre o aspecto físico de como se encontra a edificação, com suas deformações e patologias, através de uma interface mais intuitiva, rápida e atraente. Dependendo da tecnologia utilizada, possibilita ainda, a obtenção de outros tipos de informações que vão além da geometria, como, dados históricos, estado de conservação, materiais e técnicas construtivas adotadas, etc. Além disso, a interatividade na visualização tridimensional permite que os modelos sejam vistos sob os mais variados ângulos, analisados em detalhe e organizados segundo algumas regras semânticas (MANFERDINI; REMONDINO, 2012).

Perseguindo a ideia de dotar o modelo geométrico de atributos semânticos, de modo a se obter uma representação integral e fidedigna da construção, o paradigma BIM (*Building Information Modeling*) vem evoluindo para descrever os componentes da edificação, levando em consideração as informações geométricas, topológicas, semânticas e gráficas. Apesar desse paradigma vir sendo adotado predominantemente nas fases de projeto e construção de novas edificações, verifica-se o interesse crescente pela utilização de modelos BIM para representar estruturas existentes, visando dar suporte a uma série de ações posteriores à construção, como base para o desenvolvimento de projetos de intervenção (reformas, restaurações, demolições), bem como para a operação e manutenção (*Facility Management* - FM) dessas edificações.

Uma questão importante no emprego do paradigma BIM para representar e gerenciar edificações existentes está relacionada ao modo como as informações geométricas (formas e dimensões) podem ser capturadas e introduzidas em uma ferramenta para a geração do modelo BIM (GROETELAARS; AMORIM, 2012b). No processo mais usual de produção de

modelos BIM a partir de edificações existentes, utilizam-se as formas e as dimensões dos objetos (geralmente obtidas através de medição direta) representadas em plantas, cortes e elevações, como referência para a modelagem paramétrica¹ dos elementos construtivos.

A grande desvantagem dessa forma de criação de modelos BIM está relacionada às limitações das representações bidimensionais, que podem gerar perda de informações, principalmente quando se trata de formas curvas, esconsas e irregulares, que nem sempre podem ser representadas em verdadeira grandeza (VG) em desenhos. Além disso, envolve um processo de dupla modelagem - inicialmente, a representação através de desenho (2D) e, em seguida, a modelagem geométrica (3D) - o que torna o processo mais lento, caro e menos preciso (GROETELAARS; AMORIM, 2012b).

Uma forma de contornar os problemas de perda de informação e precisão decorrentes da representação 2D, é o uso de sistemas capazes de capturar com precisão as informações tridimensionais. Dentre os principais métodos para aquisição de dados espaciais (3D) necessários à construção de modelos BIM, as técnicas de Fotogrametria Digital e os sistemas de varredura - *3D Laser Scanning* e *Dense Stereo Matching* (DSM) - apresentam grandes potencialidades para a documentação precisa e detalhada do patrimônio arquitetônico. É nesse contexto em que se enquadra essa pesquisa.

A principal suposição que norteia este trabalho é que a utilização integrada dos sistemas de captura de "nuvens de pontos" com a tecnologia BIM traz grandes benefícios para o levantamento e a representação de edificações existentes, permitindo superar muitas limitações dos processos tradicionais de documentação arquitetônica.

Para a confirmação dessa hipótese de forma consistente é necessário o estudo aprofundado em três grandes eixos, considerando tanto os aspectos conceituais (fundamentos teóricos) como operacionais (experimentos práticos e estudos de caso): (1) aquisição de dados através dos sistemas de varredura, (2) processamento das "nuvens de pontos" para geração de diversos produtos, (3) modelagem BIM de edificações existentes. A partir do embasamento teórico sobre a temática e da apreensão/experimentação de diferentes

¹ Esse assunto será abordado nos capítulos 5 e 6.

ferramentas é possível testar processos e avaliar os resultados para a proposição de métodos de trabalho para documentação arquitetônica, com uso integrado das tecnologias.

O foco da pesquisa é o estudo e a experimentação de ferramenta BIM para a modelagem das informações geométricas dos elementos construtivos de edificações existentes, utilizando diferentes:

- técnicas de levantamento, em especial *3D Laser Scanning* e DSM;
- ferramentas computacionais, para geração de "nuvens de pontos" por fotografias, processamento do modelo de "nuvens de pontos" de formas complexas, modelagem geométrica de sólidos e modelagem BIM;
- métodos de trabalho e técnicas de modelagem.

1.1 ANTECEDENTES

Durante o mestrado realizado no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPG-AU) da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia (FAUFBA), desenvolvemos um estudo sobre o uso da Fotogrametria Digital na documentação de formas arquitetônicas e urbanísticas. As vantagens de utilização das técnicas fotogramétricas digitais para o levantamento de formas arquitetônicas puderam ser comprovadas a partir de estudos de caso realizados através do *software* PhotoModeler. Os experimentos práticos permitiram testar técnicas de restituição, desenvolver métodos e técnicas de trabalho, sugerir procedimentos com base na experiência adquirida, avaliar a precisão dos resultados e analisar as limitações da ferramenta utilizada.

Vimos também que, com a utilização de recursos de fácil acesso e baixo custo, foi possível restituir com precisão diversos tipos de objetos – detalhes arquitetônicos, edificações e conjuntos de fachadas - de diferentes tamanhos e níveis de complexidade, e obter uma série de produtos - ortofotos, desenhos e modelos geométricos fotorrealísticos.

Apesar de todas as vantagens oferecidas pela Fotogrametria Digital (*stricto sensu*²), verificou-se que a técnica "restituição a partir de fotos convergentes" era mais adequada para o

² O termo "Fotogrametria *stricto sensu*" é utilizado nesta tese para se referir às técnicas mais tradicionais da restituição fotogramétrica digital, desenvolvidas há mais tempo e que requeriam maior interação do operador, não incluindo, portanto, os processos mais automatizados de geração de "nuvens de pontos" por fotografias (*Dense Stereo Matching* - DSM). A distinção entre essas duas técnicas é descrita em mais detalhe nas seções 2.3.6 e 2.3.7.

cadastramento de objetos que apresentam formas poliédricas e/ou pontos de fácil identificação.

Identificou-se no final da pesquisa, a necessidade de estudo e realização de experimentos contemplando as técnicas de captura de "nuvem de pontos"³ (*point cloud*) para a obtenção rápida, detalhada e precisa de uma grande quantidade de informações em formas complexas, curvas e em relevo (esculturas, detalhes arquitetônicos, etc.). Assim, houve a motivação para o estudo e experimentação de técnicas digitais ainda mais recentes, como a captura de "nuvem de pontos" pelo equipamento *3D laser scanner* e por fotografias (técnica mais conhecida como *Dense Stereo Matching - DSM*) integradas com a tecnologia BIM, visando contemplar as etapas de levantamento, processamento e representação de edificações existentes, especialmente as de interesse histórico-cultural.

A partir da fundamentação teórica sobre o tema, e dos processos e métodos apontados nos experimentos, pretende-se contribuir para a difusão dessas tecnologias visando sua adoção nas instituições ligadas à preservação do patrimônio arquitetônico, no ensino de graduação e pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo e no setor da construção civil, especialmente para profissionais envolvidos em projetos de intervenção em edificações existentes (de valor histórico-cultural ou não).

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E DO PROBLEMA DA PESQUISA

O processo de documentação é uma importante atividade que acompanha todas as mudanças das edificações, incluindo operações de manutenção, projetos de reforma, renovação e restauração. O registro é a base para as tomadas de decisões e deve ser realizado antes de qualquer mudança, mesmo as imprevistas e indesejadas, como acidentes, incêndios ou enchentes (LETELLIER, 2007).

A documentação não se constitui em uma operação estanque e segmentada que se encerra com o levantamento rigoroso da geometria da edificação existente, na condição em que foi encontrada (*as found*) ou construída (*as built*). Ela deve permitir atualizações, na medida em que são encontradas novas informações, muitas vezes, durante a obra de intervenção.

³ "Nuvem de pontos" é o termo usado em português para se referir ao modelo de pontos (*point cloud*), produto primário gerado pelos sistemas de varredura (a laser ou por fotografias). Cada ponto, que forma a "nuvem de pontos", é representado por suas coordenadas cartesianas (x, y, e z) e um ou mais atributos associados ao mesmo.

O uso de tecnologias digitais para documentação arquitetônica cresce a cada dia, permitindo superar muitas limitações das técnicas tradicionais e criar novas formas de registro, inventariação, conservação, restauração e apresentação do patrimônio cultural. As vantagens das técnicas digitais incluem: maior precisão na coleta e registro dos dados, flexibilidade na geração dos produtos, facilidade de armazenamento, difusão e atualização da informação (NOGUEIRA, 2010).

As tecnologias de registro permitem aumentar o nível de detalhe adquirido em campo e tornar a análise de dados mais completa e consistente (DUTESCU, 2006). Além disso, as novas possibilidades de integração das informações evitam erros e inconsistências de informações e facilitam a disponibilização e o compartilhamento dos dados para diversos profissionais e usuários.

Com relação às vantagens das técnicas digitais na fase de coleta de dados, em especial, a captura de "nuvem de pontos", pode-se citar:

- obtenção automática de grande quantidade de dados;
- tempo reduzido de trabalho em campo;
- precisão, que pode variar do submilímetro ao centímetro, dependendo do tipo de equipamento e de sua distância ao objeto quando da captura de dados;
- operação simples e flexível, bastando um operador para posicionar e operar o equipamento;
- versatilidade de formas que podem ser levantadas: pequenas, grandes, simples ou complexas;
- possibilidade de estudo e documentação de objetos deformáveis, frágeis e de difícil acesso, uma vez que não é necessário contato direto com o objeto a ser levantado.

Os sistemas de varredura (a laser ou por fotografias) para captura de "nuvens de pontos" representam o estado da arte das técnicas de cadastramento, e sua utilização é de fundamental importância para o levantamento rápido, preciso e detalhado, não somente do patrimônio arquitetônico, como também de edificações e ambientes urbanos comuns.

As ferramentas CAD-BIM representam o que há de mais novo em termos de programas orientados ao projeto e à representação de edificações. Apesar dos primeiros estudos

datarem da década de 1970, a oferta de aplicativos aumentou significativamente nos últimos anos, juntamente com sua adoção por profissionais do segmento das áreas de Arquitetura, Engenharia e Construção (CHECCUCCI; AMORIM, 2008).

O uso da tecnologia BIM nas etapas finais do processo de documentação amplia as possibilidades e aplicações dos dados levantados sobre as edificações, uma vez que permite auxiliar:

- a geração de produtos mais completos, precisos e sem ambiguidades, devido à centralização dos dados em um modelo único;
- a produção de desenhos, uma vez que plantas baixas, cortes, fachadas e perspectivas são geradas automaticamente a partir do modelo geométrico tridimensional, pela definição da posição do observador ou do plano de corte;
- o levantamento de quantitativos e a execução de orçamentos, facilitando a identificação de prioridades e definição de estratégias para alocação de recursos financeiros;
- o estabelecimento de uma base de dados confiáveis para dar suporte ao desenvolvimento de projetos de intervenção (reforma, restauração, requalificação, etc.), facilitado também pela visualização tridimensional da edificação e de suas diversas alternativas de projeto;
- a verificação de interferências, de conflitos entre elementos arquitetônicos, estruturais e mecânicos, evitando erros de representação da situação existente e de propostas de intervenção;
- a análise do comportamento e desempenho da edificação durante seu ciclo de vida, facilitando o desenvolvimento de ações visando o uso sustentável da mesma;
- o compartilhamento dos dados e o trabalho colaborativo;
- a realização de análises e simulações (de estrutura, eficiência energética, desempenho térmico e acústico, iluminação natural e artificial, etc.) e a disseminação das informações registradas, na medida em que o modelo pode ser exportado para outros programas (inclusive sistemas disponíveis na *web*) para ser manipulado, visualizado e gerenciado.

A partir da revisão bibliográfica sobre o tema desta pesquisa, pode-se identificar o estágio atual em que se encontra a documentação arquitetônica e vislumbrar as potencialidades do uso das referidas tecnologias. Há um emprego crescente e bem sedimentado de técnicas digitais para o levantamento arquitetônico, principalmente nos países desenvolvidos, o que pode ser visto nas publicações das agências internacionais relacionadas à Documentação e Conservação de Monumentos e Sítios Históricos:

- *CIPA Heritage Documentation*⁴;
- ISPRS - *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*;
- ICOMOS - *International Council on Monuments and Sites*;
- *English Heritage*.

Pode-se citar alguns artigos que descrevem experimentos realizados com o uso da tecnologia *3D Laser Scanning* (BOEHLER; HEINZ; MARBS, 2001; WUTKE, 2008; ABDELHAFIZ, 2009) e outros, em menor quantidade, publicados mais recentemente, que descrevem levantamentos com a técnica de capturar "nuvem de pontos" das fotografias (HULLO; GRUSSENMEYER; FARES, 2009; TOLA; STRECHA; FUA, 2011; ORENI et al., 2014).

A tecnologia BIM tem sido objeto de discussões e pesquisas recentes, como se pode observar em fóruns internacionais como ACADIA (*Association for Computer Aided Design in Architecture*), ECAADe (*Education in Computer Aided Architectural Design in Europe*), SiGraDi (*Sociedade Ibero Americana de Gráfica Digital*) e CAADRIA (*Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*) e revistas internacionais como *Automation in Construction*. Através das discussões em eventos internacionais, pode-se perceber que essas tecnologias são temas de grande relevância e têm despertando interesse na área da construção civil, da documentação do patrimônio e da eficiência energética. No entanto, verifica-se que essas tecnologias, captura de "nuvem de pontos" e BIM, geralmente são tratadas de forma isolada, a primeira, mais em eventos voltados à documentação do patrimônio e a segunda, em eventos ligados à construção civil e à projeção arquitetônica com tecnologias computacionais.

⁴ CIPA é um dos mais antigos comitês científicos do ICOMOS, fundado juntamente com o ISPRS, em 1968. A sigla CIPA significava originalmente *Comité International de Photogrammétrie Architecturale*, mas foi alterada para *CIPA Heritage Documentation*, para melhor descrever as atividades atualmente realizadas. Maiores informações em: <http://cipa.icomos.org>.

Observa-se que não há estudos consistentes e detalhados sobre a utilização da tecnologia BIM para a documentação de edificações existentes (mais usada em situação de projeto), muito menos sobre seu uso integrado com as técnicas de captura de "nuvem de pontos".

Apesar das vantagens da utilização das "nuvens de pontos", observou-se que, na grande maioria dos artigos pesquisados, esse tipo de modelo é pouco utilizado, e quando disponível, é usado de modo indireto ou subutilizado. É comum a importação da "nuvem de pontos" em ferramentas CAD tradicionais e sua utilização como referência para geração de desenhos, para conferência de informações de registros já existentes e/ou para modelagem de trechos mais complexos da edificação.

As maiores dificuldades encontradas na literatura referem-se a: modelagem de formas irregulares através das ferramentas BIM, perda de dados na importação de objetos gerados em outros programas, determinação do nível de detalhe adequado do modelo e falta de famílias de componentes adequados às edificações existentes, especialmente as históricas.

Nesse contexto, podem ser identificadas diversas questões que devem ser compreendidas ou solucionadas, através de estudos consistentes e de experimentos com uso dessas tecnologias:

- Como associar os elementos construtivos de edificações existentes com as famílias de componentes construtivos disponíveis em ferramentas BIM, geralmente usadas na fase de projeto?
- Qual é o grau de simplificação aceitável nos modelos, uma vez que as edificações existentes apresentam uma série de irregularidades (como paredes fora do prumo e do esquadro, "barrigas") e diferenças entre os elementos repetitivos (pequenas variações de medidas de esquadrias, seções de pilares etc.)?
- Quais informações devem ser acrescentadas ao modelo BIM? E como devem ser inseridas e armazenadas?
- Quais são as características, especificidades e metodologias de trabalho para o levantamento de formas arquitetônicas a partir da captura de "nuvens de pontos"?

- Como transformar o modelo de "nuvens de pontos" em modelos BIM? Quais etapas são mais adequadas para a realização desse fluxo (*workflow*), evitando perda de informações, retrabalho e garantindo a confiabilidade e qualidade dos dados?

Verifica-se a necessidade de estudos aprofundados das tecnologias, a realização de testes e o desenvolvimento de métodos de trabalho, envolvendo desde as fases iniciais de aquisição de dados, até as fases de processamento e gerenciamento das informações, visando obter um processo de documentação mais eficaz e de maior qualidade.

1.3 JUSTIFICATIVA

A necessidade crescente de documentação arquitetônica para os mais variados usos, seja para edifícios mais novos ou para os históricos de interesse cultural, a busca de registros precisos e rápidos, aliada ao desenvolvimento de recursos computacionais, leva diversos profissionais do setor de AECO e conservação do patrimônio à busca de métodos e ferramentas cada vez mais eficientes e eficazes nas tarefas de aquisição, processamento, armazenamento, gerenciamento e disponibilização das informações.

Segundo Bennett (2009), verifica-se atualmente nos países mais desenvolvidos, um processo de desaceleração da construção de novas edificações e um aumento na realização de intervenções em edificações existentes, visando a adaptação de estruturas antigas para novos usos, a adoção de soluções mais sustentáveis e com menor consumo de energia.

A existência de informações precisas das edificações representa um componente vital para todo o processo de planejamento nesta área. A integração dos sistemas de captura de "nuvem de pontos" e da tecnologia BIM parece ser um processo promissor.

A documentação do patrimônio arquitetônico geralmente é uma tarefa mais complexa do que a realizada para outras aplicações, devido à variedade de tipos e tamanhos de objetos a serem registrados, dos diferentes requisitos de qualidade e de resolução. A escolha das tecnologias (*hardware* e *software*), a determinação dos procedimentos e fluxos de trabalho adequados e a certificação de que os produtos finais estão de acordo com as especificações técnicas representa um grande desafio na documentação do patrimônio (PATIAS; QUINTERO, 2011).

O atual momento mostra-se favorável ao desenvolvimento de métodos e técnicas mais eficientes para a documentação arquitetônica:

- a) Recursos tecnológicos disponíveis atualmente a custos decrescentes - computadores com alto desempenho, câmeras digitais de alta resolução, *scanners* rápidos e precisos, grande capacidade de armazenamento dos dados.
- b) Existência de programas computacionais para variada gama de aplicações, dotados de processamento cada vez mais automatizado (diminuindo a interação humana) para a criação de vários tipos de produtos, com diversas possibilidades de visualização, análise e simulação.
- c) Necessidade crescente de documentação do patrimônio arquitetônico, visando atender aos programas de conservação e preservação de sítios e monumentos históricos, para diversas finalidades, como: possibilitar a manutenção das edificações e o desenvolvimento de projetos de restauração e requalificação.
- d) Necessidade crescente de estudos sobre edificações existentes “comuns”, para a realização de simulações e intervenções diversas, principalmente visando o desenvolvimento de soluções “sustentáveis”, e possibilitando a redução do consumo de energia e os custos de construção e manutenção.

Apesar dos recursos tecnológicos (*hardware* e *software*) e da grande demanda por levantamento e representação das edificações existentes, os institutos ligados à preservação do patrimônio no Brasil (como o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN e o Instituto do Patrimônio Artístico e Cultural da Bahia - IPAC) não utilizam, de forma efetiva, as modernas técnicas de aquisição de dados (Fotogrametria Digital e captura de "nuvem de pontos"). Esses processos são mais usados na área industrial ou desenvolvidos em pesquisas realizadas em algumas universidades públicas brasileiras (como UFBA, UNICAMP, UFPR e UFSC). Ainda predominam as técnicas tradicionais de levantamento, como medição direta, métodos topográficos e uso de fotografias (sem as correções adequadas), e os métodos tradicionais de representação, através de desenhos ou modelos geométricos gerados em ferramentas CAD (GROETELAARS; AMORIM, 2011a).

Os tradicionais modelos geométricos construídos em ferramentas CAD genéricas representam a forma da edificação através de primitivos bi ou tridimensionais (como linhas,

prismas, cilindros, esferas, etc.), objetos abstratos que não têm relação direta com os elementos da construção. Os desenhos são criados separadamente, em diferentes momentos e por diversas pessoas, onde são comuns as ambiguidades e inconsistências da documentação.

A utilização de modelos BIM para representação e gerenciamento das edificações existentes representa um grande avanço em relação aos métodos tradicionais de documentação arquitetônica, permitindo o armazenamento centralizado de diversas informações (produzidas por diferentes profissionais), facilitando o acesso, utilização, modificação e atualização dos dados, e a geração automática de diversos produtos.

O grande problema da modelagem BIM de edificações existentes está relacionado às etapas de aquisição e processamento dos dados. Os sistemas de varredura permitem o levantamento de grande quantidade de informação de modo rápido e preciso. No entanto, a geração do modelo BIM (de edificações existentes, especialmente as históricas) requer o estudo de diferentes programas, a realização de testes de interoperabilidade entre os mesmos (evitando perda de informações), a experimentação e a proposição de métodos e técnicas associadas às finalidades ou características específicas do modelo.

Nesse contexto, pode-se citar as seguintes justificativas para a realização desta pesquisa:

- a integração dos sistemas de varredura e da tecnologia BIM representam um novo paradigma para a indústria da construção civil e para a documentação do patrimônio arquitetônico, envolvendo a complexidade de conceitos e os métodos de trabalho, que precisam ser investigados e documentados de modo consistente;
- apesar das potencialidades dessas tecnologias para a documentação arquitetônica, seu uso integrado ainda é pouco difundido e utilizado internacionalmente;
- observa-se nos poucos exemplos encontrados, problemas para modelagem de formas complexas e irregulares, levando, geralmente, a uma simplificação excessiva do modelo.

A escolha do foco a ser trabalhado justifica-se em decorrência da falta de pesquisas consolidadas que tratem do tema, e pela necessidade de estudos dessa natureza para

melhorar o entendimento do potencial dessas tecnologias para as diversas aplicações em documentação arquitetônica.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é estudar as potencialidades do uso de "nuvens de pontos" (produzidas pela varredura a laser e DSM) para a geração de modelos BIM de edificações existentes, visando a proposição de métodos e técnicas para a documentação arquitetônica em diferentes escalas e níveis de detalhamento. Essa proposição é alcançada a partir da realização dos seguintes objetivos específicos:

- estudar os princípios e fundamentos das técnicas de captura de "nuvens de pontos", através do *3D Laser Scanning* e *Dense Stereo Matching (DSM)*;
- apreender e testar ferramentas para geração de "nuvens de pontos" por fotografias (DSM);
- apreender e testar ferramentas para processamento de "nuvem de pontos";
- estudar aspectos teóricos envolvendo a tecnologia BIM e suas aplicações na documentação arquitetônica;
- realizar levantamento arquitetônico completo de edificação histórica com uso dos sistemas de varredura para testar metodologias de trabalho e avaliar os resultados obtidos;
- apreender e utilizar uma ferramenta CAD/BIM para documentação de edificação histórica, testando diversos métodos para modelagem, o uso de diferentes níveis de detalhe e técnicas de levantamento;
- divulgar os resultados da pesquisa, em eventos da área e contribuir para a formação de pessoal técnico especializado na utilização integrada das mais modernas técnicas de levantamento (Fotogrametria Digital e de captura de "nuvens de pontos") e da tecnologia BIM.

1.5 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida através da revisão bibliográfica sobre o conjunto de assuntos contidos no tema, do estudo e apreensão de diferentes ferramentas, e da realização de experimentos práticos. As etapas realizadas estão descritas a seguir.

a) Conhecimento dos fundamentos e estado da arte das tecnologias

- pesquisa sobre documentação arquitetônica, conceituação, finalidade, nível de detalhe;
- pesquisa sobre o estado da arte em técnicas digitais de levantamento cadastral, contextualizando os sistemas de varredura e a Fotogrametria Digital;
- estudo do *3D Laser Scanning*, conceitos, evolução, princípios de funcionamento, classificação e características das diferentes tecnologias;
- revisão bibliográfica sobre a técnica de captura de "nuvem de pontos" a partir de fotografias (*Dense Stereo Matching* - DSM), evolução, etapas para geração dos modelos, ferramentas para DSM;
- pesquisa de exemplos de aplicações dos modelos de "nuvens de pontos" em Arquitetura e Urbanismo;
- estudo sobre os diversos tipos de modelos geométricos que podem ser obtidos através das "nuvens de pontos", incluindo ferramentas e processos;
- pesquisa sobre a tecnologia BIM, aspectos teóricos e metodologias aplicadas visando a documentação arquitetônica.

b) Estudo de diferentes ferramentas computacionais

- estudo de diferentes ferramentas para DSM, visando a comparação de processos e resultados;
- estudo de programas para processamento da "nuvem de pontos", verificando os procedimentos e analisando a qualidade e os tipos de produtos gerados;
- estudo de ferramenta CAD/BIM.

c) Realização de experimentos práticos com ferramentas selecionadas

- geração de "nuvens de pontos" por fotografias de pequenos objetos, para análise comparativa dos processos e dos produtos gerados por diferentes ferramentas para DSM;
- obtenção de produtos derivados da "nuvem de pontos", a partir da utilização de programa específico para processamento desse tipo de modelo;

- criação do modelo BIM de uma edificação da FAUFBA, a partir de produtos gerados por Fotogrametria Digital (*stricto sensu*) e por DSM, para comparação de processos e avaliação da precisão dos resultados;
- avaliação de métodos de modelagem mais complexa no Revit.

d) Estudo de caso: modelagem BIM de edificação histórica em diferentes níveis de detalhe

- modelagem BIM de uma edificação histórica a partir de diferentes técnicas de levantamento (varredura a laser, DSM, Fotogrametria Digital e medição direta), com uso de diferentes métodos de modelagem e níveis de detalhamento, visando a avaliação dos produtos e processos utilizados;
- uso integrado de diferentes programas e estudos de interoperabilidade entre formatos de arquivos;
- análise dos produtos obtidos (qualidade, características e possíveis aplicações);
- proposição de métodos e técnicas de trabalho associadas às finalidades e características específicas do modelo;
- discussão sobre as potencialidades e limitações dessas tecnologias para documentação arquitetônica.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O conteúdo desta tese está distribuído em oito capítulos, descritos sumariamente a seguir.

O capítulo 1 – **Introdução** - faz uma abordagem inicial sobre o tema, apresenta as justificativas, os objetivos e a metodologia de trabalho utilizada nesse trabalho.

O capítulo 2 – **Aquisição de dados para documentação arquitetônica** - trata do estado da arte em documentação arquitetônica, aborda diferentes classificações de nível de detalhe, relacionando-os com a finalidade de documentação, apresenta e discute as mais modernas técnicas de levantamento arquitetônico.

O capítulo 3 – **Tecnologias para captura de "nuvens de pontos"** - aborda as tecnologias *3D laser scanning* e varredura por fotografias (*Dense Stereo Matching*), incluindo o histórico, os princípios de funcionamento, além de uma série características específicas de cada técnica.

O capítulo 4 – **Processamento de "nuvens de pontos"** - apresenta os diferentes tipos de modelos geométricos que podem ser obtidos a partir do processamento de "nuvens de pontos", descreve as diversas etapas de um levantamento por varredura a laser e as principais ferramentas computacionais relacionadas a diferentes fases e produtos.

O capítulo 5 – **Modelagem da informação de edificações existentes** - aborda aspectos conceituais do paradigma BIM, suas características, os níveis de desenvolvimento, traça um panorama das aplicações do BIM em Arquitetura e Urbanismo, especialmente os exemplos internacionais do uso integrado do modelo de "nuvens de pontos" e BIM, e discute aspectos metodológicos sobre a geração de modelos BIM de edificações existentes.

O capítulo 6 – **Experimentação e análise das ferramentas** - descreve alguns experimentos realizados para demonstrar os recursos e processos de trabalho em diferentes ferramentas: programas para DSM, processadores de "nuvens de pontos" e ferramenta BIM, de modo a permitir a análise de fluxos de trabalho e produtos gerados.

O capítulo 7 – **Estudo de caso: modelagem BIM de edificação histórica** - modelagem BIM da Capela de Nossa Senhora da Escada com base em "nuvens de pontos", visando a proposição de métodos e processos adequados a diferentes situações, como características/dimensões do objeto, usos potenciais do modelo e diferentes níveis de detalhamento.

O capítulo 8 – **Considerações finais** - finaliza com as conclusões sobre os métodos e as tecnologias utilizadas, analisa as potencialidades e limitações das técnicas para geração de "nuvens de pontos" e para produção de modelos BIM de edificações existentes, e aponta possíveis desdobramentos para o trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Aquisição de dados para documentação arquitetônica

2 AQUISIÇÃO DE DADOS PARA DOCUMENTAÇÃO ARQUITETÔNICA

Este capítulo inicia-se com a abordagem sobre o estado da arte em documentação arquitetônica e diferentes classificações de nível de detalhe relacionadas com a finalidade de documentação. Na sequência, são apresentadas e discutidas diversas técnicas de levantamento arquitetônico além dos sistemas de varredura e da Fotogrametria Digital. Depois, são abordadas algumas técnicas não destrutivas para aquisição de informações ocultas (não visíveis) às superfícies dos objetos, e ao final é realizada uma análise e discussão sobre os métodos de levantamento apresentados.

2.1 O ESTADO DA ARTE EM DOCUMENTAÇÃO ARQUITETÔNICA

O conceito de documentação arquitetônica esteve durante muito tempo ligado ao cadastro (ou levantamento métrico), que compreende a rigorosa e detalhada representação gráfica das características físicas e geométricas da edificação, do terreno e dos demais elementos físicos presentes na área a ser levantada (NOGUEIRA, 2010).

Segundo Oliveira (2008, p. 13), o registro iconográfico já é, por si só, um instrumento para a preservação da memória:

Nesse caso, desaparecido o objeto que testemunha o nosso passado, a sua imagem pode substituir, embora parcialmente, a necessidade imanente à natureza humana de manter contato com o que se foi. Daí uma das várias utilidades das representações cadastrais como forma de preservação da memória.

Além do valor simbólico, documental e afetivo, o cadastro preciso é instrumento imprescindível para diversas aplicações de uma edificação de interesse cultural, servindo como base para elaboração de projeto de intervenção, para o estudo mais detalhado de sua evolução histórica e para avaliação das deformações estruturais (OLIVEIRA, 2008).

Segundo Letellier (2007), a documentação constitui um processo de obtenção de maior conhecimento da edificação, sendo uma importante atividade que deve:

- preceder a mudanças não planejadas, como acidentes, desastres naturais (terremotos, enchentes, etc.) ou conflitos armados;
- acompanhar e dar suporte às operações de monitoramento, manutenção, conservação, restauração ou mesmo adaptação para novos usos;
- ser atualizada em função das alterações realizadas/sofridas na edificação.

Segundo Amorim (2008, p. 3), a definição atual de documentação arquitetônica extrapola as atividades de aquisição e arquivamento de dados, passando a ser entendida como um sistema mais amplo:

[...] como o processo sistemático de aquisição, tratamento, indexação, armazenamento, recuperação, disponibilização e divulgação de dados e informações, gráficas e não gráficas, sobre as edificações e os sítios onde estão inseridas, para os mais variados usos.

O projeto de documentação pode ser dividido em cinco grandes etapas, descritas abaixo (AMORIM, 2011):

- a) Planejamento** – definição dos objetivos e recursos a serem adotados;
- b) Aquisição de dados** – captura de dados primários em campo e compilação de fontes secundárias;
- c) Processamento dos dados** – tratamento, análise e manipulação das informações para geração dos produtos desejados;
- d) Gerenciamento dos dados** – indexação, armazenamento, recuperação, disponibilização e publicação dos dados e informações produzidas;
- e) Controle e documentação dos processos** – análise de diversos aspectos do projeto de documentação implementado, como os procedimentos e recursos adotados e a qualidade dos produtos gerados.

O processo de **planejamento** inclui a definição da finalidade da documentação, dos recursos disponíveis (captação e gestão), dos prazos e dos produtos requeridos. Estes aspectos permitem determinar as tecnologias e metodologias de trabalho a serem empregadas⁵, em função do nível de detalhe, das características e da precisão dos resultados.

A fase de **aquisição de dados** visa extrair das edificações as informações relativas às características físicas (como formas geométricas, dimensões, materiais construtivos e estado de conservação), sua relação com o entorno, os aspectos históricos, culturais, sociais, dentre outros, através da captura de dados primários (em campo) e secundários (a partir de fontes documentais). Para obtenção das características físicas das edificações, devem ser utilizados alguns métodos de levantamento arquitetônico, dentre os mais adequados pode-se citar: a medição direta, os métodos topográficos, o *Global Navigation Satellite System* -

⁵ Essa etapa permite determinar, inclusive, se é relevante ou necessária a utilização dos sistemas de varredura e/ou da ferramenta BIM. Essas questões serão abordadas em mais detalhe nos capítulos 7 e 8.

GNSS (ou Sistema de Navegação Global por Satélite), a Fotogrametria Digital e os métodos de captura e representação da forma por "nuvem de pontos" (DSM e varredura a laser).

As técnicas fotogramétricas digitais, incluindo a obtenção de "nuvens de pontos", seja por imagens fotográficas ou por varredura a laser, representam o estado da arte com relação à aquisição de dados geométricos das edificações. Essas técnicas têm permitido o levantamento de grande quantidade de informações, de modo mais preciso e rápido se comparado com os métodos tradicionais. Melhores resultados geralmente são obtidos quando há a integração de diferentes técnicas e plataformas (terrestres e aerotransportadas), principalmente quando se trata de objetos complexos e quando são requeridos diferentes níveis de detalhe. Além da aquisição de dados referentes às formas geométricas externas das edificações, é possível a utilização de métodos não destrutivos e indiretos de aquisição de informações ocultas às superfícies dos objetos (como elementos estruturais, tubulações, etc.), dentre os quais se destacam a Termografia Infravermelho, o Georradar (*Ground Penetration Radar - GPR*) e a Radiografia (por raios X ou raios gama).

Finda a etapa de aquisição, tem-se o **processamento dos dados**, ou ainda, o tratamento, a análise e a manipulação dos mesmos, para se obter os produtos requeridos, juntamente com seus metadados. Os produtos tradicionais da documentação arquitetônica são os desenhos (plantas baixas, cortes, fachadas, seções e detalhes) e os modelos geométricos (3D) produzidos através de ferramentas CAD ou modeladores geométricos.

Um bom exemplo de modelo geométrico completo (interior e exterior), preciso e fotorrealístico gerado a partir do processamento de dados obtidos por diferentes técnicas pode ser visto na Figura 1. Segundo Voltolini e colaboradores (2007), para geração do modelo geométrico do Castelo Valer, em Trento, na Itália, foram utilizadas a fotogrametria digital (terrestre e aérea), o *3D laser scanning* terrestre, métodos topográficos (estação total) e GNSS.

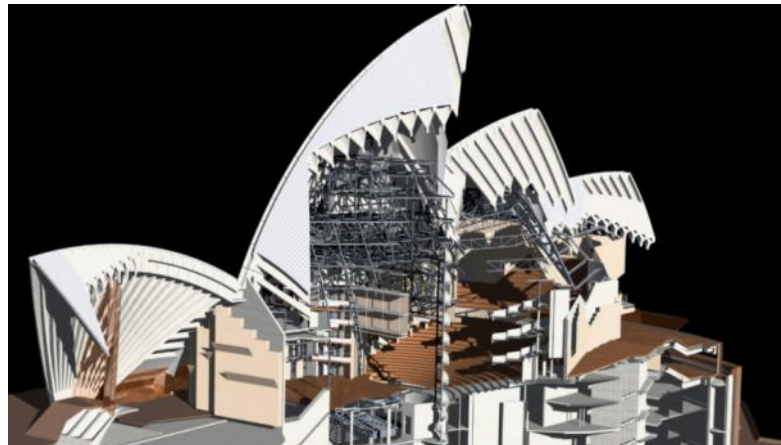
Figura 1 - Modelo geométrico fotorrealístico (interior e exterior) do Castelo Valer na Itália, gerado a partir da integração dos métodos fotogramétricos e da varredura a laser



Fonte: Voltolini e colaboradores (2007).

No entanto, o paradigma BIM representa uma evolução do modelo geométrico (modelo CAD tradicional), tendo o potencial de tornar a documentação arquitetônica mais completa e consistente, facilitando o acesso e a atualização dos dados. Um dos primeiros exemplos encontrados na literatura sobre modelagem BIM com auxílio da varredura a laser para representação de um trecho da edificação pode ser visto na Figura 2. O modelo complexo da Sydney Opera House foi desenvolvido com a finalidade de auxiliar o gerenciamento e a manutenção (*Facility Management*) da edificação.

Figura 2 - Modelo BIM da Sydney Opera House



Fonte: Disponível em: <<http://www.aia.org/aiaucmp/groups/aia/documents/pdf/aiab081587.pdf>>. Acesso em 20 mar. 2014.

A partir do modelo BIM criado, é possível gerar uma série de outros produtos, como desenhos, modelos fotorrealísticos, quantitativos, animações, dentre outros, servindo como importante base para a manutenção e o desenvolvimento de projetos de intervenção em edificações existentes. Além disso, pode-se exportar o modelo BIM para outros programas para a realização de análises e simulações, ou para a disponibilização em diferentes sistemas

de informações, como bancos de dados multimídia, Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA) na plataforma *web*, dentre outros.

Na etapa de processamento de dados, melhores resultados têm sido alcançados quando utilizadas técnicas que permitem a obtenção de informações tridimensionais diretamente sobre o objeto real. Apesar do potencial das técnicas fotogramétricas digitais e dos sistemas de varredura para geração de modelos BIM precisos e completos, os poucos artigos encontrados na literatura apresentam experiências muito incipientes, onde a "nuvem de pontos" é geralmente usada para a modelagem de uma parte da edificação ou como conferência de informações já existentes, ou seja, sem tirar maior proveito das modernas tecnologias para aquisição de dados (ATTAR et al., 2010; WOO; WILSMANN; KANG, 2010; GIUDICE; OSELLO, 2013).

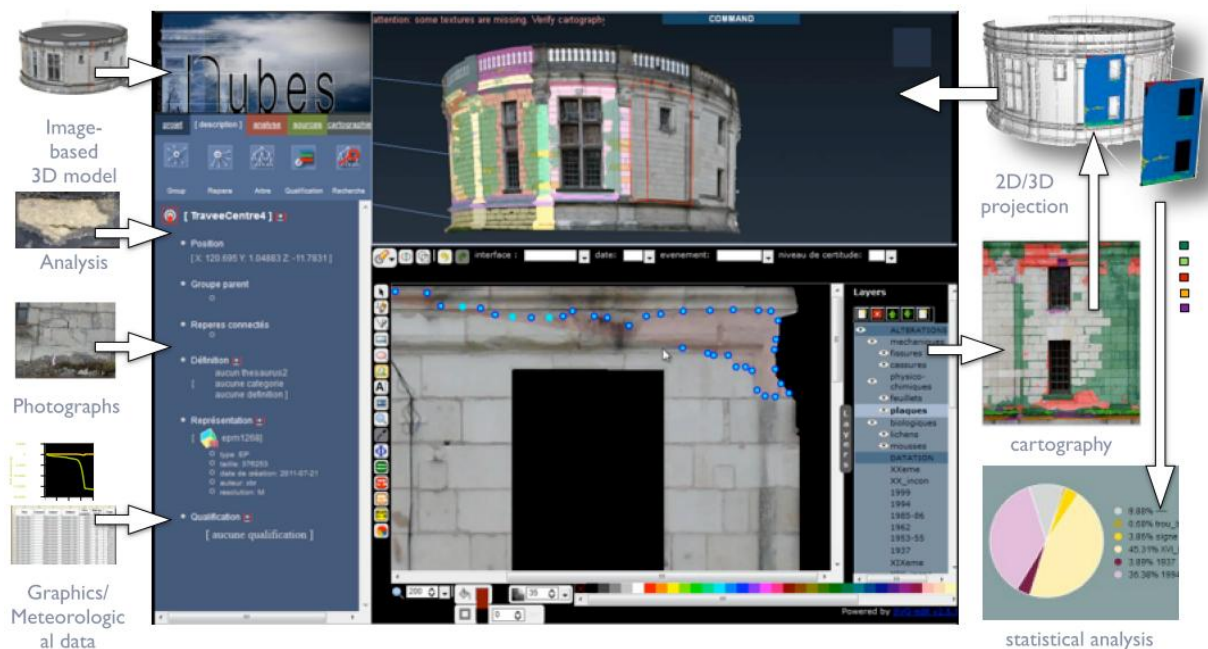
Além dos modelos CAD e BIM, existem outras formas de registro, como os documentos históricos, as fotos, os vídeos, os panoramas fotográficos⁶ e os *tours* virtuais. Os *tours* virtuais ampliam as possibilidades de visualização do espaço representado pela integração de novos pontos de observação, sendo utilizados atualmente em aplicações *web* como recurso de visualização dinâmica de imagens, vídeos e panoramas (SANTOS; AMORIM, 2010).

Independentemente das aplicações imediatas em um projeto de documentação, é necessário realizar o **gerenciamento dos dados** de maneira adequada, de modo a possibilitar o armazenamento, a recuperação e a disponibilização das informações produzidas para diversos usuários. Segundo Amorim (2011), essa etapa geralmente é realizada com auxílio de diferentes profissionais, como os da Ciência da Informação e os da Ciência da Computação, sendo os primeiros envolvidos em operações para identificação, indexação e armazenamento de documentos e de seus metadados, e os segundos em tarefas para implementação de um banco de dados multimídia para gerenciar o acesso, o controle, a manutenção e a atualização do sistema. Além desses, outros profissionais deverão atuar na interface entre o banco de dados multimídia e os usuários finais, promovendo condições apropriadas para acesso *online* de diversos tipos de informações armazenadas.

⁶ Os panoramas permitem que o ambiente seja visualizado de apenas um ponto, correspondente à estação de onde foram tomadas as fotos.

Verifica-se o interesse crescente em se utilizar modelos geométricos como interface gráfica associada a diferentes tipos de informações. Segundo Remondino (2011), os programas para Sistemas de Informações Geográficas disponíveis atualmente possuem limitações para o manuseio de modelos geométricos complexos. No contexto de modelos geométricos (tridimensionais) de cidade (*computer city model/modeling*), o CityGML⁷ tem sido um padrão para geoinformação largamente utilizado para modelagem, visualização e intercâmbio de dados, sendo adotado em várias cidades como mais um recurso para planejamento urbano.

Figura 3 - Sistema de informações NUBES disponível na plataforma web



Fonte: De Luca (2013).

Um interessante sistema para manipulação e visualização via *web* de modelos arquitetônicos complexos é apresentado por De Luca e colaboradores (2011) e De Luca (2013). O sistema NUBES (Figura 3) permite visualizar e manusear múltiplas representações (desenhos, "nuvem de pontos" e modelos de superfície fotorrealísticos) com informações semânticas associadas, estabelecer relação entre modelos geométricos e fontes iconográficas (atuais ou históricas) e analisar as transformações da edificação ao longo do tempo.

⁷ *City Geography Markup Language* (CityGML) é um formato aberto para modelo de informações, baseado na codificação XML, desenvolvido especificamente para representação, armazenamento e compartilhamento de modelos geométricos de cidades. É baseado em modelo semântico relacionado com um sistema de referência e conteúdos na forma de geometrias e gráficos, suportando análises espaciais sofisticadas.

A última etapa do projeto de documentação arquitetônica refere-se ao **controle e à documentação de processos**, a chamada metadocumentação, que envolve a produção de relatórios com análise crítica sobre os produtos e processos (AMORIM, 2011). Essa etapa é essencial para auxiliar o planejamento de trabalhos futuros, visando o desenvolvimento de métodos mais eficientes e produtos de melhor qualidade.

2.2 FINALIDADES DA DOCUMENTAÇÃO X NÍVEL DE DETALHE

Segundo Letellier (2007) e English Heritage (2006), a documentação do patrimônio arquitetônico é uma atividade essencial para:

- permitir o conhecimento das edificações históricas (individual e coletivamente), seus valores e sua evolução;
- permitir o gerenciamento e controle mais consistente e eficaz dos trabalhos de manutenção, conservação ou qualquer outra intervenção no patrimônio arquitetônico, levando em consideração a forma física, os materiais, a construção e o seu significado histórico e cultural;
- fornecer informações das edificações ou parte das mesmas que foram perdidas (como resultado de demolições, alterações ou abandono);
- dar suporte às ações de planejamento e controle dos órgãos de preservação do patrimônio;
- possibilitar estudos para o desenvolvimento de ações visando o uso sustentável das edificações;
- permitir registro permanente e acessível para pesquisas acadêmicas de diversas disciplinas e para o conhecimento do público em geral;
- promover o interesse e envolvimento da população na preservação do patrimônio.

Essa diversidade de finalidades da documentação influencia inevitavelmente no escopo, na ênfase e no nível de detalhe do registro. O tempo e o custo destinados a cada atividade e, conseqüentemente, o conteúdo da documentação, irão variar de acordo com a natureza dos objetos a serem registrados e com as circunstâncias/finalidades do projeto de documentação.

Nesse sentido, é necessário que estejam bem definidos alguns aspectos do projeto de documentação:

- nível de detalhe requerido;
- recursos disponíveis, relacionados a equipamentos e programas computacionais, bem como a habilidades profissionais;
- tempo disponível, e
- resultados desejados, incluindo a organização e a apresentação dos dados.

Nível de detalhe é assunto abordado em diversos guias e livros sobre documentação arquitetônica. Dentre eles, destacam-se as classificações dos seguintes autores (ENGLISH HERITAGE, 2006; LETELLIER, 2007; CRAMER; BREITLING, 2007), discutidas a seguir.

Letellier (2007) classifica o termo "registro" (*recording*⁸) em três níveis, com ordem crescente de precisão e detalhamento: (1) de reconhecimento; (2) preliminar, e (3) detalhado. Esse autor apresenta um quadro em que relaciona os tipos de registro às finalidades específicas de cada nível, aos produtos e níveis de precisão requeridos, aos custos, tempo e equipes profissionais necessárias em cada fase, e apresenta ainda sugestões de uso não só de ferramentas tradicionais como também digitais, para o registro das imagens vetoriais e *raster*, como o *3D laser scanning* e a fotogrametria digital (Quadro 1).

O registro de reconhecimento tem como objetivo a visualização e o entendimento das características gerais do sítio e de suas edificações. O registro preliminar consiste no levantamento de componentes significativos do sítio e que requerem ações de conservação com maior urgência. O registro detalhado é usado para dar suporte a projetos de intervenção.

Segundo Letellier (2007), a progressão recomendada no uso de cada nível garante a obtenção, com custos acessíveis, de dados essenciais para uso em várias etapas do projeto. À medida em que o projeto avança, os registros gráficos podem completar os já existentes.

⁸ Segundo Letellier (2007), o termo registro (*recording*) é utilizado em um conceito amplo, associado à aquisição de novas informações obtidas a partir de diversas atividades realizadas sobre o patrimônio arquitetônico, que incluem: levantamento cadastral, pesquisa e investigação, conservação, uso, manutenção e monitoramento.

Quanto maior o nível de detalhe, maior será a precisão requerida e, conseqüentemente, mais tempo, custo e ferramentas sofisticadas serão necessárias para a produção do registro.

Quadro 1 - Níveis de registro do patrimônio segundo Letellier (2007)

		REGISTRO A RECONHECIMENTO (baixa precisão)	REGISTRO B PRELIMINAR (média precisão)	REGISTRO C DETALHADO (alta precisão)
FINALIDADE DO REGISTRO		Reconhecimento Inventário inicial Planejamento inicial Dados de referência	Planejamento Condições iniciais Investigação Pré-projeto Dados de referência	"As found" ou "As-built" Projeto Construção Manutenção/ monitoramento
PRECISÃO DOS DESENHOS		Sem escala	Plantas e elevações (10 cm) Detalhes (2 cm)	Plantas e elevações (1 cm) Detalhes (2 mm)
PRODUTOS		Levantamento fotográfico Mapa com indicação de estações fotográficas Anotação das condições gerais Esboços com anotações	Desenhos obtidos por levantamento cadastral Anotação de informações Levantamento fotográfico	Desenhos obtidos por levantamento cadastral Anotação de informações Levantamento fotográfico
CUSTO		Baixo	Moderado	Moderado a alto
TEMPO/EQUIPE		Poucos dias no sítio pela equipe de levantamento	Algumas semanas no sítio pela equipe de levantamento e profissionais de conservação	Tempo elevado em campo e muitas vezes uma atividade permanente realizada por equipe de levantamento e profissionais de conservação
RECURSOS TRADICIONAIS DE REGISTRO		Fotos Esboços	Esboços cotados Fotos de grande formato Fotos retificadas	Esboços cotados Fotos retificadas de grande formato Estereofotogrametria
RECURSOS DIGITAIS DE REGISTRO	IMAGENS VETORIAIS	Desenhos em CAD GNSS (de navegação) Fotogrametria aérea	Desenhos em CAD GNSS (de mapeamento) Vetorização de fotos retificadas Modelagem 3D	Estação Total GNSS (de levantamento) Modelagem geométrica Fotogrametria Digital 3D Laser scanning
	IMAGENS RASTER	Fotos digitais Digitalização de fotos Imagens de satélite Vídeos digitais	Fotos digitais Retificação de fotos Vídeos de alta resolução	Fotos digitais Geração de texturas para modelos geométricos Geração de fotos retificadas e ortofotos

Fonte: adaptado de Letellier (2007).

O English Heritage (2006) classifica a documentação de edifícios históricos em quatro níveis, associando-os às informações a serem levantadas separadas pelas categorias: desenhos,

fotografias e documentos textuais. O Quadro 2 sumariza essa classificação, que é apresentada de forma extensiva pelos autores.

Quadro 2 - Níveis de detalhe x informações a serem levantadas, segundo o English Heritage (2006)

	DESENHOS	FOTOGRAFIAS	DOCUMENTOS TEXTUAIS
NÍVEL 1	Levantamento somente do exterior, sendo possível incluir, eventualmente (em casos específicos), alguns esboços com características relevantes do interior	Fotografias do exterior, permitindo uma visão geral da edificação	Dados básicos: localização, data do levantamento, nome do levantador, tipo e função da edificação (passado e presente), seus materiais e possível data de construção
NÍVEL 2	Levantamento essencialmente do exterior, podendo, em algumas situações, incluir: <ul style="list-style-type: none"> • esboços cotados de plantas, cortes, elevações • levantamento cadastral para elaboração de plantas gerais do sítio, plantas baixas, cortes e elevações 	Fotografias do exterior e interior da edificação (principais cômodos e áreas de circulação)	Dados do nível 1, incluindo: <ul style="list-style-type: none"> • informações históricas da edificação, forma, função, nome dos arquitetos, construtores e proprietários (quando conhecidos)
NÍVEL 3	Levantamento cadastral para elaboração de plantas baixas, podendo incluir em casos específicos: <ul style="list-style-type: none"> • esboços cotados de plantas, cortes, elevações • cadastro para obtenção de cortes, elevações e alguns detalhes • cópias de desenhos anteriores para embasar a análise histórica • modelos geométricos para facilitar a compreensão da edificação • desenhos para ilustrar a evolução histórica 	Fotografias do exterior e interior da edificação (principais cômodos e áreas de circulação), detalhes internos e externos relevantes (com régua para facilitar a determinação aproximada da escala) Fotos antigas, ilustrando sua evolução	Dados do nível 2, incluindo: <ul style="list-style-type: none"> • relato das circunstâncias do registro realizado: objetivos, métodos, escopo e limitações • análise crítica dos registros e documentos existentes da edificação • abordagem sobre aspectos formais da edificação (estrutura, materiais, compartimentação, elementos decorativos) e suas fases de desenvolvimento, juntamente com evidências, embasando a análise • relação da bibliografia consultada, podendo incluir eventualmente um glossário dos termos utilizados
NÍVEL 4	Iguais aos do nível 3	Iguais aos do nível 3	Dados do nível 3, incluindo: <ul style="list-style-type: none"> • maior discussão sobre fontes publicadas, criando desenhos novos sobre fontes primárias • discussão sobre o passado da edificação e sua relação com o presente • informações relevantes dos proprietários, arquitetos, construtores ou outras pessoas familiarizadas com a edificação

Fonte: elaboração da autora a partir das informações contidas em English Heritage (2006).

O nível 1 é o registro básico, com dados de identificação obtidos a partir de uma inspeção superficial. Geralmente são suficientes os registros fotográficos do exterior e alguns esboços. O nível 2 inclui desenhos mais detalhados (plantas, cortes e elevações), uma boa cobertura fotográfica (exterior e interior) e dados históricos básicos da edificação. É um registro mais descritivo do que analítico, podendo chegar a algumas conclusões sobre o uso e a evolução da edificação.

No nível 3, são incluídos todos os desenhos e fotos necessários para ilustrar a edificação e sua estrutura, embasando a análise histórica. A maior parte das informações do nível 3 deve ser obtida diretamente na edificação, ao invés de fontes bibliográficas. O nível 4 é um registro analítico usado em edificações de maior significado. Há um estudo histórico mais detalhado, que usa como referência não somente mapas e fontes secundárias, mas também investigando fontes primárias, permitindo situar a edificação no contexto local, regional, nacional e eventualmente internacional.

Cramer e Breitling (2007) classificam o levantamento em cinco níveis de precisão, como pode ser visto no Quadro 3. Esses autores fazem uma descrição mais detalhada dos objetivos, das informações gráficas, das escalas e valores de tolerância adequados para cada nível, se comparado com Letellier (2007) e o English Heritage (2006). No entanto, praticamente só tratam do produto "desenho" (em diversas escalas e tipos), sem abordar outros tipos de informações importantes na documentação arquitetônica, como fotografias, modelos geométricos, análise formal, histórica e funcional da edificação e seu entorno.

Quadro 3 - Níveis de precisão x objetivos x informações a levantar, segundo Cramer e Breitling (2007)

	ESCALA	OBJETIVOS	INFORMAÇÕES A LEVANTAR
NIVEL 1	<p>Escala: 1/100</p> <p>Tolerância: ± 10 cm</p>	<p>Levantamento esquemático de toda a edificação visando:</p> <ul style="list-style-type: none"> estudo de viabilidade estimativa de áreas e volumes medição rotineira para manutenção 	<p>Representação simplificada das espessuras das paredes, sem esquadrias e sem materiais de acabamento</p> <p>Representação de grandes deformações da edificação e irregularidades nas plantas</p>
NIVEL 2	<p>Escala: 1/50</p> <p>Tolerância: ± 5 cm</p>	<p>Levantamento cadastral de toda edificação com média precisão visando:</p> <ul style="list-style-type: none"> planejamento funcional planejamento de trabalhos em edificações que não apresentam sérias deformações planejamento de intervenções que não afetem a capacidade de carga da estrutura 	<p>Representação de deformações menores que 10 cm</p> <p>Apresentação dos principais elementos construtivos</p> <p>Representação esquemática das esquadrias e dos elementos de revestimento principais (painéis em paredes, forros, etc.)</p>
NIVEL 3	<p>Escala: 1/25, 1/20</p> <p>Tolerância: ± 2 cm</p>	<p>Levantamento cadastral de toda edificação com elevada precisão visando:</p> <ul style="list-style-type: none"> planejamento de intervenções para edificações com patologias e deformações mais graves planejamento de obras em edifícios de grande importância 	<p>Representação de deformações menores que 5 cm</p> <p>Plantas baixas precisas com registro das irregularidades</p> <p>Apresentação dos detalhes construtivos</p> <p>Anotação dos materiais de construção e dos principais materiais de acabamento (piso, parede, teto)</p> <p>Detalhes das esquadrias</p> <p>Plantas de forro</p> <p>Descrição dos principais elementos históricos</p>
NIVEL 4	<p>Escala: 1/25, 1/20</p> <p>Tolerância: ± 2 cm</p>	<p>Levantamento cadastral de toda edificação com elevada precisão, juntamente com dados analíticos, visando:</p> <ul style="list-style-type: none"> documentação de edificações históricas mais relevantes, que requerem complexa restauração, para medições estruturais ou quando as distorções são consideráveis 	<p>Todas as informações descritas no nível 3, incluindo a anotação de todos os materiais de acabamento (piso, parede, teto), e de todos os elementos históricos</p> <p>Representação de deformações menores que 2 cm</p>
NIVEL 5	<p>Escala: 1/10, 1/5, 1:1</p> <p>Tolerância: ± 1 cm</p>	<p>Levantamento cadastral detalhado para fins de conservação e restauração:</p> <ul style="list-style-type: none"> suporte para elaboração de projeto estrutural em edificações com distorções graves planejamento de intervenções de conservação e restauro 	<p>Documentação de todos os elementos construtivos</p> <p>Representação detalhada das superfícies</p>

Fonte: adaptado de Cramer e Breitling (2007).

2.2.1 Considerações

Pode-se perceber que os três grupos de classificações se complementam e representam referência inicial e geral para determinação de uma série de aspectos (nível de detalhe, tipos de informações a serem levantadas, escala e valores aceitáveis de tolerância), que devem estar associados não somente à finalidade da documentação, mas também às características

específicas das edificações (em questão) e seu entorno, a extensão do levantamento, o tempo e os recursos disponíveis (financeiros, tecnológicos e culturais).

Além disso, é importante incluir e considerar o paradigma BIM como um novo modo de registro e gerenciamento das edificações (históricas ou não), ainda não tratado pelos guias e livros de documentação arquitetônica, associando os níveis de detalhe requeridos para determinadas finalidades/particularidades às características próprias da modelagem BIM. Acredita-se que isto não acontece por ser muito recente este tipo de aplicação, onde as primeiras experiências estão acontecendo, e os padrões ainda estão distantes de serem estabelecidos.

A questão do nível de detalhe e finalidade da documentação arquitetônica são assuntos tratados novamente no capítulo 7, junto à proposição de métodos de trabalho e formas de representação dos elementos construtivos com uso integrado da tecnologia BIM com os sistemas de varredura. A seguir, são tratadas as principais técnicas de levantamento arquitetônico, de modo a permitir uma visão geral das tecnologias disponíveis atualmente e contextualizar o *3D Laser Scanning*, o *Dense Stereo Matching* e a Fotogrametria Digital.

2.3 TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO

O termo levantamento cadastral⁹ apresenta os seguintes significados: pode ser entendido tanto como (1) o processo de medição e de registro das formas de um objeto visando sua representação gráfica; (2) o resultado desse processo, ou ainda, (3) estes dois sentidos simultaneamente (GROETELAARS, 2004).

Há grande variedade de aplicações que requerem o levantamento e a representação das formas e dimensões dos objetos existentes. Em Arquitetura e Urbanismo, pode-se citar as mais comuns, como: desenvolvimento de projetos de reforma e restauração de edifícios, documentação de sítios e monumentos históricos, análise histórica da arquitetura e do urbanismo, elaboração de projetos urbanísticos, planejamento de cidades, etc.

Existe atualmente uma variedade de técnicas disponíveis para o levantamento de informações métricas dos objetos, sendo várias as formas de classificação das mesmas:

⁹ Idênticas acepções podem ser dadas aos termos: levantamento arquitetônico e levantamento topográfico (GROETELAARS, 2004).

- métodos diretos x indiretos;
- técnicas ativas x passivas;
- métodos tradicionais x digitais;
- medição sobre o objeto x sobre imagens;
- métodos para levantamento de dados externos às superfícies x ocultos às mesmas¹⁰;
- técnicas que exigem determinação dos pontos de controle em campo x ou a *posteriori*.

Dada a complexidade de classificação das técnicas e das várias sobreposições entre elas, optou-se por representar os métodos de levantamento separados entre duas grandes categorias: "diretos" e "indiretos", sendo os indiretos, subdivididos em métodos "ativos" ou "passivos".

Nos métodos considerados diretos, é necessário o contato físico do operador (ou do equipamento utilizado) com o objeto ou área a ser levantada, diferentemente dos indiretos, onde a medição é realizada a partir de posições mais afastadas em relação ao objeto ou trecho de interesse.

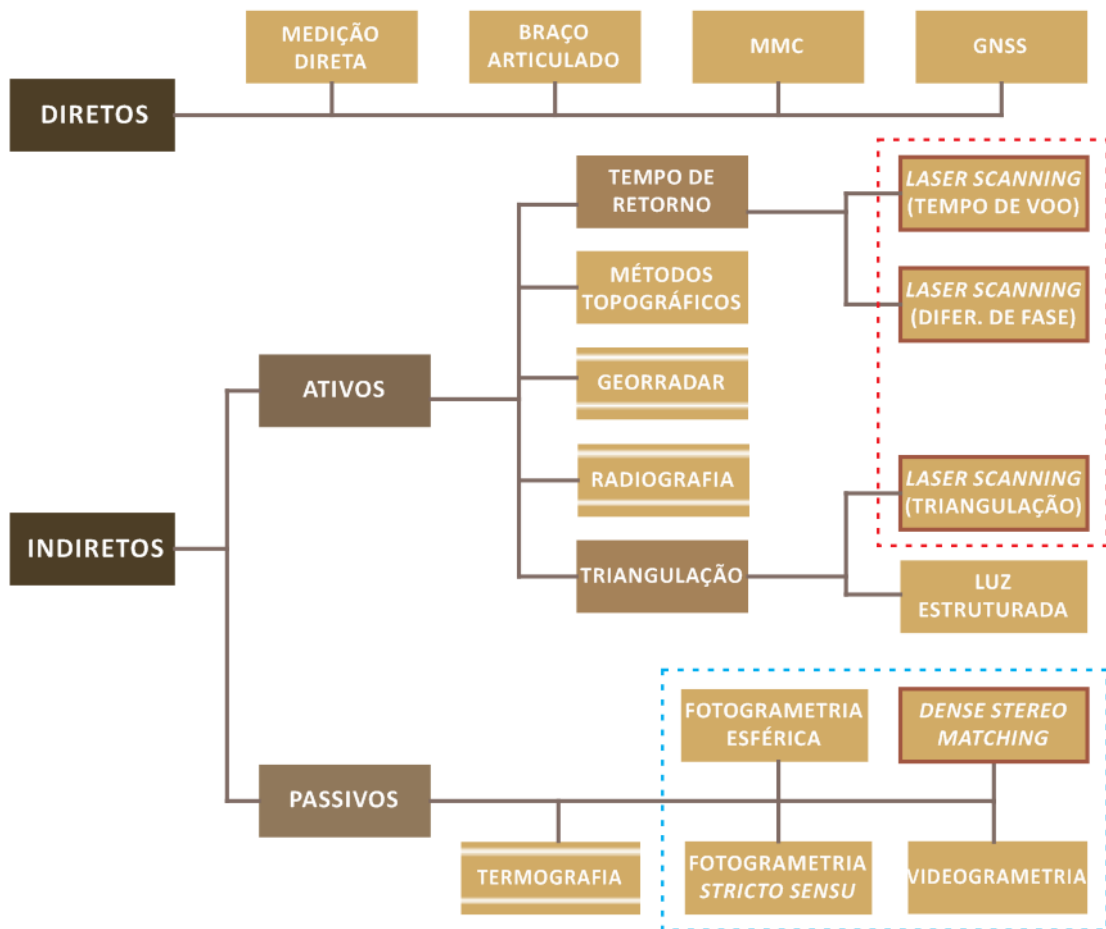
Os métodos classificados como ativos¹¹ possuem sensores que emitem energia para a medição dos objetos. A energia emitida é refletida pelo objeto e recebida novamente pelos dispositivos, que podem operar em diversas faixas do espectro eletromagnético, dependendo da tecnologia utilizada. Nos métodos passivos, não há emissão de energia. Nesses casos, o Sol desempenha papel fundamental, uma vez que emite a energia que será refletida pelo objeto e capturada pelo sensor (PEREIRA, 2012).

A Figura 4 ilustra essa classificação e destaca alguns conjuntos de técnicas de levantamento, conforme identificado na legenda, como: métodos para levantamento de informações ocultas, métodos de varredura a laser e outros baseados nos princípios da fotogrametria. A seguir, são tratadas cada uma das técnicas.

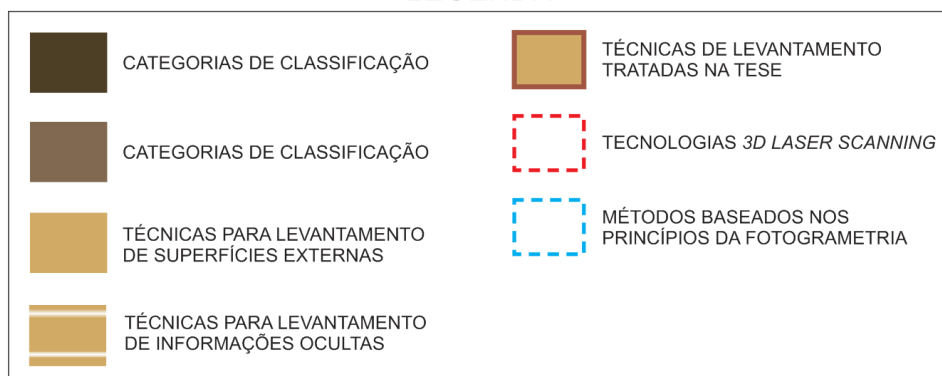
¹⁰ Os dados externos às superfícies estão relacionados a elementos visíveis pelo olho humano, como pisos, paredes e instalações aparentes, e as informações ocultas, referem-se a objetos não visíveis, como instalações embutidas no interior das paredes.

¹¹ Os métodos topográficos estão classificados como ativos, em função dos dispositivos usados, atualmente, para medição de distâncias, baseados na emissão/reflexão de raios infravermelhos, como os distanciômetros e as estações totais.

Figura 4 - Classificação das principais técnicas de levantamento



LEGENDA



Fonte: elaboração da autora.

2.3.1 Medição direta

A medição direta ou levantamento manual é a técnica de cadastramento mais antiga e que utiliza os instrumentos mais simples de medição. Na maioria dos casos são usados: trenas (de aço ou fibra de vidro) para medição linear, dispositivos para verificação da verticalidade, como fios de prumo (de face e de centro), e da horizontalidade, como níveis de mangueira,

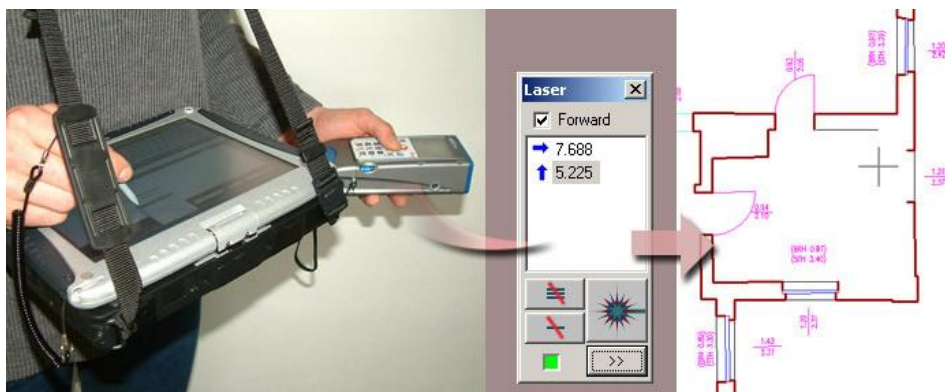
de bolha (manual) ou ótico. Nessa técnica são empregados três procedimentos de medição: triangulação, coordenadas cartesianas e irradiação, sendo o primeiro o mais utilizado, baseado na decomposição das formas em diversos triângulos. Além disso, é importante o levantamento de medidas na forma de cotas acumuladas, a fim de evitar propagação de erros (GROETELAARS, 2004).

Na medição direta, o operador determina, em campo, os pontos de interesse que serão levantados. A escolha da localização e da quantidade de pontos é realizada levando-se em conta o produto final, ou seja, o nível de detalhe requerido, os desenhos a serem produzidos, os cortes a serem representados, etc.

Essa técnica é mais adequada para o levantamento de objetos/edificações simples e de pequenas dimensões, uma vez que é necessário o contato direto do operador a cada ponto a ser medido. Uma edificação complexa e de grandes dimensões exigiria o uso de andaimes (para se ter acesso a pontos elevados) e a medição de uma grande quantidade de pontos, tornando o processo extremamente moroso e, ainda assim, muitas vezes insuficiente para representar adequadamente as formas irregulares.

Em edificações de maiores dimensões, ou quando se deseja obter as medidas indiretamente e de modo mais rápido, é possível o uso de trena a laser. Já existem programas que permitem transferir as medidas levantadas pela trena a laser diretamente para o computador, gerando os desenhos simultaneamente ao levantamento (Figura 5).

Figura 5 - Funcionamento do DistToPlan (*plugin* do AutoCAD) para a geração de desenhos a medida em que é feito o levantamento com trena a laser



Fonte: Disponível em: <br.kubit-software.com/CAD/Products/index.php>. Acesso em: 30 abr. 2014.

Em cadastros mais rigorosos é comum associar à medição direta, o uso de estação total para a obtenção das coordenadas de pontos de controle e para um aumento da precisão do levantamento.

2.3.2 Máquina de Medição de Coordenadas (MMC)

A Máquina de Medição de Coordenadas - MMC (*Coordinate Measuring Machine - CMM*) é largamente utilizada em diversos setores da indústria, que requerem a medição e a inspeção de peças com elevada precisão. Esse equipamento é composto por três componentes principais (Figura 6): a estrutura geral - que inclui os eixos de medição, o apalpador e a unidade de controle, que pode ser um sistema computacional específico e integrado ao dispositivo de medição.

Figura 6 - Equipamento MMC (STRATO-Apex 9166 da Mitutoyo)



Fonte: Disponível em: <<http://www.mitutoyo.com/Images/003/309/Strato900s.jpg>>. Acesso em: 2 maio 2014.

As máquinas MMC permitem determinar o tamanho e a posição dos objetos a partir do contato direto, chegando-se geralmente à precisão na ordem do micrômetro. Existem as máquinas manuais, controladas interativamente pelo operador, e as automáticas, onde a movimentação do apalpador é controlada pelo computador e os dados são transferidos instantaneamente para o mesmo.

Para medir um objeto, é necessário colocá-lo na mesa do equipamento e movimentar o apalpador em diferentes posições, tocando em pontos específicos do objeto, que permitam

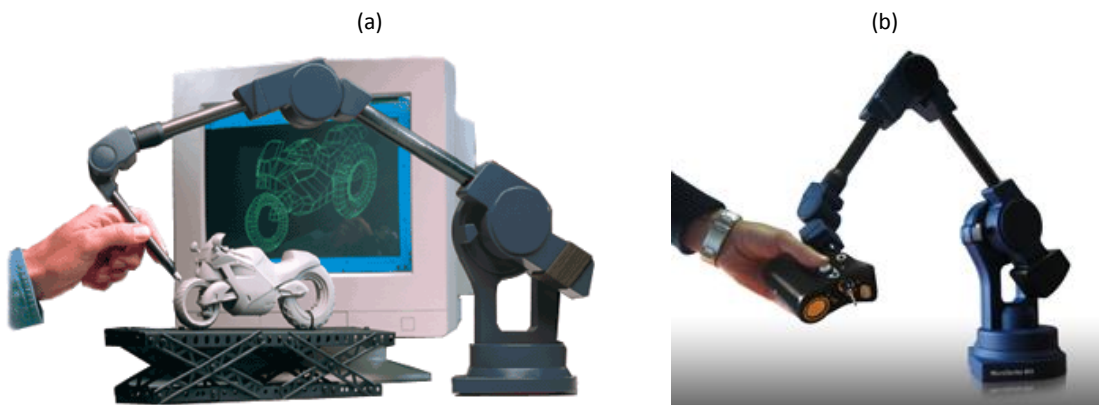
dados para sua reconstrução digital, a partir das coordenadas x , y e z capturadas pelo sistema.

Há máquinas que permitem integrar outros dispositivos de medição indiretos, mais rápidos e com maior precisão, como os dispositivos de escaneamento a laser (princípio da triangulação) e de luz estruturada.

2.3.3 Braço articulado

O braço articulado é um sistema de digitalização por contato derivado da MMC (SILVA, 2011). É composto por braços mecânicos rígidos com juntas articuladas e com sensores precisos de medição angular (Figura 7a). Segundo Silva (2011), a localização espacial do ponto de contato é obtida através do cálculo da rotação de cada junta, considerando o comprimento conhecido de cada braço.

Figura 7 - (a) Exemplo de um braço articulado para registro de coordenadas por contato; (b) mesmo equipamento associado a um *laser scanner* para geração de "nuvens de pontos" de modo indireto



Fonte: Disponível em: <<http://www.3d-microscribe.com/MX%20and%20G2%20Intro%20Page.htm>>. Acesso em: 2 maio 2014.

São usados para captura, pontos representativos da superfície do objeto que serão utilizados para sua modelagem geométrica posterior. Muitas vezes é necessário colocar marcas (pontos ou seções) sobre o objeto de modo a identificar os pontos a serem medidos.

É possível associar ao braço mecânico um dispositivo *laser scanner* (Figura 7b), permitindo acelerar o processo de digitalização. Neste caso, o método passa a ser indireto e possibilita a geração de um produto mais adequado para formas complexas, como o modelo de "nuvem de pontos".

A grande diferença em relação à MMC tradicional é sua portabilidade, devido ao menor tamanho e peso, à maior flexibilidade em se alcançar partes internas de objetos complexos, e o menor custo do equipamento. Como desvantagens, pode-se citar a menor precisão e a necessidade de interação humana para movimentação do apalpador.

Esse equipamento apresenta limitações em materiais flexíveis, frágeis e de elevado valor, devido à necessidade de tocar as superfícies do objeto para realizar a medição (SILVA, 2011). Também apresentam restrições no levantamento de objetos com partes ocas ou internas, e limitações quanto ao tamanho dos objetos a serem medidos, não sendo adequados a objetos muito pequenos ou muito grandes. Entretanto, não há restrições para o levantamento de objetos com superfícies transparentes e altamente reflexivas, como é o caso da varredura a laser e da técnica *Dense Stereo Matching*.

2.3.4 Métodos topográficos

Os métodos topográficos estão relacionados a um conjunto de técnicas e processos que permitem a medição de ângulos e distâncias com a utilização de instrumentos adequados, dentre eles: os teodolitos, os distanciômetros e as estações totais. Baseiam-se, fundamentalmente, na determinação das direções entre os pontos a serem medidos e os pontos onde se realizam as observações (estações). Há duas formas de se obter a posição de pontos no espaço: a observação das direções (ângulos horizontais e verticais) a partir de uma única estação ou a partir de duas ou mais estações (GROETELAARS, 2004).

A estação total reúne em um único equipamento um teodolito eletrônico, um distanciômetro eletrônico e um microprocessador. Ela permite registrar, eletronicamente, os ângulos (horizontais e verticais) e medir distâncias (inclinadas) baseadas num feixe laser, apresentando as coordenadas calculadas instantaneamente em um visor de cristal líquido. Também é possível registrar descritores associados aos pontos cujas coordenadas foram determinadas. Os pontos, coordenadas e descritores são transferidos para programas específicos visando a geração automática ou semiautomática de produtos gráficos a partir dos dados capturados (ou medidos).

Os modelos mais novos de estações totais são as robotizadas, que possuem funções de reconhecimento e busca automática de prismas (instalados em pontos específicos), o que

possibilita a realização da pontaria sem a intervenção do operador (WUTKE, 2006). Esse tipo de equipamento é interessante para o monitoramento periódico e automatizado de estruturas e movimentações de terreno, por exemplo.

Outra forma de utilização é o controle da estação total ser realizada pelo operador de um local afastado da mesma, através de aplicativos específicos instalados em dispositivo próprio ou no computador, conectado ao equipamento topográfico (Figura 8), visando acelerar o levantamento ou viabilizá-lo em áreas de risco.

Figura 8 - Estação total robotizada: à esquerda o dispositivo de controle, o sistema de rádio e o prisma, e à direita a estação total sobre tripé



Fonte: Disponível em: <<http://www.topconpositioning.com/products/total-stations/robotic/qs-series>>. Acesso em: 4 maio 2014.

Como se trata de um método lento de levantamento, que exige equipamentos específicos e operadores treinados, geralmente é usado para a obtenção de pontos específicos do objeto, não sendo adequado para a medição de superfícies ou objetos com grande número de pontos de interesse. Em se tratando do cadastro de edificações, é um método complementar às técnicas de medição direta, de levantamento fotogramétrico e de varredura a laser, dada à precisão na obtenção das coordenadas dos pontos de controle (geralmente vértices das extremidades da fachada, das aberturas ou outros pontos em partes mais elevadas e de difícil acesso).

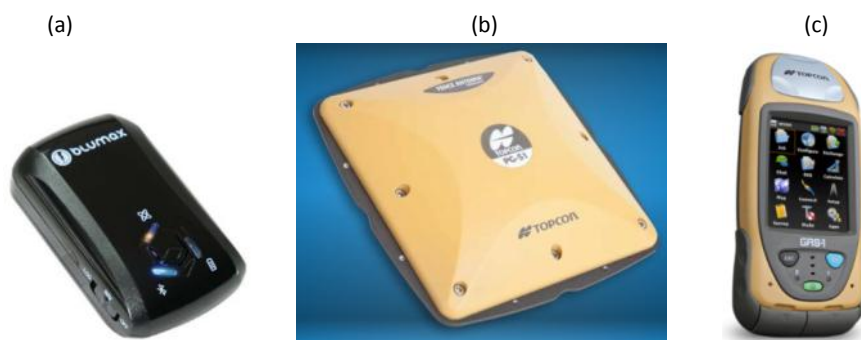
2.3.5 GNSS

O *Global Navigation Satellite System* – GNSS ou Sistema de Navegação Global por Satélite é composto por um conjunto de satélites que orbitam a Terra e outros dispositivos, e que permitem determinar a localização (latitude, longitude e altitude), a velocidade e o tempo para qualquer ponto (onde está o receptor GNSS) sobre ou próximo da superfície da terra. Sua localização é determinada através da triangulação da distância do receptor em relação a três ou mais satélites, baseado no tempo em que os sinais emitidos pelos satélites demoram a chegar ao receptor (MANO, 2012).

Os principais sistemas de navegação GNSS utilizados são: o GPS - *Global Positioning System* dos Estados Unidos, o GLONASS - da Rússia, o Galileo da União Europeia e o Compass da China, com destaque para o primeiro, sendo o mais utilizado em todo o mundo.

Existe grande variedade de equipamentos GNSS disponíveis no mercado, adequados para diferentes níveis de precisão e diversas aplicações, como navegação, levantamentos cadastrais urbanos e rurais. Como exemplo de aparelhos GNSS, pode-se citar desde os mais simples e baratos como o *dataloggers*, menores que um celular (Figura 9a) e com precisão em torno de 3 m, até os equipamentos geodésicos para levantamento topográficos, compostos por antena e receptor (Figura 9b e c), com margem de erro de 1 a 2 mm (MANO, 2012).

Figura 9 - Exemplos de equipamentos GNSS: (a) *datalogger* da Blumax; (b) antena PG-51 da Topcon; (c) receptor GRS-1 da Topcon



Fonte: (a) Mano (2012); (b) e (c) Disponível em: <<http://www.topconpositioning.com>>. Acesso em: 4 maio 2014.

O uso de equipamento GNSS tem se mostrado muito útil para obtenção de pontos de controle e uniformização de sistemas de referência no cadastramento de grandes áreas, servindo de apoio para levantamentos que utilizam outras técnicas, sejam topográficas, fotogramétricas ou *3D laser scanning*.

2.3.6 Fotogrametria (*stricto sensu*)

A Fotogrametria é uma técnica que permite extrair das fotografias, as formas, as dimensões e as posições dos objetos. Os métodos fotogramétricos sofreram grandes transformações desde os primeiros anos de seu desenvolvimento, em meados do século XIX. A fotogrametria digital permitiu a simplificação do processo de restituição, antes realizado por pessoal altamente especializado e por equipamentos de custos elevados, em suas formas analógicas e analíticas (GROETELAARS, 2004).

A fotogrametria digital permite a obtenção, de modo preciso, de grande quantidade de produtos, como medidas, desenhos, modelos geométricos (texturizados ou não), fotos retificadas, ortofotos, a depender da técnica utilizada. Outro aspecto positivo é o pouco tempo necessário para o trabalho de campo, já que a restituição das fotos é feita em escritório, posteriormente ao levantamento fotográfico.

As etapas principais de um levantamento fotogramétrico são:

- **Tomada fotográfica do objeto (em campo)** - onde cada ponto deve ser registrado em pelo menos duas ou três fotos¹². A qualidade da tomada fotográfica, sua adequação ao tipo de técnica fotogramétrica utilizada e a resolução da imagem tem influência direta na precisão dos resultados.
- **Levantamento de algumas medidas (em campo)** - através de fita métrica, dispositivos eletrônicos de medição ou equipamentos topográficos, visando à determinação da escala do modelo.
- **Orientação interna** - definição dos parâmetros internos da câmera, como distância focal (df), localização do ponto principal (PP), distorções da objetiva, tamanho do sensor (CCD ou CMOS) e resolução da imagem, valores que podem ser obtidos de modo preciso através da calibração da câmera. Em aplicações com menor rigor geométrico, podem ser utilizados os valores aproximados de alguns parâmetros através do arquivo EXIF¹³, disponível no arquivo da imagem digital.

¹² As características do levantamento fotográfico, como ângulos das tomadas fotográficas e a quantidade de fotos, variam em função da técnica utilizada, da precisão e dos produtos requeridos.

¹³ EXIF (*Exchangeable Image File Format*) são informações contidas nos cabeçalhos dos arquivos das imagens (como resolução e distância focal nominal), produzidas pela maioria das câmeras digitais atuais.

- **Orientação externa** - realizada através da identificação dos pontos homólogos nas imagens (seja através de processos interativos ou automatizados). Essa etapa permite realizar a interseção dos feixes perspectivos para determinação das coordenadas tridimensionais dos objetos, visando a geração do modelo preliminar e reconstrução do posicionamento relativo das fotos (tal como se encontravam durante a tomada fotográfica). Para determinação da escala real do modelo (fase denominada de orientação externa absoluta), é necessário associá-lo à medida levantada em campo.
- **Geração do modelo geométrico e outros produtos** - complementação do modelo básico gerado na fase anterior, incorporando mais detalhes e associando-o a superfícies juntamente com as foto-texturas correspondentes.
- **Exportação dos produtos** - como modelo de superfícies texturizados, ortofotos, desenhos, animações, planilhas, etc.

Existem diversas formas de classificar a Fotogrametria. São descritas a seguir as três classificações consideradas mais importantes, que variam em função do: (1) posicionamento do sensor ótico; (2) número de fotografias utilizadas e tipo de restituição, e (3) nível de automação do processo de restituição.

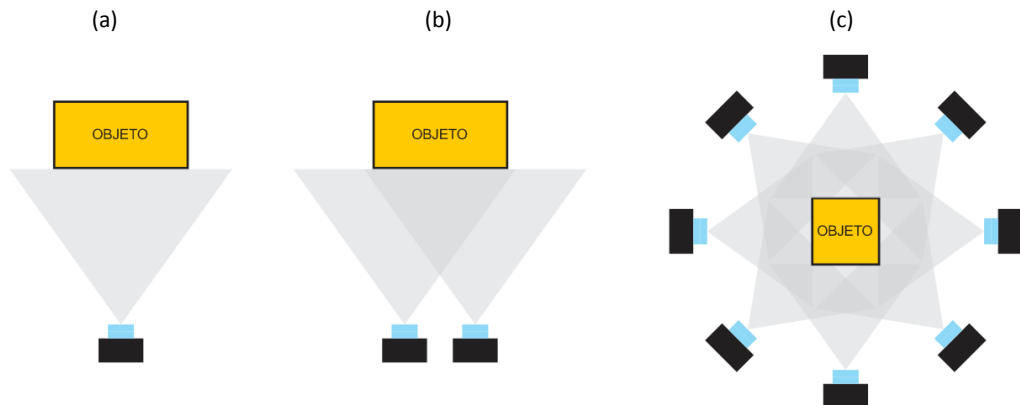
Com relação ao **posicionamento da câmera**, a Fotogrametria pode ser classificada em três tipos, com aplicações e técnicas específicas de cada área:

- **Terrestre** - ou à curta distância¹⁴, quando o sensor fotográfico está posicionado sobre ou próximo à superfície da Terra, sendo empregada em aplicações como: Arquitetura, Arqueologia, Engenharia, Medicina, Odontologia, levantamentos industriais, etc.
- **Aérea** - ou aerofotogrametria, quando a câmera é transportada por aeronaves, balões, helicópteros ou veículos aéreos não tripulados (VANT), podendo ser aplicadas em áreas como: agricultura, levantamento cadastral urbano e rural, controle de mineração, monitoramento ambiental de cidades, prevenção de desastres naturais, etc.

¹⁴ Ou ainda, Fotogrametria Arquetônica, quando utilizada para levantamentos cadastrais em Arquitetura.

- **Orbital** - onde os sensores estão posicionados em satélites para o levantamento de grandes áreas terrestres, podendo substituir, em alguns casos, a fotogrametria aérea, graças aos avanços tecnológicos e ao aumento da resolução das imagens de satélite.

Figura 10 - Exemplos de tomada fotográfica em diferentes situações: (a) monorrestituição; (b) estereorrestituição; (c) restituição de múltiplas fotografias convergentes



Fonte: elaboração da autora.

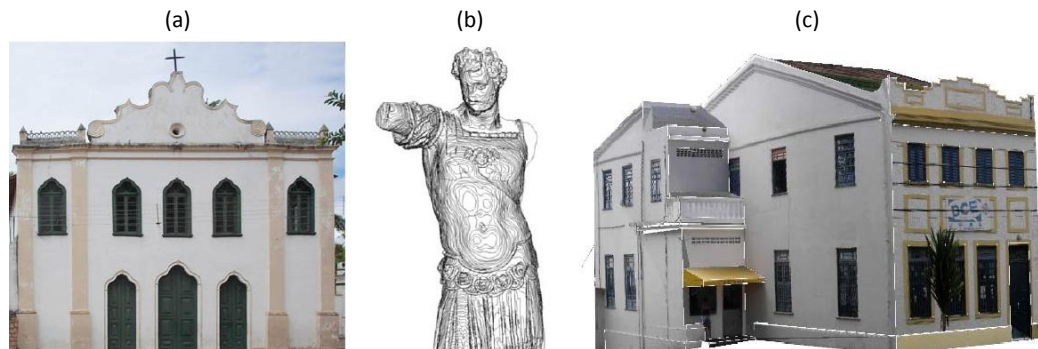
Em relação ao **número de fotografias** utilizadas e sua configuração (Figura 10), pode-se dividir a fotogrametria em função do tipo de restituição:

- **monorrestituição** - onde é utilizada apenas uma fotografia para obtenção de desenhos, fotos retificadas e modelos geométricos (geralmente parciais) de objetos com determinadas características, como: formas planas, objetos tridimensionais com arestas paralelas e perpendiculares entre si (que podem ser associadas aos eixos x, y e z). É o processo mais simples e rápido, mas que apresenta maior limitação de produtos e de precisão dos resultados.
- **estereorrestituição** - baseia-se na utilização de pares de fotografias paralelas ou com pequenas inclinações entre si, obtidas de diferentes posições e com grandes áreas de sobreposição. É a que apresenta mais recursos para automatização das diversas etapas da restituição, sendo o método mais adequado para o levantamento de formas complexas e irregulares.
- **restituição de múltiplas fotografias convergentes** - deve-se fotografar o objeto de diversas posições, onde cada ponto (ou feição do objeto) deve ser registrado em pelo menos três fotografias. As fotos devem ser convergentes, preferencialmente com ângulos entre si variando de 45 a 90 graus, para uma melhor precisão na localização dos pontos restituídos. É o método mais adequado para objetos com propriedades

geométricas bem definidas que permitam a identificação interativa dos pontos homólogos nas várias fotografias.

A estereorrestituição e a restituição de múltiplas fotografias convergentes são os métodos mais precisos e que permitem uma maior variedade de produtos, para além dos desenhos, fotos retificadas e modelos parciais da monorrestituição, uma vez que permitem gerar modelos geométricos completos do objeto - texturizados ou não, ortofotos, animações, dentre outros (Figura 11).

Figura 11 - Tipos de produtos que podem ser obtidos pela monorrestituição, estereorrestituição e restituição a partir de múltiplas fotos convergentes, respectivamente: (a) foto retificada de uma fachada plana; (b) representação em curvas de isovalor de forma complexa; (c) modelo geométrico com foto-textura de edificação



Fonte: Groetelaars (2004).

Em relação **ao nível de automação** do processo de restituição, os sistemas fotogramétricos podem ser classificados em:

- **interativos** - com uso de programas que funcionam através de processos interativos, desde os mais simples, como o DigiCAD, até os mais complexos que permitem gerar grande variedade de produtos, como o ShapeCapture e o PhotoModeler.
- **semiautomáticos** - através de programas que apresentam comandos para automatização de algumas tarefas, como o reconhecimento de feições e a correlação de pontos homólogos (geralmente com uso de alvos codificados).
- **automáticos** - com utilização de ferramentas que permitem automatizar diversas etapas da restituição, desde a correlação entre as fotografias até a geração de "nuvens de pontos", permitindo a criação de modelos geométricos de formas complexas.

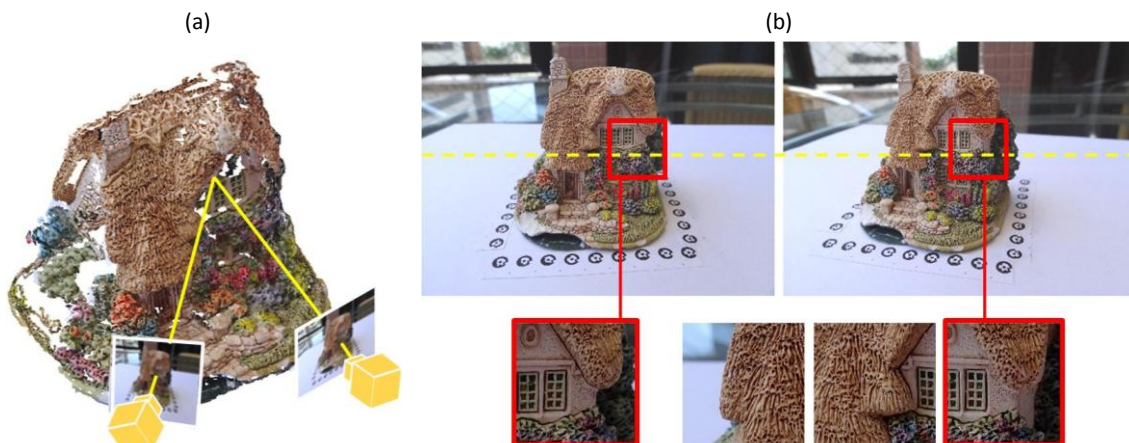
Nos últimos 5 a 10 anos, foram desenvolvidas diversas ferramentas que permitiram automatizar a restituição fotogramétrica. Utilizando-se dos princípios da estereorrestituição e dos avanços obtidos na área da Visão Computacional¹⁵, surgiu a técnica *Dense Stereo Matching* - DSM. Devido às particularidades desse método, ao elevado grau de automatização e ao seu recente desenvolvimento, o DSM é tratado separadamente da Fotogrametria *stricto sensu*, utilizada há mais tempo e que requeria maior interação do operador.

Outros métodos baseados nos princípios da Fotogrametria, como a Fotogrametria Esférica e a Videogrametria, também serão tratados separadamente devido às suas características específicas.

2.3.7 *Dense Stereo Matching*

O *Dense Stereo Matching* (DSM) representa o estado da arte com relação às técnicas fotogramétricas automatizadas para obtenção de modelos geométricos de formas complexas.

Figura 12 - Princípio de funcionamento do DSM: (a) fotografias tomadas de diferentes ângulos para a geração de "nuvens de pontos"; (b) processo de associação de pequenas áreas visando a correlação de *pixels* nas diferentes fotografias



Fonte: elaboração da autora.

O funcionamento da técnica DSM baseia-se na correlação automática de conjuntos de *pixels* homólogos em diferentes fotos para a geração da "nuvem de pontos" (Figura 12) ou da

¹⁵ Visão computacional é a parte da Ciência da Computação responsável pelo estudo e desenvolvimento da "visão em uma máquina", ou seja, da emulação da forma como um computador "enxerga" o meio à sua volta, extraindo informações significativas a partir de imagens capturadas por câmeras de vídeo, sensores, *scanners*, entre outros dispositivos. Essas informações, baseadas em reconhecimento de padrões, permitem à máquina de comando numérico, reconhecer, manipular e realizar operações sobre os objetos contidos nas imagens.

malha triangular irregular (*Triangular Irregular Network* - TIN), dependendo da ferramenta utilizada.

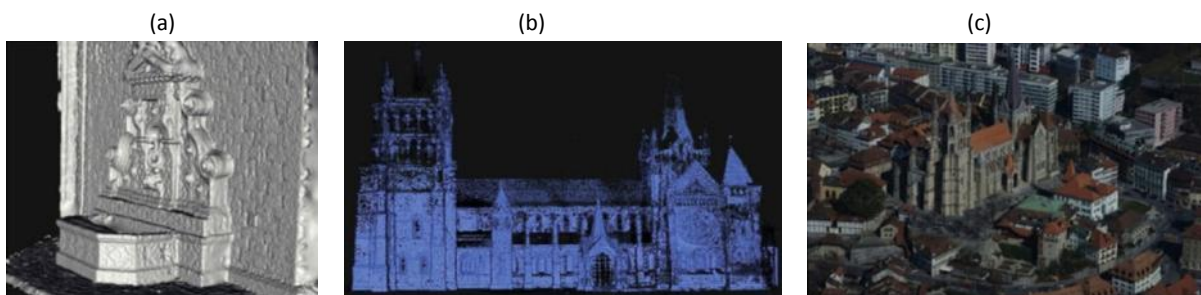
A correlação automática só pode ser realizada de modo adequado, se a superfície do objeto fotografado tiver textura não uniforme, de modo a produzir conjuntos diferenciados de *pixeis* (padrões). Além disso, é necessário garantir que as feições dos objetos sejam bem visualizadas nas fotos, que a resolução das imagens esteja compatível com a precisão requerida pelo levantamento, e que a tomada fotográfica seja realizada de modo adequado.

O processo de geração de "nuvem de pontos" com a técnica DSM pode ser dividido em cinco etapas: (1) inserção das fotos; (2) correlação automática das fotografias; (3) reconstrução da geometria preliminar do objeto e da câmera; (4) associação densa de *pixeis* homólogos; (5) criação do modelo geométrico na forma de "nuvem de pontos" ou malha TIN (texturizada ou não).

Existe grande variedade de ferramentas para DSM como, programas comerciais e sistemas gratuitos, de processamento remoto via *web* ou do tipo *open-source* (programas livres). As ferramentas de processamento via *web* são as mais difundidas, utilizadas e automatizadas, no entanto, apresentam limitações na definição de parâmetros e no controle da precisão dos resultados.

O DSM pode ser utilizado para o levantamento de objetos de diferentes dimensões e níveis de complexidade. A Figura 13 ilustra alguns tipos de objetos levantados por essa técnica, desde pequenos ornamentos, obtidos por fotos terrestres até o levantamento de centros urbanos, a partir de fotos aéreas.

Figura 13 - Diferentes objetos levantados por DSM: (a) malha TIN de uma fonte; (b) "nuvem de pontos" de uma edificação; (c) "nuvem de pontos" texturizada de um trecho de cidade



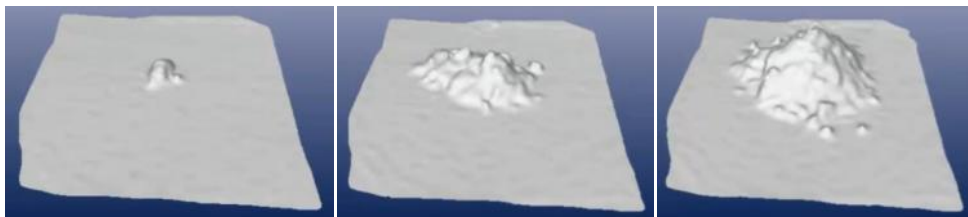
Fonte: Tola, Strecha e Fua (2011).

Como o modelo do tipo "nuvem de pontos" apresenta limitações, geralmente é necessário processá-lo em programas específicos para se obter outros tipos de produtos, como desenhos, modelos geométricos tridimensionais (sólidos ou superfícies), modelos BIM, etc. Alguns programas para DSM apresentam operações básicas que podem ser realizadas sobre a "nuvem de pontos" (como limpeza e preenchimento de vazios) e permitem obter a representação em curvas de nível, gerar animações e exportar ortofotos, dentre outras.

Geralmente os objetos levantados por DSM são estáticos e utiliza-se somente uma câmera para a tomada fotográfica em diferentes posições. Atualmente, já existem programas que permitem registrar objetos em movimento ou que sofrem alterações/deformações ao longo do tempo. Como exemplo, pode-se citar o PhotoModeler Motion, que trabalha com dois tipos de situações: (1) múltiplas câmeras (duas ou mais) sincronizadas e estáticas; (2) uma câmera que se movimenta para levantamento do objeto de diferentes ângulos.

A Figura 14 apresenta três quadros de um vídeo de um modelo em malha TIN produzido a partir de múltiplas câmeras (estáticas, colocadas em diferentes posições para tomada de fotos em intervalos regulares), registrando as alterações do volume de areia ao longo do tempo.

Figura 14 - Quadros capturados de um vídeo gerado no PhotoModeler Motion mostrando o aumento de volume da areia ao longo do tempo



Fonte: Disponível em: <www.photomodeler.com>. Acesso em: 5 abr. 2014.

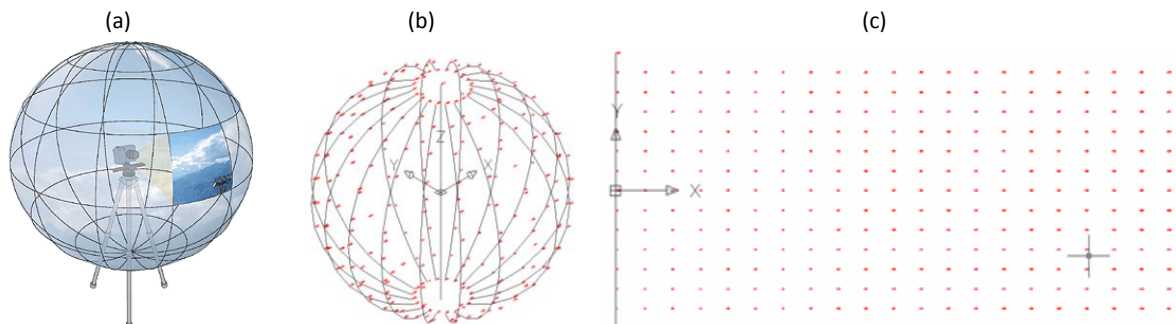
Além dessa aplicação é possível a utilização da técnica DSM para geração de modelos de "nuvens de pontos" e malhas TIN a partir de panoramas fotográficos ou vídeos (comuns ou imersivos) através de outras técnicas baseadas no princípio da fotogrametria, discutidas nas seções 2.3.8 e 2.3.9, respectivamente.

2.3.8 Fotogrametria esférica

A técnica da fotogrametria esférica, desenvolvida pelo professor italiano Gabriele Fangi¹⁶, consiste na utilização de panoramas fotográficos esféricos para fins métricos, semelhante ao funcionamento de um teodolito, que permite fornecer ângulos (horizontais e verticais) de um objeto.

Para a geração de cada panorama, devem ser utilizadas fotos tomadas de um mesmo ponto de vista e com áreas de sobreposição (geralmente 15 a 20%). Estas fotos devem ser "costuradas" por programas específicos (*stitching software*) e projetadas em uma esfera virtual, para o posterior mapeamento na projeção equirretangular¹⁷. Nesse tipo de projeção é possível fazer a correspondência entre as coordenadas x e y da imagem e as direções horizontais e verticais do objeto fotografado (Figura 15). Para que seja possível a obtenção das coordenadas tridimensionais dos objetos fotografados é necessária a utilização de mais de um panorama, tomados de diferentes pontos de vista (FANGI, 2010).

Figura 15 - (a) Panorama esférico; (b) pontos sobre uma esfera, na interseção dos meridianos e paralelos; (c) projeção equirretangular com marcação dos pontos correspondentes à superfície esférica (coordenadas x e y)



Fonte: Fangi (2011).

A Figura 16 ilustra as etapas básicas do processamento geralmente utilizadas com a fotogrametria esférica. A primeira fase consiste na tomada fotográfica, para a obtenção de fotos que serão usadas na geração dos panoramas esféricos. Depois de criados os panoramas esféricos em programas específicos (como o PTGui) e exportados na projeção equirretangular, inicia-se a fase de orientação dos mesmos. A orientação dos panoramas é

¹⁶ Professor da *Università Politecnica delle Marche*, Ancona, Itália.

¹⁷ Na projeção equirretangular, os polos da esfera são representados por segmentos correspondentes à circunferência da mesma (dimensão horizontal do retângulo), e o comprimento do meridiano corresponde à dimensão vertical do retângulo. Além da projeção equirretangular, é possível projetar o panorama esférico para as seguintes projeções: plana, cilíndrica, de mercator e cúbica, a depender da ferramenta utilizada.

realizada a partir da identificação de alguns pontos comuns (homólogos), juntamente com alguns procedimentos utilizando os programas PointsRecord, Sphera e Plot.

Figura 16 - Etapas básicas da fotogrametria esférica até a obtenção do modelo renderizado



Fonte: adaptado de Bronzini (2013)¹⁸.

Depois da obtenção da posição relativa entre os panoramas é possível realizar a restituição fotogramétrica no AutoCAD para geração dos modelos em "estrutura de arame"¹⁹ (*wireframe*). O modelo em *wireframe* serve como referência para a modelagem geométrica mais completa do objeto, incluindo a criação de superfícies e a representação de objetos ocultos aos panoramas (e que podem ser deduzidos de outras formas), realizada em programas específicos de modelagem geométrica - no caso de Bronzini (2013), o Sketchup. Após a modelagem geométrica, é possível realizar a fase final de acabamento (renderização), para associação de materiais, iluminação, plano de fundo, dentre outros, para a obtenção de um produto mais realístico.

Segundo Fangi (2011), a fotogrametria esférica apresenta uma série de vantagens em relação às técnicas tradicionais, como:

- obtenção de imagens de altíssima resolução (exemplo: 30.000 x 15.000 *pixels*), obtidas a partir da "costura" de um conjunto de fotos;

¹⁸ As imagens foram retiradas da apresentação da aluna Elisa Bronzini, realizada em 2013, de seu trabalho final do Curso de Graduação em *Ingegneria Edile*, da *Facoltà di Ingegneria* da *Università Politecnica delle Marche*, sob a orientação de prof. Gabriele Fangi. As fotografias foram levantadas no Pelourinho (Salvador - BA) pelo prof. Fangi em 2012.

¹⁹ Os modelos em "estrutura de arame", também chamados de *wireframe* ou "modelos de arestas", representam um modo de construção de objetos utilizando as arestas para definir seus limites. Esse assunto é abordado na seção 4.1.1.

- baixo custo, uma vez que utiliza equipamentos de uso geral (câmera fotográfica digital);
- campo de visão de 360 graus;
- possibilidade de associar pontos de controle obtidos por métodos topográficos para aumento da precisão;
- possibilidade de visualização interativa do panorama, a partir de programas específicos (exemplo: quicktime).

Como desvantagem desse método, pode-se citar a necessidade de identificação interativa das feições a serem restituídas e a obtenção de modelos geométricos em *wireframe*, que geralmente precisam ser pós-processados para obtenção dos produtos desejados.

Um exemplo de programa que permite gerar modelos de superfícies texturizados diretamente a partir de panoramas é o Autodesk ImageModeler (Figura 17). A partir da versão 2009, foi incluída a possibilidade de utilização de panoramas para modelagem interativa dos objetos fotografados, além das fotografias comuns usadas anteriormente.

Figura 17 - Modelagem sobre panoramas fotográficos no Autodesk ImageModeler

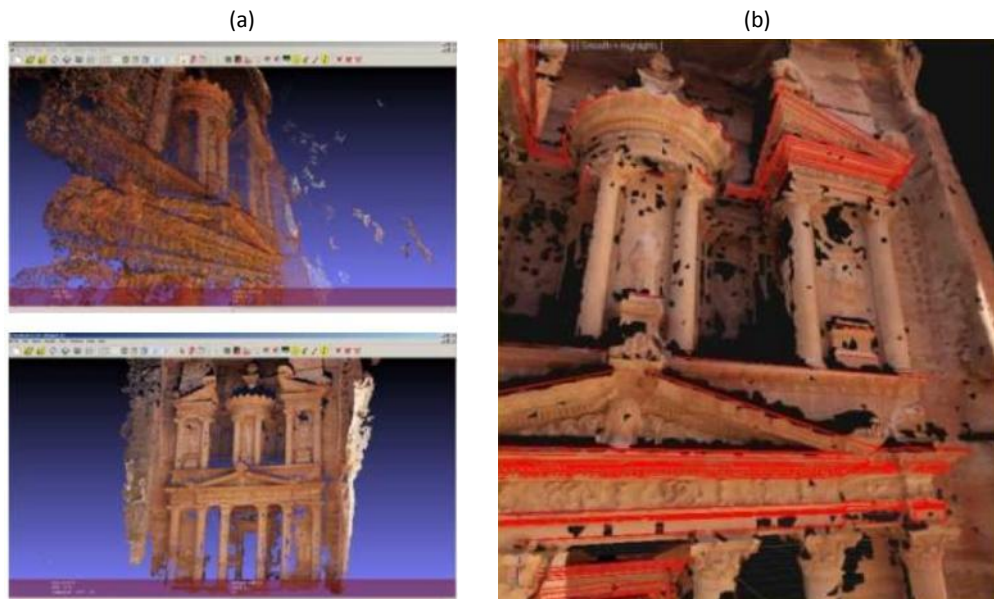


Fonte: Disponível em: <<http://download.autodesk.com/us/imagemodeler/video/imagemodeler3.mov>>. Acesso em: 5 maio 2014.

D'Annibale (2011) apresenta um novo método que permite a integração da Fotogrametria Esférica e a técnica *Dense Stereo Matching* - DSM (tratada pelo autor de *Structure from Motion*), visando combinar as vantagens de cada método.

O modelo de "nuvem de pontos" foi gerado de forma automatizada no pacote SFM Toolkit (Bundler + CMVS2 + PMVS2) a partir de panoramas do tipo "projeção plana" (e não equirretangular, usada na fotogrametria esférica). Esse modelo apresentou qualidade superior e com maior densidade de pontos em relação ao modelo gerado por fotografias comuns (Figura 18), dado ao aumento da resolução dos panoramas (5.120 x 5.120 *pixels*) em relação às fotos "comuns" (4.288 x 2.848 *pixels*).

Figura 18 - (a) "Nuvem de pontos" geradas por fotografias comuns (superior) e por panoramas planos (inferior); (b) sobreposição da malha triangular texturizada e da restituição gerada pela fotogrametria esférica (vermelho)



Fonte: D'Annibale (2011).

Segundo o autor, o uso do DSM permitiu criar um produto complementar aos dados restituídos pela Fotogrametria Esférica, facilitando a modelagem posterior e a obtenção de texturas fotorrealísticas (D'ANNIBALE, 2011).

Além da obtenção de modelos geométricos em *wireframe* e da possibilidade de integração com o DSM para geração de "nuvens de pontos", os panoramas fotográficos mapeados para o tipo "projeção plana"²⁰, podem ser utilizados para geração de imagens retificadas de objetos ou fachadas extensas predominantemente planas.

2.3.9 Videogrametria

Nos últimos anos, a utilização de vídeos para reconstrução tridimensional tornou-se mais comum. Destacam-se as técnicas automatizadas para obtenção de modelos geométricos

²⁰ No tipo projeção plana, as linhas retas do objeto real são representadas sem distorções.

tridimensionais a partir de vídeos realizados por câmeras digitais não calibradas (KWIATEK; TOKARCZYK, 2014).

O processo de utilização de vídeos para levantamento de informações métricas é chamado de Videogrametria. Segundo Gruen (1997), a Videogrametria é uma subcategoria da Fotogrametria e da visão computacional, para o levantamento de grande quantidade de informações, de modo rápido e automatizado. O objeto deve ser registrado por um determinado número de quadros, tomados de diferentes posições. Se o objeto for estático, é possível a utilização de uma única câmera de vídeo que se movimenta para o registro completo do mesmo de diferentes ângulos. Se o objeto estiver em movimento, são necessárias mais de duas câmeras para o registro simultâneo do mesmo de diferentes posições. Há ainda a possibilidade do objeto ser rotacionado visando seu registro completo por uma câmera de vídeo estática.

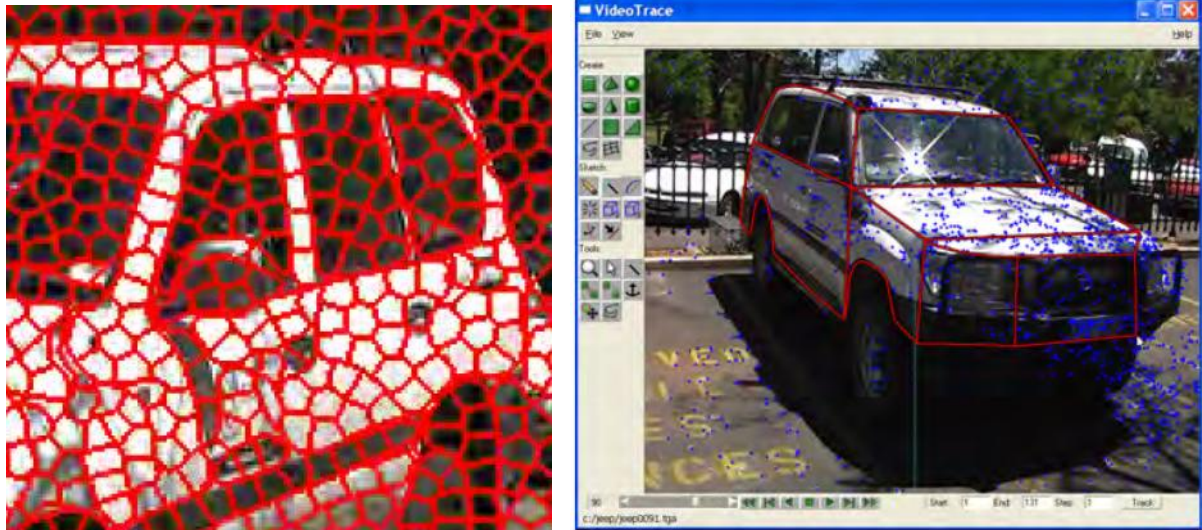
Foram identificados exemplos de modelagem geométrica de diferentes tipos de objetos a partir de vídeos, utilizando desde ferramentas interativas e *offline*, a automatizadas, em tempo real e *online*. Há também uma variedade de tipos equipamentos, como as *webcams*, as câmeras de vídeo tradicionais, até as mais sofisticadas, como as câmeras de vídeo imersivas²¹.

Os autores Hengel e colaboradores (2007) abordam o funcionamento da ferramenta VideoTrace (Figura 19). A primeira etapa consiste na reconstrução automática dos parâmetros e do posicionamento da câmera (na aquisição de cada quadro) e geração de uma "nuvem de pontos" esparsa, processo conhecido como a técnica "*Structure and Motion*". Depois há o processo de segmentação de cada quadro para formação de *superpixels*. Esses agrupamentos de *pixels* aceleram o processo de detecção e associação de feições nos vários quadros. A fase seguinte consiste no traçado interativo das feições de interesse em alguns quadros. As feições traçadas em determinado quadro são projetadas para os quadros visualizados posteriormente, o que permite a complementação e o

²¹ Câmera de vídeo imersiva é um sistema formado por múltiplas câmeras, onde cada uma aponta para um determinado ângulo, permitindo capturar, simultaneamente, 10 a 30 quadros por segundo (por cada câmera), gerando panoramas com campo de visão horizontal de 360 graus, armazenados em formato de vídeo (Kwiatek; Tokarczyk, 2014). O campo de visão vertical depende do posicionamento das câmeras de cada tipo de sistema.

refinamento do modelo (HENGEL et al., 2007). Ao final, é produzido um modelo de superfícies com foto-textura aplicada.

Figura 19 - Modelagem de um veículo com a ferramenta VideoTrace: (a) segmentação inicial para geração dos "superpixels"; (b) "nuvem de pontos" esparsa projetada sobre o quadro e o traçado realizado interativamente



Fonte: Hengel e colaboradores (2007).

Kwiatk e Tokarczyk (2014) tratam de técnica que permite a obtenção rápida de modelos geométricos a partir de vídeos imersivos²². O vídeo imersivo envolve o registro de uma cena (objeto ou ambiente) usando um vídeo com campo de visão de 360°. Esses autores apresentam um sistema formado pelo conjunto de múltiplas câmeras dispostas com uma determinada angulação (fixa) entre si, que permite criar de 10 a 30 quadros por segundo, formando vídeos panorâmicos de média resolução. Esse sistema é chamado de câmera de vídeo imersiva, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 - Exemplos de câmeras de vídeo imersivas: (a) Ladybug®3; (b) Panono camera; (c) 360Heros



Fonte: Kwiatek e Tokarczyk (2014, p. 211).

²² Vídeos imersivos são vídeos com campo de visão horizontal de 360 graus, formados por diversos quadros por segundo no formato de panoramas. Algumas aplicações de vídeos imersivos incluem filmes em planetários, telas 360 graus ou apresentações interativas. A forma tradicional de gerar vídeos imersivos era através de lentes do tipo olho de peixe, apresentando, no entanto, baixa resolução.

Todos os vídeos devem ser filmados simultaneamente, devendo ser costurados (*stitched*) para gerar o vídeo 360°. Para a correta costura dos vídeos é necessário calibrar as câmeras, visando criar um cilindro ou esfera virtual, a depender do dispositivo, se câmera de vídeo cilíndrica ou esférica, respectivamente.

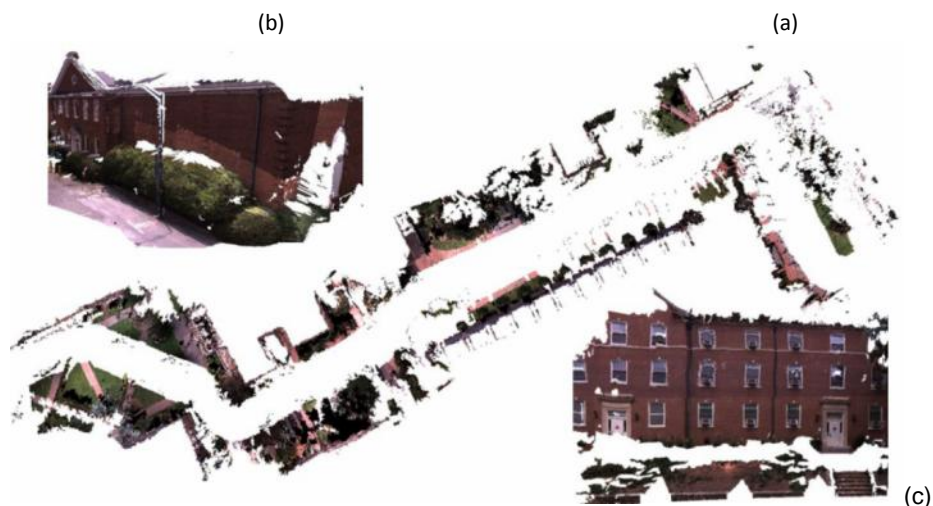
A Figura 21 ilustra o modelo geométrico de um trecho do claustro da Igreja de São Francisco de Assis, na Polônia, obtida no *software* Agisoft Photoscan, através de panoramas extraídos de vídeos imersivos.

Figura 21 - Geração do modelo geométrico de um trecho do claustro no Agisoft Photoscan: (a) "nuvem de pontos"; (b) malha triangular com posicionamento dos panoramas 360° (em azul)



Fonte: Kwiatek e Tokarczyk (2014).

Figura 22 - "Nuvem de pontos" de um trecho urbano obtida através do processamento de vídeos: (a) vista superior de toda a área levantada; (b) e (c) visualização em maior detalhe de algumas edificações



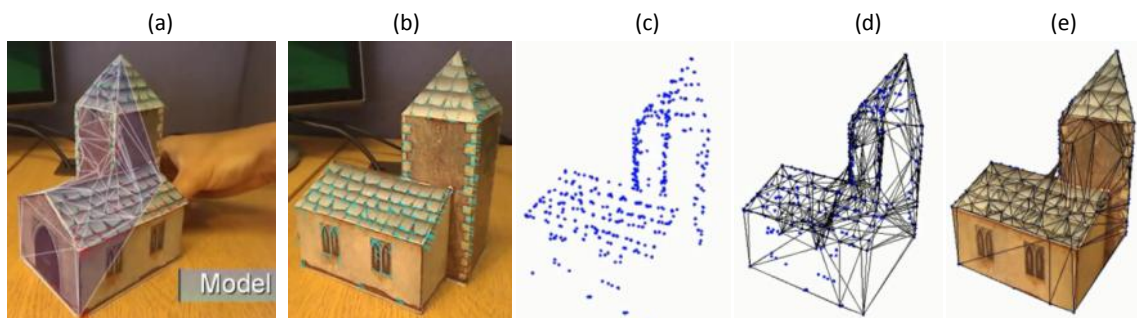
Fonte: Pollefeys e colaboradores (2008).

Pollefeys e colaboradores (2008) apresentam um levantamento de um trecho urbano (Figura 22) realizado com um sistema formado por múltiplas câmeras (um total de oito), juntamente

com as unidades GNSS e de medição inercial²³ instaladas em um veículo. Os autores afirmam que esse sistema é capaz de criar modelos geométricos de áreas urbanas de modo rápido e com a precisão em torno de poucos centímetros.

Outro exemplo de modelagem geométrica por vídeo pode ser visto no programa ProFORMA (*Probabilistic Feature-based On-line Rapid Model Acquisition*), através de processos *online*, mais automatizados e em tempo real. Nesse caso, a câmera de vídeo (*webcam* ou outra câmera conectada ao computador) é estática e o objeto é rotacionado para permitir seu registro completo. A modelagem é realizada praticamente em tempo real, à medida em que o objeto é movimentado. As etapas principais de processamento são: rastreamento de feições, reconstrução da geometria da câmera e do objeto (em "nuvem de pontos"), triangulação e aplicação de foto-textura (Figura 23).

Figura 23 - Etapas de criação do modelo: (a) rotação do objeto; (b) rastreamento de feições do objeto à medida em que é movimentado; (c) "nuvem de pontos"; (d) triangulação; (e) aplicação de foto-textura



Fonte: Proforma (2009).

2.3.10 3D laser scanning

A técnica *3D laser scanning* permite realizar a varredura das superfícies externas dos objetos (visíveis pelo olho humano), sendo adequada para o levantamento rápido e preciso de objetos de diferentes dimensões e níveis de complexidade.

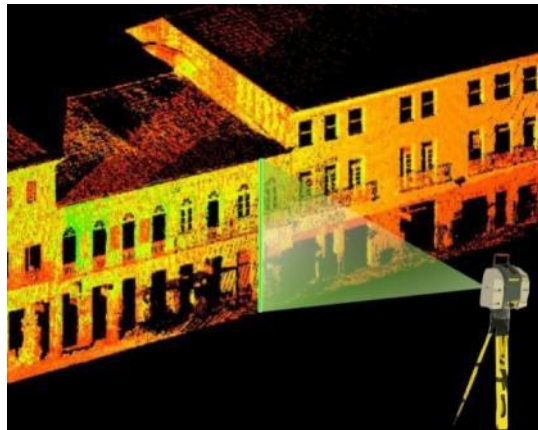
Há grande diversidade de tipos de aparelhos *laser scanners* disponíveis no mercado, que variam em função da tecnologia utilizada - tempo de voo, diferença de fase ou triangulação - ou do posicionamento do sistema - terrestres ou aerotransportados. A escolha do sistema depende, essencialmente, do tamanho do objeto a ser levantado e da distância entre o

²³ As unidades GNSS e de medição inercial são encarregadas de ajustar o modelo de "nuvem de pontos" em coordenadas georreferenciadas, sendo a primeira usada para determinação da posição da câmera e a segunda para o registro da inclinação do sensor à medida em que há o deslocamento do sistema.

objeto e o equipamento. Outros fatores que influenciam são o custo do equipamento, o tempo de levantamento e a precisão da "nuvem de pontos" a ser gerada, dentre outros.

Seu funcionamento baseia-se na emissão e reflexão do feixe de laser na direção do objeto a ser registrado (Figura 24). Ao atingi-la, parte do sinal laser é refletido na direção do sensor, onde é possível a medição da distância. Esse procedimento é repetido até a varredura completa da superfície, o que acontece de modo muito rápido, através de feixes de raio laser direcionados com o auxílio de espelhos giratórios, que permitem capturar grande quantidade de pontos por segundo, gerando o modelo de "nuvem de pontos".

Figura 24 – Representação esquemática do *scanner* terrestre em funcionamento para obtenção da "nuvem de pontos"



Fonte: Groetelaars e Amorim (2013a).

A "nuvem de pontos" (*point cloud*) é o produto básico obtido pela varredura a laser, que geralmente precisa ser processado para obtenção de outros tipos de modelos, assim como acontece com a técnica *Dense Stereo Matching*. A etapa de processamento da "nuvem de pontos" é a que demanda mais tempo do levantamento, uma vez que exige bastante interação humana para geração de outros produtos, além da habilidade e sensibilidade do operador na interpretação e modelagem da geometria do objeto.

O *3D laser scanning* permite realizar também o levantamento fotográfico, através de câmeras integradas ao equipamento, para facilitar o entendimento das informações registradas e permitir a geração de texturas realísticas.

A varredura a laser apresenta uma série de vantagens em relação às técnicas tradicionais de levantamento cadastral, dentre elas pode-se citar:

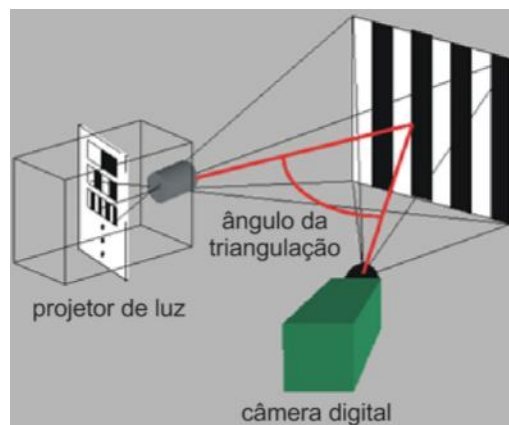
- precisão, que pode variar do centímetro em *laser scanner* aerotransportado (no levantamento de cidades) ao submilímetro, dependendo do equipamento, da técnica usada e da distância para o objeto;
- tempo reduzido para o levantamento de grande quantidade de informação e diminuição ou eliminação da necessidade de retorno ao campo para a obtenção de novos dados (muito comum no levantamento tradicional), além da possibilidade de se trabalhar na ausência de luz;
- a "nuvem de pontos" fica armazenada e pode ser utilizada posteriormente para se obter novos produtos, ou ainda, para se verificar ou refinar (detalhar) modelos criados anteriormente.

2.3.11 Luz estruturada

O sistema de luz estruturada, ou luz branca, baseia-se na análise da distorção sofrida pelo objeto quando submetido à projeção de um determinado padrão (codificação) de luz com características conhecidas. Essa distorção é capturada por uma câmera fotográfica digital e sua análise é realizada por um *software* específico, que gera o modelo de "nuvem de pontos" à medida em que o objeto é escaneado.

O princípio de funcionamento é baseado na triangulação entre a câmera, o ponto de luz e o objeto. Como a distância entre a câmera digital e a fonte de luz, bem como seus ângulos de inclinação, tem valores conhecidos (calibrados), é possível calcular a distância para o objeto através da triangulação (Figura 25).

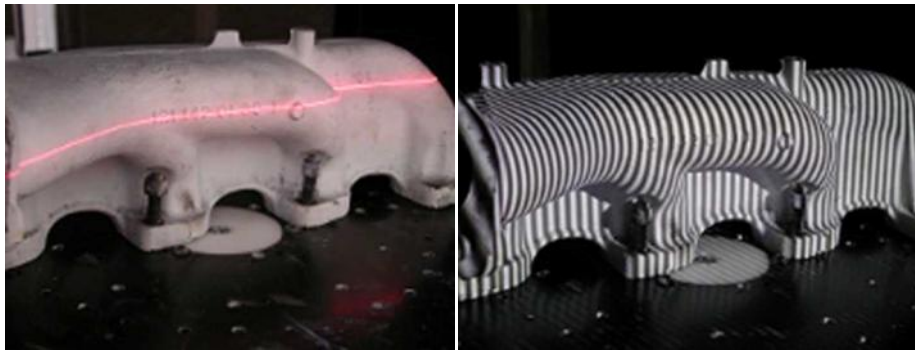
Figura 25 - Princípio de funcionamento do sistema de luz estruturada



Fonte: adaptado de Klaas, Erben e Zinck (2009).

A Figura 26 ilustra a comparação entre um escaneamento a laser e outro por luz estruturada, ambos realizados com o princípio da triangulação. No caso do *laser scanner* (de triangulação), a forma mais comum é a projeção de uma linha laser sobre uma parte do objeto. A câmera registra a linha laser e calcula a forma tridimensional da faixa iluminada (seção). O registro é realizado faixa a faixa até a varredura de todo o objeto. No sistema de luz estruturada, a câmera registra o padrão inteiro projetado e, através da análise das deformações das linhas projetadas no objeto, é possível calcular as distâncias e gerar o modelo de "nuvem de pontos" no computador. A precisão do modelo está relacionada ao afastamento das faixas representadas no padrão de luz. Para aumentar a resolução da "nuvem de pontos", devem ser projetados diferentes padrões sobre o objeto, e o mesmo precisa ser escaneado de diferentes ângulos, para sua cobertura completa.

Figura 26 - Comparação entre o escaneamento a laser (esquerda) e por luz estruturada (direita) de uma mesma peça



Fonte: Disponível em: <<http://www.globalinspectionssolutions.com>>. Acesso em: 5 maio 2014.

O mecanismo de projeção de um padrão sobre a superfície a ser levantada faz com que a varredura de pequenos objetos seja geralmente mais rápida em sistema de luz estruturada do que em *scanner* a laser. Além disso, como a luz projetada é branca, não há necessidade de cuidados especiais de segurança, ao contrário de sistemas de varredura a laser, que possui tipos de radiação que podem representar perigo à saúde (REISS, TOMMASELLI, 2003).

A Figura 27 ilustra o sistema HDI Advance R3 (pro), que possui alcance de 0,4 a 5 m, e realiza o registro de 2,6 milhões de pontos por escaneamento, o qual dura 0,88 segundos. Permite uma resolução de 0,075 mm e a precisão é em torno de 0,050 mm.

Figura 27 - O sistema HDI Advance R3 (pro) durante um escaneamento, permitindo o registro da forma no *software* FlexScan3D PRO



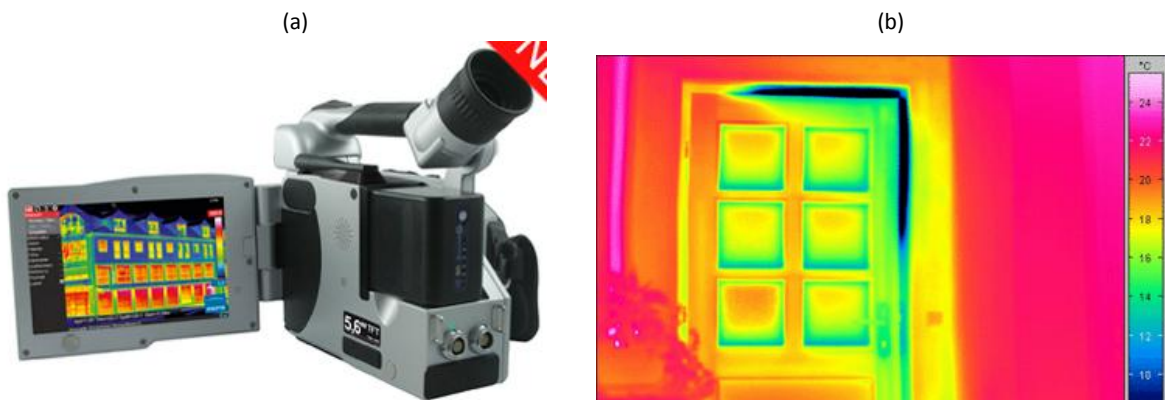
Fonte: Disponível em: <<http://www.globalinspectionolutions.com>>. Acesso em: 5 maio 2014.

Depois da apresentação do estado da arte das técnicas de levantamento das superfícies externas dos objetos, são tratadas nas próximas seções, os principais métodos não destrutivos para aquisição de informações ocultas dos elementos construtivos: termografia infravermelho, georradar e radiografia (por raios X e raios gama).

2.3.12 Termografia infravermelho

Termografia é uma técnica não destrutiva que permite o registro e a medição da radiação infravermelho emitida pelos objetos, sem contato físico com os mesmos. O registro da variação de temperatura é realizado por câmeras termográficas, que transformam a radiação térmica emitida pelo objeto em imagem térmica ou termograma (onde cada cor representa uma temperatura), conforme pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 - (a) Câmera termográfica VariCAM HD inspect 900; (b) termograma ilustrando problemas de isolamento térmico na região da porta (regiões mais frias na cor azul, conforme legenda)

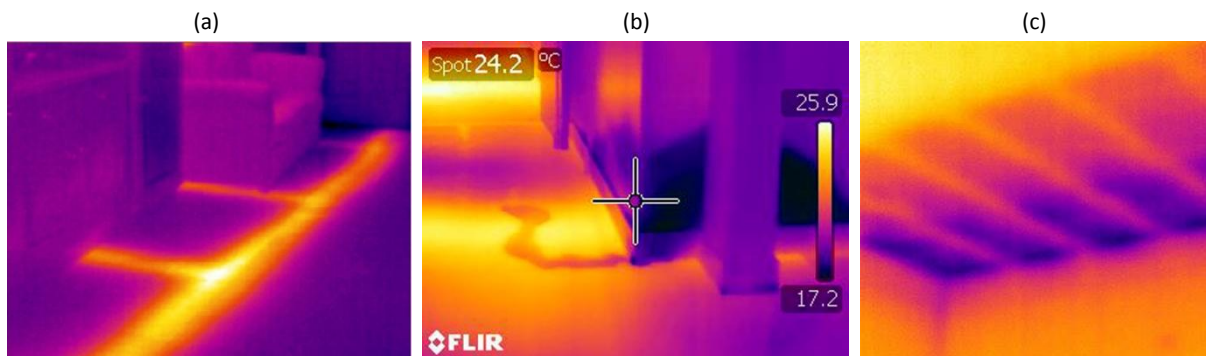


Fonte: Disponível em: <<http://www.infratec.eu>>. Acesso em: 8 maio 2014.

O princípio da termografia infravermelho baseia-se no fenômeno físico em que qualquer corpo, em uma temperatura acima do zero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$ ou 0°K), emite radiação térmica.

A termografia infravermelho pode ser usada para diversas aplicações, como na medicina, no auxílio ao diagnóstico de doenças, na indústria, para análise de máquinas e componentes, na construção civil, para a detecção de vazamentos. Na conservação do patrimônio histórico, pode ser usada como instrumento de identificação de anomalias e auxílio ao diagnóstico de patologias, de identificação de elementos estruturais ocultos, localização de dutos e tubulações, de análise das condições de conservação e detecção de problemas causados pela deterioração de materiais, pela infiltração, presença de umidade, etc. (CORTIZO, 2007). Alguns exemplos de imagens termográficas em edificações podem ser vistos na Figura 29.

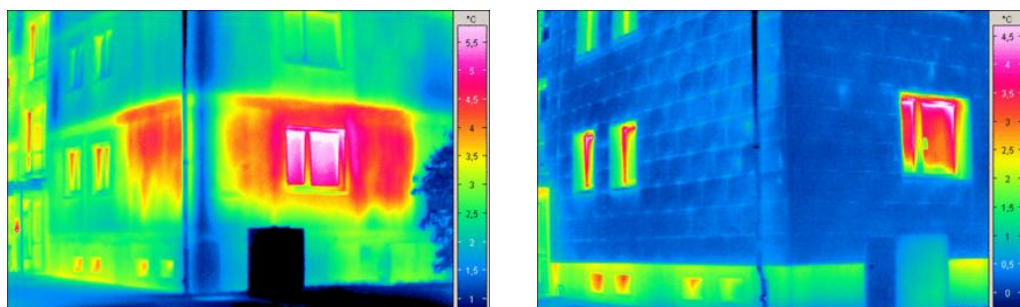
Figura 29 - Exemplos de imagens termográficas em edificações: (a) identificação das tubulações de aquecimento no piso; (b) zonas de infiltração (mais escuras); (c) localização de elementos estruturais ocultos no forro e áreas com menor isolamento térmico (mais escuras)



Fonte: (a) www.thermalimaging.ie; (b) www.kootenayinfrared.ca; (c) www.esltd.co.uk. Acesso em: 8 maio 2014.

A termografia pode ser usada como apoio à realização de projetos de reforma/restauração de edificações, permitindo identificar e comparar áreas antes e após a intervenção, conforme mostra a Figura 30.

Figura 30 - Termogramas de uma edificação antes e após a restauração



Fonte: Disponível em: <http://www.infratec.eu>. Acesso em: 8 maio 2014.

A termografia pode ser classificada do ponto de vista de estímulo térmico em ativa e passiva. Na técnica passiva, nenhum estímulo²⁴ (artificial) é necessário, uma vez que existe diferença de temperatura entre o objeto de interesse e o ambiente. Na termografia ativa, há o emprego de estímulo térmico antes da captura das imagens, que pode ser tanto o aquecimento ou o resfriamento de determinados materiais para gerar fluxo de calor e gradiente térmico necessário. Segundo Santos (2010), o tipo de estímulo térmico a ser utilizado depende das características do objeto a ser estudado e do tipo de informação requerida.

Nas edificações, predominam-se os levantamentos com uso da termografia passiva, pela dificuldade de excitação térmica artificial, e por não apresentar qualquer risco às mesmas, especialmente às históricas²⁵ (CORTIZO, 2007).

Segundo Dutesco (2006, p. 24), apesar de muitas vantagens na inspeção de objetos e edificações, a termografia é muito sensível às condições ambientais, como variações térmicas durante a aquisição dos dados. Não apresenta bons resultados em superfícies altamente reflexivas e tem limitações na inspeção de camadas mais profundas dos materiais.

2.3.13 Georradar

O Georradar ou radar de penetração no solo (*Ground Penetrating Radar* - GPR) é método geofísico, não destrutivo, que visa capturar informações das estruturas internas dos objetos (paredes, pisos, camadas sob o solo, etc.), utilizando para isso, ondas eletromagnéticas na faixa da radiofrequência.

O sistema GPR é composto basicamente por uma unidade de controle e por duas antenas, uma transmissora e uma receptora²⁶, dispostas na superfície do objeto de estudo. A antena transmissora emite pulsos de ondas²⁷ fixas sobre o objeto, que podem penetrar diversos materiais (naturais ou artificiais). Quando uma onda atinge um trecho do objeto com

²⁴ Sendo possível a presença do estímulo da energia solar, que é uma fonte natural de calor.

²⁵ Uma carga térmica adicional pode acelerar o processo patológico de uma edificação histórica (CORTIZO, 2007).

²⁶ Em sistemas mais compactos, essas unidades estão reunidas em um único equipamento.

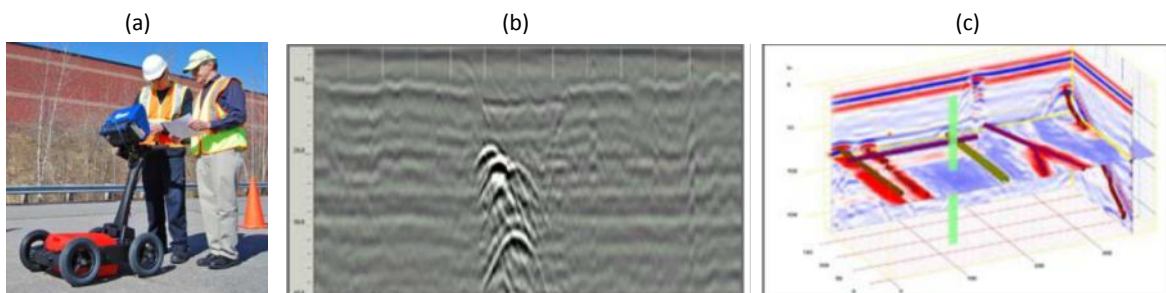
²⁷ Dependendo da finalidade, do tipo de objeto e da profundidade desejada de levantamento, as ondas podem ser de alta frequência, para uma melhor resolução das informações (mas menor profundidade), ou de baixa frequência, permitindo a aquisição de dados em camadas de maior profundidade, mas com menor precisão das informações. É muito comum, a utilização de frequências variadas em um mesmo levantamento, visando um "equilíbrio" entre profundidade e precisão.

diferentes propriedades elétricas, a antena receptora detecta essas variações e as registra no sinal de retorno (FIDLER, 2007). Os sinais recebidos são visualizados na unidade de controle, simultaneamente, na medida em que o equipamento se movimenta na área de interesse.

Os dados do GPR são apresentados na forma de radargramas, que registram seções do trecho investigado. Cada posição de medida em superfície contempla um traço, o qual representa o registro das amplitudes dos sinais captados a partir da emissão de um único pulso por parte do Georradar, associadas ao período compreendido entre sua transmissão e captação. Conhecendo-se as velocidades de propagação da onda no meio, pode-se obter, a partir dos tempos das ondas refletidas identificados no radargrama, a profundidade de cada interface prospectada (ALVES, 2011).

O georradar apresenta aplicações em diversas áreas, como indústria de mineração, geotecnia e estudos ambientais, aplicações militares, construção civil, Arqueologia e patrimônio arquitetônico (BARRACA, 2013). A Figura 31 ilustra um tipo de GPR usado para inspeção de uma via, e exemplos de produtos gerados, desde radargramas (visualizados em tempo real durante a aquisição) até modelos processados para visualização de informações tridimensionais levantadas.

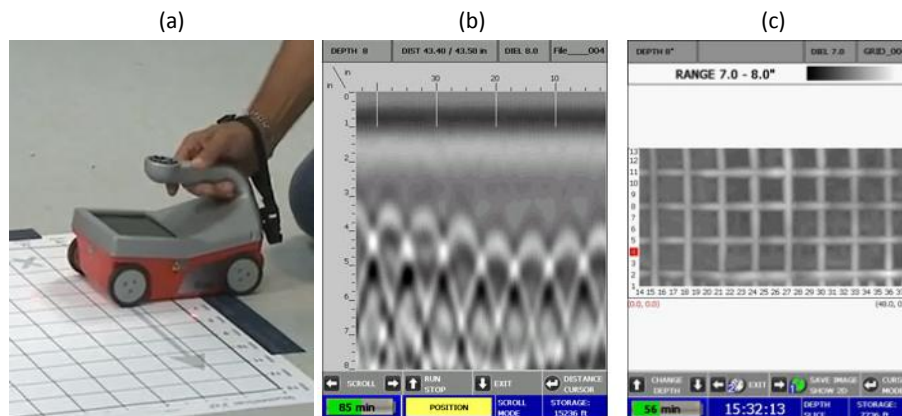
Figura 31 - (a) Equipamento GPR (UtilityScan da GSSI) na inspeção de uma estrada; (b) exemplo de radargrama; (c) modelo processado com informações tridimensionais da área levantada



Fonte: Disponível em: <<http://www.geophysical.com/Documentation/Brochures/GSSI-UtilityScanBrochure.pdf>>. Acesso em: 9 mai. 2014.

Outro exemplo de equipamento GPR mais compacto pode ser visto na Figura 32, específico para inspeção em lajes, paredes, localização de tubulações, verificação das estruturas de concreto, etc.

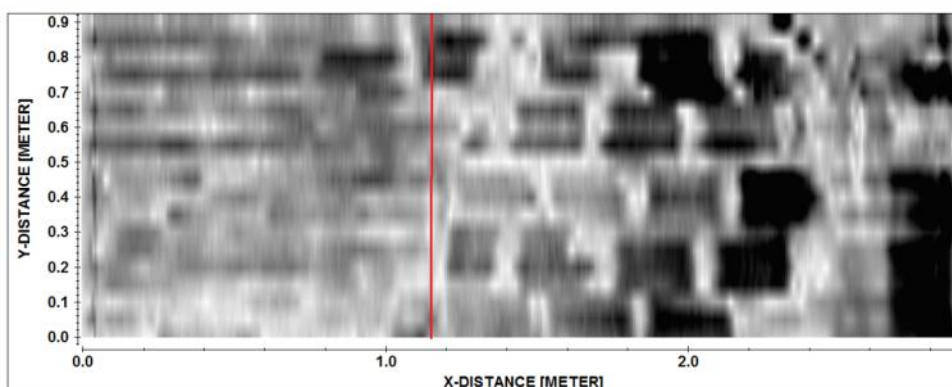
Figura 32 - (a) Equipamento GPR (StructureScan™ Mini da GSSI) na inspeção de uma laje; (b) radargrama visualizado em tempo real; (c) dado processado para melhor visualização das informações da laje (semelhante a um raio x)



Fonte: Disponível em: <<http://www.geophysical.com/structurescanmini.htm#nogo>>. Acesso em: 9 mai. 2014.

O GPR vem sendo usado, cada vez mais, para o estudo das superfícies ocultas das edificações, para análise estrutural ou como forma de obtenção de informações que subsidiarão as intervenções posteriores. Uma forma interessante de visualização dos dados levantados por GPR em uma parede pode ser vista na Figura 33, onde é possível verificar dois tipos de alvenarias (separados por uma linha vermelha), bem como a presença de um pilar (à direita). Os dados de GPR foram processados e apresentados na forma de "Time Slices", que representa um corte efetuado no objeto capturado a uma determinada profundidade, de acordo com o valor de tempo especificado pelo operador.

Figura 33 - Exemplo de "Time Slice" de uma parede, mostrando diferentes tipos de alvenaria



Fonte: Barraca (2013, p. 54).

2.3.14 Radiografia (por raios X e gama)

Os raios X e gama são formas de radiação eletromagnética de alta frequência e pequeno comprimento de onda, que permitem atravessar corpos opacos como, concreto, metal, madeira e tubulação.

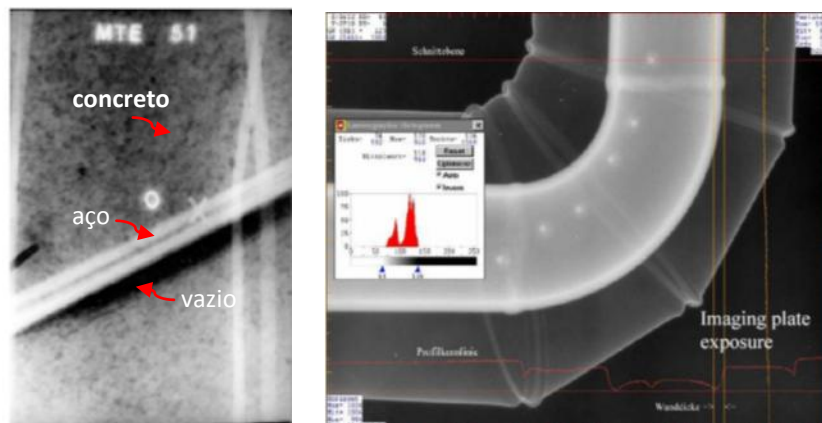
A radiografia é um tipo de ensaio não destrutivo que se baseia na absorção diferenciada da radiação (por raios X ou gama²⁸) penetrante no objeto inspecionado. Essa variação de absorção depende da espessura e densidade do material em pontos específicos, permitindo registrar descontinuidades, alterações ou diferentes materiais constituintes do objeto. As regiões mais claras representam elementos de maior densidade.

Esse método permite detectar uma série de características no interior dos objetos, como porosidade, vazios, inclusões, materiais metálicos, instalações, presença de fendas, ataques biológicos ou outras patologias, sobre a forma de registros radiográficos bidimensionais.

A realização do ensaio radiográfico necessita de uma fonte de radiação (raios X ou gama), de um objeto e de um meio de registro. Dependendo da tecnologia utilizada, a imagem pode ser registrada em filme radiográfico, visualizada em monitores ou televisores, ou detectada e monitorada eletronicamente através do equipamento (CARVALHO, 2010).

Alguns exemplos de aplicação da radiografia podem ser vistos nas Figuras 34 e 35, associadas às áreas de construção civil, indústria e artes, respectivamente.

Figura 34 - (a) Filme radiográfico ilustrando o interior de estrutura de concreto; (b) radiografia computadorizada com o registro de uma tubulação com isolamento



Fonte: (a) adaptado de Breyse (2012); (b) Aquino (2009).

²⁸ A radiografia que utiliza raios gama é conhecida como gamagrafia. Tem uso mais frequente na área industrial e construção civil. Segundo Aquino (2009), os equipamentos para gamagrafia são mais simples, com menores dimensões e custo, se comparado aos de raios X. Além disso, pode ser utilizada em locais remotos e sem uso de energia elétrica.

Figura 35 - (a) Fotografia da obra de Giovanni da Milano²⁹; (b) raio X da pintura ilustrando diferentes camadas de pintura e características dos traços



Fonte: Gilardoni, Orsini e Taccani (1977).

Apesar de ser um método que permite fornecer resultados com grande precisão³⁰ e para uma gama de aplicações (medicina, área industrial³¹, construção civil, patrimônio cultural, etc.), é importante citar algumas de suas desvantagens e/ou limitações:

- a radiação representa perigo à saúde humana, o que requer cuidados especiais de radioproteção e isolamento da área de risco;
- custo elevado, se for necessária inspeção de largas áreas, especialmente com raios X;
- necessidade de acesso às duas faces do objeto, uma vez que a técnica baseia-se na transmissão de raios;
- limitação na profundidade de inspeção³²;
- pequenas áreas podem ser inspecionadas por vez, devido a limitação do meio de registro.

Além dessas, a radiografia apresenta limitações para detecção de características (como trincas) orientadas a determinados ângulos em relação ao eixo do feixe de radiação, uma vez que os registros radiográficos são bidimensionais. No entanto, o uso de registros realizados de diferentes posições podem ser usados para determinação da localização tridimensional mais precisa dos objetos.

²⁹ Obra "The Redeemer", século XIV.

³⁰ Segundo Kumar (2013) a sensibilidade dos raios X é aproximadamente 2% da espessura do material.

³¹ A gamagrafia é muito utilizada em refinarias e plantas petroquímicas para avaliações de integridade de tubulações.

³² Segundo Breyse (2012), o limite de profundidade de inspeção com uso de raios gama é de 60 cm e dos raios X é de 120 cm.

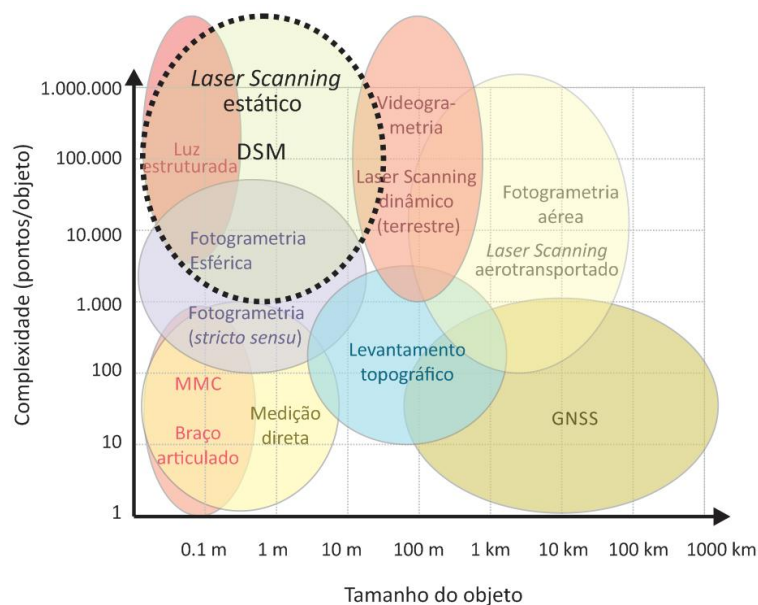
De todas as limitações, a periculosidade do método e o alto custo para inspeção em largas áreas são os fatores que mais restringem sua utilização, sendo aplicada em situações específicas, quando outros métodos não são eficazes.

2.3.15 Discussão sobre as técnicas de levantamento

A partir da descrição das diversas técnicas de levantamento disponíveis atualmente, é importante uma análise crítica das mesmas, visando dar subsídios à escolha das mais adequadas a determinadas situações. De modo geral, esta definição está relacionada a uma série de aspectos, dentre os quais se destacam:

- objetivos e tipos produtos requeridos para o levantamento, incluindo nível de detalhe e precisão dos resultados;
- características do objeto, como extensão, altura, complexidade, materiais de acabamento das superfícies externas, obstáculos existentes, acessibilidade, etc.;
- habilidade e conhecimento técnico da equipe que efetuará o levantamento;
- recursos financeiros e tecnológicos (*hardware* e *software*) disponíveis;
- tempo disponível para a aquisição e processamento dos dados, dentre outros.

Figura 36 - Comparação das técnicas de levantamento em relação ao tamanho (escala) e a complexidade do objeto, com destaque para o *Laser Scanning* estático (terrestre) e o DSM



Fonte: adaptado³³ de Barber, Mills e Andrews (2011).

³³ Foram incluídas nessa figura diversas técnicas não tratadas pelos autores Barber, Mills e Andrews (2011), como DSM, luz estruturada, braço articulado, MMC, Fotogrametria Esférica e Videogrametria.

Um interessante método de classificação das técnicas de levantamento, fruto do cruzamento de dados relativos à escala de representação (relacionado com o tamanho do objeto) e ao número de medições necessárias para o registro do objeto (relacionado à complexidade do objeto) é descrito pelos autores Barber, Mills e Andrews (2011). A Figura 36 ilustra a distribuição das técnicas associadas ao tamanho e à complexidade dos objetos, incluindo todos os métodos de levantamento apresentados nesse capítulo, com destaque para o *Laser Scanning* estático (terrestre) e o DSM, pela maior abrangência no levantamento na escala da edificação, sendo mais vantajoso, principalmente, em casos de maior complexidade dos objetos.

As técnicas de medição direta, levantamento topográfico e GNSS são mais adequadas para o registro de objetos com pouca complexidade, dada a lentidão dos processos de medição. Em situações que exigem o levantamento de grande quantidade de informações e a geração de uma maior variedade de produtos, essas técnicas geralmente são usadas de modo complementar a métodos mais adequados, como a fotogrametria digital e a varredura a laser.

A fotogrametria digital (em seu sentido mais amplo, incluindo as outras técnicas baseadas no processamento de imagens fotográficas) e o *3D laser scanning*, ambos na categoria terrestre, podem ser usados no levantamento de objetos com dimensões compatíveis com a medição direta (ou superior), mas permitindo uma quantidade significativamente maior de informações registradas (objetos mais complexos) e onde são requeridos maiores níveis de detalhe e precisão.

A aerofotogrametria e o *3D laser scanning* aerotransportado podem ser usados para o levantamento de centros urbanos ou áreas rurais. Apesar do GNSS poder ser usado no registro de áreas semelhantes, este apresenta muitas limitações, se comparado à fotogrametria e à varredura a laser, devido ao elevado tempo necessário para obtenção das informações e que, em muitos casos, são inacessíveis por esse método. Assim, o GNSS geralmente é usado como técnica auxiliar na obtenção de pontos de controle em áreas mais extensas, ou como forma de permitir a determinação de sistema de referência dos dados obtidos por plataformas dinâmicas, sejam terrestres ou aerotransportadas.

Para melhor compreensão dos critérios de escolha da técnica em função das características do levantamento, elaborou-se o Quadro 4, considerando a escala da edificação (incluindo detalhes arquitetônicos).

Quadro 4 - Alguns critérios para escolha da técnica em função das características do levantamento

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO LEVANTAMENTO	TÉCNICAS MAIS INDICADAS
Rapidez na aquisição de grande quantidade de dados (pequenos objetos)	3D Laser Scanning (triangulação), luz estruturada
Rapidez na aquisição de grande quantidade de dados (objetos de tamanho médio ou grande)	3D Laser Scanning (diferença de fase ou tempo de voo)
Precisão dos dados levantados e alto nível de detalhe (objetos complexos de tamanho pequeno)	3D Laser Scanning, luz estruturada, DSM
Precisão dos dados levantados e alto nível de detalhe (objetos complexos de tamanho médio ou grande)	3D Laser Scanning
Equipamentos de baixo custo (formas simples)	Medição direta
Equipamentos de baixo custo (formas de média complexidade)	Fotogrametria <i>stricto sensu</i>, Fotogrametria Esférica
Equipamentos de baixo custo (formas de alta complexidade)	DSM
Levantamento completo do interior de edificações	Medição direta, 3D Laser Scanning
Registro de objetos com materiais transparentes ou reflexivos (formas simples de pequenas dimensões)	Medição direta
Registro de objetos com materiais transparentes ou reflexivos (formas complexas de pequenas dimensões)	MMC, braço articulado, Fotogrametria <i>stricto sensu</i>
Registro de objetos com materiais transparentes ou reflexivos (formas complexas de tamanho médio ou grande)	Fotogrametria <i>stricto sensu</i>, Fotogrametria Esférica
Necessidade de modelos geométricos (3D) detalhados de formas irregulares	3D Laser Scanning, luz estruturada, DSM
Necessidade de ortofotos ou modelos geométricos texturizados de elevada qualidade	Fotogrametria <i>stricto sensu</i>, DSM
Uso reduzido de imagens para restituição fotogramétrica de objetos de grandes dimensões e com elevado detalhamento	Fotogrametria Esférica
Levantamento rápido de extensas áreas	3D Laser scanning (dinâmico), Videogrametria
Levantamento de objetos em movimento	DSM (procedimentos específicos)
Contato próximo com a edificação para observação de materiais, funcionamento das peças/esquadrias	Medição direta
Obtenção de pontos de controle com precisão	Levantamento topográfico
Levantamento do terreno	Levantamento topográfico, 3D laser scanning

Fonte: elaboração da autora.

Considerando-se os critérios de rapidez aliada à precisão na captura de grande quantidade de informações de edificações inteiras (interior e exterior), a técnica mais adequada é o *3D Laser Scanning*. Suas vantagens em edificações complexas e de grandes dimensões permitem superar a desvantagem do custo (inicial ou aparentemente alto) da contratação do serviço de varredura³⁴. As desvantagens das técnicas tradicionais (medição direta) nesses casos são grandes, devido à morosidade do processo de levantamento, que pode tornar, em alguns casos, o cadastro mais caro e ainda insuficiente para atender a determinadas demandas, devido a obtenção de produtos menos precisos.

Em casos de objetos complexos de pequenas dimensões (como detalhes construtivos ou esculturas), que apresentem texturas não uniformes, a técnica DSM é a mais indicada pois, além do baixo custo dos equipamentos (câmera digital e *software*), permite a obtenção de modelos geométricos texturizados de elevada qualidade, que podem ser usados para a geração de outros produtos derivados (como ortofotos, desenhos, animações, prototipagem rápida).

A Fotogrametria Digital *stricto sensu* e a Fotogrametria Esférica são mais indicadas para levantamentos de objetos de formas poligonais com grande quantidade de detalhes (como fachadas ou esquadrias). A grande diferença entre as duas é que a primeira gera, como produtos primários, modelos geométricos texturizados e ortofotos, e a segunda, modelos em "estrutura de arame" e desenhos. A vantagem da Fotogrametria Esférica se dá principalmente pelo aumento da resolução das imagens (panoramas) e pela redução de arquivos a serem processadas na restituição fotogramétrica. A grande limitação das duas técnicas é o levantamento completo do interior das edificações pela dificuldade de amarração dos modelos parciais e pela presença de obstáculos (paredes, móveis, pilares, etc.), que podem impedir, em algumas situações, a visualização dos objetos por três ou mais pontos de vistas diferentes.

Para o registro de objetos simples e de pequenas edificações, com formas poligonais e sem irregularidades significativas, a utilização da medição direta é interessante, pelo baixo custo e pelo uso de instrumentos e técnicas simples para o levantamento. Além disso, permite

³⁴ A compra do equipamento geralmente não é indicada, devido ao elevado valor e à defasagem rápida da tecnologia, sempre em evolução. Justifica-se somente em casos de utilização intensa do equipamento por empresas ou instituições.

contato mais próximo do levantador com a edificação para observação de materiais, encaixe de peças, funcionamento de esquadrias, etc.

Com relação às técnicas não destrutivas para aquisição de informações ocultas dos objetos, é importante o conhecimento de suas características visando sua utilização em casos específicos, de modo a complementar as informações obtidas pelos métodos de levantamento da geometria externa dos objetos. Uma síntese de suas aplicações pode ser vista no Quadro 5.

Quadro 5 - Exemplos de aplicações das técnicas não destrutivas em função das informações a serem levantadas

TÉCNICA MAIS INDICADA	INFORMAÇÕES A LEVANTAR
Termografia infravermelho	Detecção de grandes elementos estruturais (como lajes nervuradas ou vigas ocultas em forros) e tubulações, análise de isolamento térmico dos elementos construtivos, detecção de umidade, vazamentos, infiltração e danos
Georradar	Determinação da composição de pisos e paredes, especialmente em camadas mais profundas, localização de tubulações, verificação de estruturas de concreto
Radiografia	Detecção de pequenos elementos, como a presença e localização de aço, de vazios, de trechos específicos de instalações (elétricas e hidráulicas)

Fonte: elaboração da autora.

Dessas técnicas, destacam-se a Termografia infravermelho e o Georradar pelo menor custo e maior gama de aplicações para documentação arquitetônica. A primeira tem ainda a vantagem de maior rapidez para obtenção e interpretação das informações e flexibilidade de uso, podendo ser utilizada mais facilmente por arquitetos.

Finalizando, é importante ressaltar o conhecimento do responsável pelo levantamento das características das técnicas existentes, a fim de que possa escolher as mais adequadas para cada situação. De forma geral, há uma necessidade de integração de diferentes técnicas, de modo a poder tirar partido das vantagens oferecidas por cada uma. Dessa maneira, será possível a geração de produtos mais adequados às necessidades específicas de cada levantamento, aliando redução de custo e tempo necessário para realização do mesmo.

2.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Esse capítulo visou sistematizar uma série de informações relativas à documentação arquitetônica, como conceitos, finalidades, níveis de detalhe/precisão, que serão usadas

como referência para a determinação de parâmetros para a modelagem BIM de edificação histórica em diferentes níveis de detalhe, associados a diferentes possibilidades de aplicação (capítulo 7).

Foi apresentado um panorama das técnicas de levantamento arquitetônico, incluindo o que há de mais avançado em termos de aquisição de dados, seja para representação da geometria externa dos objetos, seja para obtenção de informações ocultas ou internas aos mesmos, através do uso de métodos não destrutivos.

Apesar do foco da pesquisa ser a aquisição das informações geométricas (externas ou visíveis) dos objetos visando a modelagem BIM, é importante apresentar/considerar os principais métodos não destrutivos utilizados em edificações, que podem ser adotados em casos específicos.

O conteúdo apresentado e discutido sobre os diferentes métodos de levantamento permitem não somente contextualizar e justificar a seleção das técnicas utilizadas nos experimentos (DSM, *3D Laser Scanning*, Fotogrametria Digital *stricto sensu* e medição direta) descritos nos capítulos 6 e 7, como dar subsídios para a escolha da mais adequada em situações específicas.

O capítulo 3, a seguir, trata de modo detalhado as tecnologias para captura de "nuvens de pontos", primeiramente o *3D Laser Scanning* e depois a técnica *Dense Stereo Matching* - DSM.

Capítulo 3

Tecnologias para captura de "nuvens de pontos"

3 TECNOLOGIAS PARA CAPTURA DE "NUVENS DE PONTOS"

Este capítulo aborda inicialmente os aspectos relacionados ao *3D Laser Scanning*: conceitos, histórico, princípios de funcionamento, classificação, características das diferentes tecnologias. Na sequência, são tratados conteúdos associados à técnica de geração de "nuvens de pontos" por fotografias (ou *Dense Stereo Matching* - DSM), como: origem, evolução, etapas para geração dos modelos e classificação das ferramentas disponíveis para DSM.

3.1 3D LASER SCANNING

O *3D Laser Scanning*, também conhecido como *High Definition Surveying*³⁵ (HDS), *3D imaging* ou varredura a laser, pode ser definido como uma "[...] tecnologia de digitalização tridimensional usando um feixe laser que é direcionado aos objetos e permite capturar, visualizar e modelar tridimensionalmente cenas complexas com rapidez e alta precisão [...]" (CENTENO; WUTKE; KERSTING, 2004).

Segundo Genechten (2008, p. 12), o termo *laser scanning* descreve um método de varredura das superfícies dos objetos usando a tecnologia laser. Nesse sistema, são coletados dados que podem ser usados para gerar desenhos ou modelos geométricos (3D) úteis para uma variedade de aplicações.

A tecnologia *3D laser scanning* permite obter modelos geométricos (tridimensionais) - "nuvens de pontos" - a partir da varredura do objeto com feixes de raios laser, efetuado por um equipamento específico (*3D laser scanner*). Cada um dos pontos que constitui a "nuvem de pontos" é representado por suas coordenadas cartesianas (x, y, z) e um ou mais atributos associados ao mesmo. É possível representar a "nuvem de pontos" através de:

- "falsa cor", onde a cor pode representar a distância do ponto à origem do sistema de emissão dos pulsos laser, a refletância do material que constitui a superfície do objeto levantado, a temperatura ou outras propriedades de interesse;

³⁵ A Leica Geosystems lançou, em 2003, uma série de equipamentos (HDS3000 e HDS45000) e programas (Cyclone e CloudWorx) sob o nome de *High Definition Surveying* - HDS (FREI; KUNG; BUKOWSKI, 2003). Em pouco tempo, esse termo (*High Definition Surveying*) passou a ser utilizado como um sinônimo da tecnologia *3D Laser Scanning*.

- cor do objeto, que corresponde à cor visível (real) no ponto, através do mapeamento dos *pixels* contidos numa fotografia de alta resolução equivalente à cena capturada (componentes RGB - *Red*, *Green* e *Blue*) sobre a "nuvem de pontos".

3.1.1 Breve histórico

A origem do laser remonta ao início do século XX quando Albert Einstein teorizou o conceito de emissão estimulada. Em 1917, ele publicou um artigo que dizia ser possível estimular um corpo a liberar energia em forma de radiação eletromagnética com características uniformes e consistentes. Devido às limitações técnicas da época, somente na década de 1950 foi possível desenvolver as pesquisas propostas por Einstein (GONÇALES, 2007).

Segundo Leinwoll (1969³⁶ apud Gonçalves, 2007), o primeiro dispositivo desenvolvido para amplificar e gerar radiação eletromagnética por método subatômico chamava-se MASER (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), e operava na frequência de 24.000 MHz, região das micro-ondas do espectro eletromagnético. A invenção do MASER, em 1954, foi influenciada também com as pesquisas realizadas com o RADAR (*Radio Detection and Ranging*) durante a Segunda Guerra Mundial, que diferem essencialmente nos comprimentos de ondas utilizados (BRANDALIZE; PHILIPS, 2002).

Depois, foram realizadas pesquisas para a criação de um "*maser*" que funcionasse em ondas eletromagnéticas na região do visível. Em 1960, Theodore Maiman (do *Hughes Research Laboratory*, na Califórnia) testou diferentes materiais usando um dispositivo com sistema de espelhos, o que levou à criação do primeiro "*maser*" ótico, denominado de LOSER - *Light Oscillation by Stimulated Emission of Radiation*. Como "*loser*", em inglês, significa "perdedor", o nome foi trocado para LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (GONÇALES, 2007).

Com os avanços técnicos na década de 1960, os lasers gradualmente passaram a ter aplicações práticas. A produção em larga escala iniciou-se ao longo das décadas de 1960 e 1970, e foram usados inicialmente para monitoramento atmosférico (SUTTON; RAHMAN; GARWOOD, 2014).

³⁶ LEINWOLL, S. *Understanding Lasers and Masers*. New York: John F. Rider, 1969.

Na década seguinte, com o desenvolvimento do *Electronic Distance Measurement* (EDM), o laser começa a ser utilizado também nas áreas da Topografia e da Engenharia Civil. O surgimento de equipamentos EDM foi um fato muito importante para o desenvolvimento da tecnologia de medição de distâncias, a qual viria a ser aplicada no *Laser Scanning* Terrestre e em outras plataformas (PETRIE; TOTH, 2008³⁷ apud PEREIRA, 2012).

Na década de 1970 foram desenvolvidas as aplicações do laser (do tipo LIDAR³⁸) tanto em plataformas aéreas como espaciais. Na década de 1980, foram desenvolvidas e integradas ao equipamento LIDAR duas tecnologias: o *Inertial Navigation System* (INS) e o *Global Position System* (GPS), que representam a configuração bem próxima da tecnologia LIDAR atual, permitindo o controle rigoroso e a gravação da orientação e localização da aeronave.

Em 1994, foram realizados os primeiros voos comerciais para levantamento de dados topográficos. Em paralelo a isso, desenvolveu-se a técnica em plataformas espaciais. Em 1992, os Estados Unidos lançaram instrumentos LIDAR em naves espaciais, relativos ao projeto *Mars Observer Laser Altimeter* (MOLA-1), com o objetivo de levantar a superfície de Marte. Na sequência, foram lançados ao espaço outros instrumentos visando o mapeamento da superfície lunar, e depois outro para estudar o relevo (ou a forma) da Terra (PEREIRA, 2012).

Em 1998, foi utilizada a primeira geração do *Laser Scanner* Terrestre para levantamento na área industrial (DONGSHEN et al., 2009). Segundo Pereira (2012), a plataforma terrestre do equipamento surgiu atrasada, uma vez que tecnologias semelhantes já haviam sido testadas em plataformas mais complexas, como as aéreas.

Nos últimos dez anos, houve desenvolvimento significativo da tecnologia de varredura a laser, tanto no que se refere ao *hardware* quanto ao *software*, culminando na redução dos custos de levantamento e no aumento das áreas de aplicação: levantamento industrial, arquitetônico, documentação do patrimônio, arqueologia, planejamento urbano, geologia, energia, ferramenta de apoio à prevenção de desastres naturais, etc.

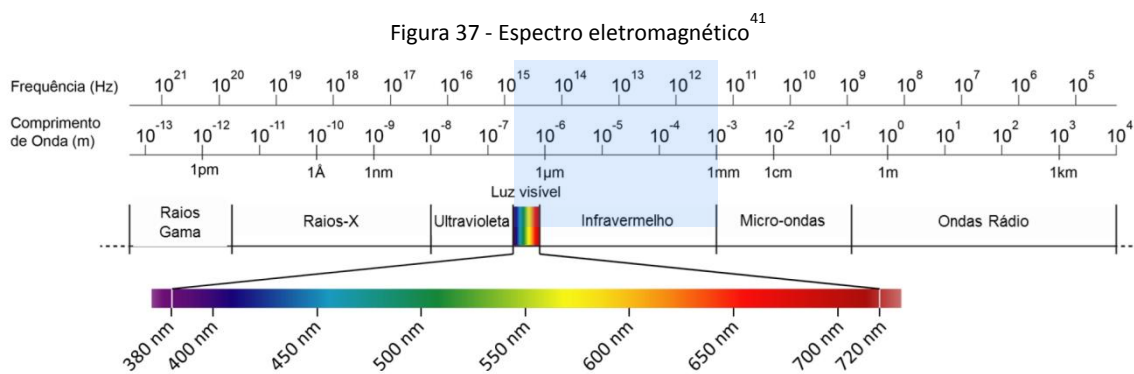
³⁷ PETRIE, G. M.; TOTH, C. Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. In: SHAN, J.; TOTH, C. (Eds.). **Topographic Laser Ranging and Scanning**. New York: CRC Press, 2008.

³⁸ LIDAR (*Light Detection And Ranging*), também conhecido como sistema de tempo de voo, é um tipo de equipamento a laser que realiza a medição das distâncias através do tempo decorrido entre a emissão e o retorno do pulso laser ao equipamento, depois de atingir a superfície do objeto. Esse assunto é tratado em detalhe no item 3.1.6.

3.1.2 Conceitos relacionados à luz laser

A palavra LASER vem da expressão *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou seja, amplificação de luz por emissão estimulada de radiação. O termo laser é usado tanto para se referir a um tipo de luz, como designar o dispositivo mecânico-quântico, que utiliza a interação entre luz e matéria para produzir a luz laser³⁹ (MATEUS, 2012).

O laser pode ser considerado como um emissor de um estreito feixe de luz monocromática e coerente⁴⁰, gerado por partículas que emitem radiação eletromagnética na região do ultravioleta ao infravermelho (HECHT, 1999). Segundo Pereira (2012), os tipos mais comuns são os lasers que utilizam os comprimentos de onda do visível e do infravermelho, destacados em azul na Figura 37.



Fonte: adaptado de Pereira (2012).

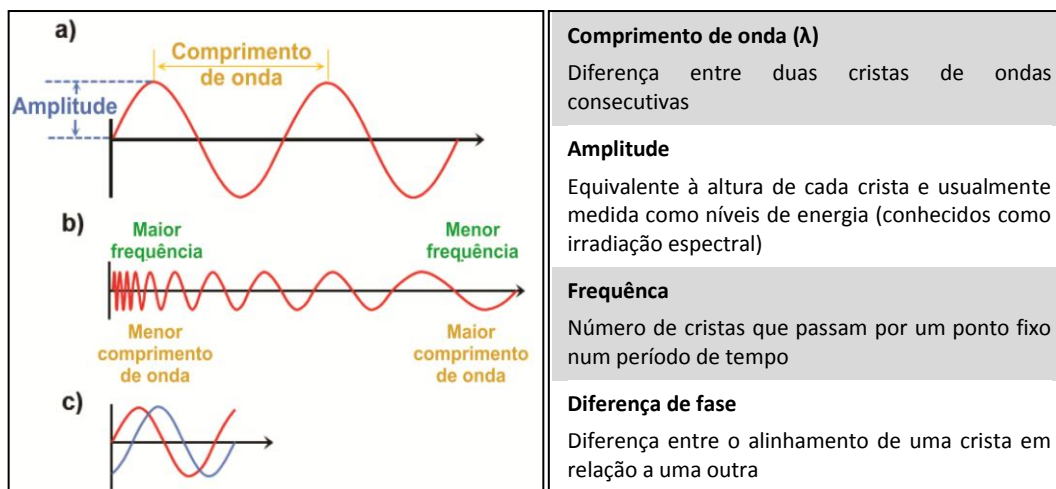
A distinção entre os diferentes tipos de radiação do espectro eletromagnético (Figura 38) é efetuada através do comprimento da onda, frequência, amplitude, sendo também considerado como complemento a diferença de fase (PEREIRA, 2012).

³⁹ A maior parte dos lasers existentes emite radiação no intervalo do espectro a que se convencionou chamar luz visível (MATEUS, 2012).

⁴⁰ Luz coerente é aquela formada por ondas de mesma frequência e direção, que mantém uma relação de fase constante entre si.

⁴¹ O espectro eletromagnético pode ser expresso em termos de energia, de comprimento de onda e da frequência. Ondas de alta frequência têm pequeno comprimento de onda e alta energia. Enquanto que as de baixa frequência têm longo comprimento de onda e baixa energia.

Figura 38 - Propriedades da energia eletromagnética: (a) comprimento de onda e amplitude; (b) frequência; (c) fase



Fonte: adaptado de Pereira (2012), baseado em Campbell e Wynne (2001)⁴².

O laser apresenta várias características como monocromaticidade⁴³, alta intensidade, propagação em direções bem definidas, alta velocidade de emissão/recepção dos sinais e coerência⁴⁴, que o tornam um excelente instrumento de medição dos objetos (GENECHTEN et al., 2008). Dessas características, a mais importante é a sua coerência. Todos os raios de luz possuem o mesmo comprimento de onda e estão todos em fase (alinhados). A energia emitida não se dissipa à medida em que os raios se propagam, o que permite concentrá-la em um ponto bem definido, aumentando significativamente seu alcance (CARROLL⁴⁵, 1978 apud BRANDALIZE; PHILIPS, 2002).

Segundo Hecht (1999), o dispositivo emissor de laser contém três elementos essenciais: (1) o meio ou a matéria (sólido, líquido ou gasoso) que gera a luz do laser; (2) a fonte de energia (ótica, elétrica, química, etc.), que estimula a matéria a emitir luz, e (3) a cavidade óptica ou ressonador, responsável pela concentração da luz gerada e por sua emissão, na forma contínua ou pulsada.

⁴² CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. **Introduction to Remote Sensing**. 5. ed. New York, London: The Guilford Press, 2011. 684 p.

⁴³ A luz laser é monocromática, visto ser constituída de ondas com o mesmo comprimento de onda.

⁴⁴ Diz-se que uma onda de luz é coerente quando todas as ondas que compõem o feixe estão em fase (as cristas e vales coincidem).

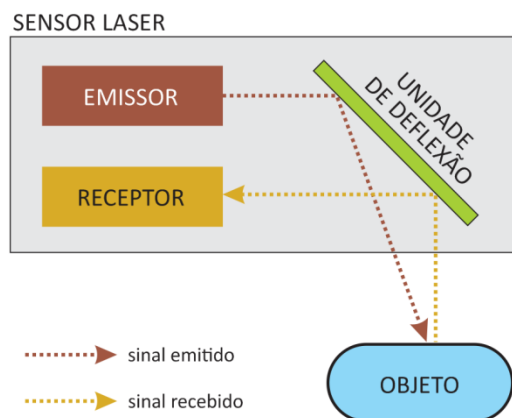
⁴⁵ CARROLL, J. M. **Fundamentos y Aplicaciones del Laser**. Barcelona: Editorial Boixareu, 1978.

Enquanto o material ou meio utilizado é o que determina o comprimento de onda da luz emitida pelo laser, a qualidade da cavidade óptica, ou ressonador, é o que determina a sua potência. São estas características (comprimento de onda e potência), juntamente com a duração, a taxa de repetição, o diâmetro do feixe e sua divergência (variação do diâmetro com a distância) que permitem avaliar os riscos ou perigos de exposição humana a esse tipo de radiação (BRANDALIZE; PHILIPS, 2002; HECHT, 1999).

3.1.3 Princípios básicos de funcionamento do *laser scanner*

O *laser scanner* representa o conjunto de dispositivos utilizados na varredura tridimensional dos objetos, sendo composto basicamente por (Figura 39): (1) unidade para emissão do laser; (2) unidade de deflexão, dispositivo óptico-mecânico que direciona o feixe laser (na horizontal e vertical), geralmente constituído de espelhos giratórios comandados por servomotores e, (3) unidade que recebe, processa e registra o laser refletido.

Figura 39 - Representação esquemática de um *laser scanner*



Fonte: elaboração da autora.

Seu funcionamento baseia-se na emissão e reflexão do feixe de laser na direção da superfície externa do objeto a ser registrado. Ao atingi-la, parte do sinal laser é refletido na direção do sensor, onde é possível a medição da distância. Esse procedimento é repetido até a varredura completa da superfície, o que acontece de modo muito rápido, permitindo capturar centenas de milhares de pontos por segundo.

Os ângulos incrementais de rotação (*pitch angle*) horizontal e vertical do *laser scanner* durante a varredura são determinados em função da densidade da "nuvem de pontos" (ou

afastamento entre pontos - *data spacing*) requerida, levando em consideração a distância entre o equipamento laser e o objeto a ser levantado.

A determinação das distâncias entre a origem do sistema e o ponto considerado, para obtenção das coordenadas dos pontos, dependem da tecnologia utilizada no equipamento, podendo ser baseada no tempo decorrido (entre a emissão e retorno do laser) ou no princípio da triangulação, aspectos que serão discutidos na seção 3.1.6.

3.1.4 Classificação do 3D laser scanning

É possível classificar o *3D laser scanning* em função da tecnologia utilizada, do alcance e do posicionamento do sistema de varredura. Com relação à forma de medição dos pontos, os equipamentos laser são baseados em uma das três tecnologias descritas a seguir:

- tempo de voo (do inglês *Time of Flight* - TOF), também chamados de *pulsed* ou LIDAR (*Light Detection And Ranging*),
- diferença de fase (do inglês *Phase Shift*) e,
- triangulação.

Com relação ao alcance, o *laser scanning* pode ser classificado em⁴⁶:

- muito longo - mais de 3.500 m;
- longo - até 3.500 m;
- médio - até 500 m;
- curto - até 120 m, e
- muito curto - até 25 m.

Com relação ao posicionamento do sistema de varredura (*scanner* e outros equipamentos associados), é possível a classificação em dois grandes grupos, usados em aplicações diferenciadas:

- *laser scanning* terrestre ou *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), e
- *laser scanning* aerotransportado ou *Aerial Laser Scanning* (ALS).

⁴⁶ Essa classificação foi baseada em Mateus (2012). Entretanto, os valores de alcance foram atualizados através de uma pesquisa sobre novos equipamentos disponíveis atualmente (ano de 2014). Além disso, foi incorporada a categoria "muito longo alcance", vista na descrição do equipamento RIEGL VZ-6000, considerado do tipo "*ultra long range*".

O Quadro 6 relaciona essas três formas de classificação (alcance, posicionamento e tipo de tecnologia) com valores médios de alcance e precisão dos sistemas de varredura disponíveis atualmente no mercado.

Quadro 6 - Comparação de diferentes grupos de classificação do *3D Laser Scanning*

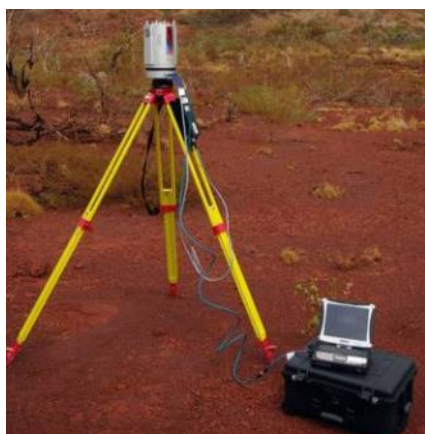
TECNOLOGIA	ALCANCE	POSICIONAMENTO DO SISTEMA	VALORES DE ALCANCE (m)	PRECISÃO MÉDIA (mm)
Triangulação	Muito curto	TLS	0,1 a 25	0,050 - 0,5
Diferença de fase	Curto	TLS	5 a 120	5
Tempo de voo	Médio	TLS	5 a 500	3 - 6
	Longo	TLS / ALS	50 a 3.500	15
	Muito longo	TLS / ALS	50 a 6.000	15 - 20

Fonte: elaboração da autora.

3.1.5 Características do *3D laser scanning* terrestre e aerotransportado

No *laser scanning* terrestre, o equipamento está posicionado sobre ou próximo à superfície da Terra, podendo ser fixo (estático) ou em plataforma móvel (dinâmico). É adequado para levantamentos rápidos, precisos e detalhados de pequenos objetos (como esculturas e elementos decorativos) a grandes edificações.

Figura 40 – *Laser scanner* estático RIEGL



Fonte: Disponível em: <<http://www.riegl.com>>⁴⁷. Acesso em: 2 dez. 2013.

O *laser scanner* estático é composto, geralmente, por três unidades: o próprio *scanner*, fixado em um tripé, um microcomputador portátil e uma fonte de energia (bateria)⁴⁸, como pode ser visto na Figura 40. Os dados coletados pelo sensor laser são transferidos

⁴⁷ © RIEGL Laser Measurement Systems, Austria.

⁴⁸ Há modelos mais novos de *scanners*, onde as três funções estão integradas num único equipamento.

imediatamente para o computador, o qual possui um *software* específico para visualização da "nuvem de pontos" e controle da varredura.

Com relação ao sistema dinâmico, pode-se classificá-los em dois tipos:

- *outdoor mobile scanning* – levantamento de espaços externos;
- *indoor mobile scanning* – levantamento de espaços internos.

O sistema *outdoor mobile scanning* inclui os sensores a laser, de navegação, GPS e câmeras de vídeo, equipamentos geralmente montados em veículos para o escaneamento de estradas, pontes, túneis, fachadas de edificações e cidades (Figura 41). Segundo Perry (2010), esse sistema permite a captura da ordem de 400.000 pontos por segundo, com resolução a partir de 3 mm. O mesmo autor cita um exemplo de levantamento de uma via de 50 km de comprimento escaneada em um único dia.

Figura 41 - *Laser scanning* terrestre dinâmico: a) equipamentos do sistema *outdoor mobile scanning* montados em um veículo; b) representação do processo de escaneamento de vias e edificações realizado no sistema de varredura móvel da Topcon

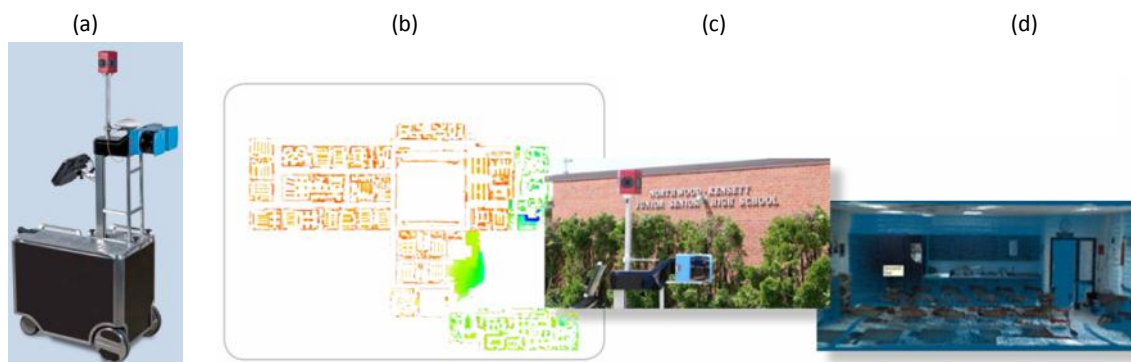


Fonte: (a) <http://www.riegl.com>, © RIEGL Laser Measurement Systems, Áustria; (b) <http://www.topconpositioning.com/news-events/news/company-news/topcon-display-mobile-mapping-system-spar>. Acesso em: 15 mar. 2013.

O sistema *indoor mobile scanning* (Figura 42a) é ainda mais recente do que o anterior, onde o *scanner* é montado em uma plataforma móvel, que pode ser operada à distância, ou circular de forma autônoma ao longo de uma edificação. É composto por: *laser scanner* (do tipo LIDAR), unidade de medição inercial, câmera especial (para captura de imagens georreferenciadas e panoramas esféricos em 360 graus), sistema para armazenamento dos dados e bateria. O modelo de "nuvem de pontos" é gerado enquanto o sensor se movimenta, através de um método chamado localização e mapeamento simultâneo, realizado por sensores inerciais e outros métodos, que permitem determinar a localização do *scanner* na medida em que se desloca.

Trimble (2010) descreve um levantamento realizado em uma escola americana com o sistema TIMMS - *Trimble Indoor Mobile Mapping Solution* (Figura 42b). A *Northwood-Kensett High School*, com aproximadamente 7.000 m² de área foi escaneada em 5 horas, o que representou uma redução de 80% do tempo de captura em relação ao método *3D laser scanning* estático.

Figura 42 - (a) Sistema TIMMS; (b) "nuvem de pontos" (vista em planta) da *Northwood-Kensett High School*; (c) foto do exterior da escola; (d) "nuvem de pontos" do interior de uma sala de aula com textura aplicada



Fonte: Trimble (2010).

Devido à grande velocidade na aquisição das "nuvens de pontos" de espaços interiores, este sistema representa um importante método de levantamento para áreas de grandes dimensões, como aeroportos e teatros. No entanto, ainda não permite substituir completamente o *laser scanning* estático, dada a menor precisão do levantamento (GROETELAARS; AMORIM, 2013a).

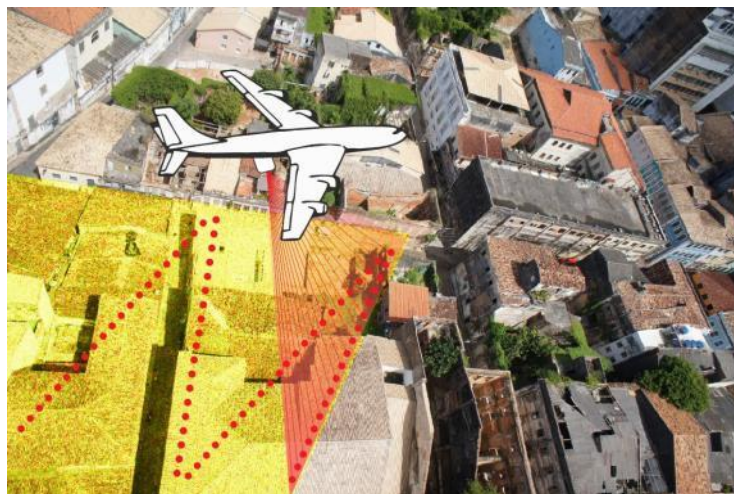
O *laser scanning* aerotransportado (ALS) caracteriza-se pelo aparelho *laser scanner* (tipo LIDAR) estar posicionado em aeronaves (Figura 43). Segundo Centeno e Mitshita (2007), o sistema é composto por:

- *laser scanner* - que mede a distância entre os objetos na superfície terrestre e o sensor;
- sistema de GPS diferencial - encarregado de obter a posição do sensor no momento da medição de cada ponto;
- unidade de medição inercial - encarregada de calcular a inclinação do sensor nas três direções (ω , ϕ , κ).

É adequado para o levantamento de grandes áreas, inclusive urbanas. Geralmente, a aeronave percorre a região de interesse a uma altura de voo que pode variar de 1.000 a

3.000 m, registrando cerca de 150.000 pontos por segundo, e capturando uma "nuvem de pontos" com densidade de 1 a 5 pontos por metro quadrado, correspondendo a uma precisão em torno de 10 a 15 cm em relação à altura e de 50 cm em relação às dimensões horizontais.

Figura 43 - Sistema *laser scanning* aerotransportado



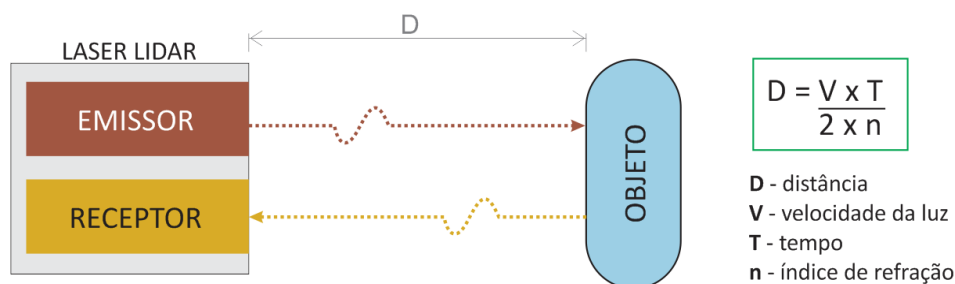
Fonte: Groetelaars e Amorim (2013a).

3.1.6 Tecnologias de medição: tempo de voo, diferença de fase e triangulação

Como citado na seção 3.1.4, os diferentes métodos para medição de distância são divididos em três grupos: tempo de voo, diferença de fase e triangulação.

O sistema de **tempo de voo**, mais conhecido como LIDAR, realiza a medição das distâncias através do tempo decorrido entre a emissão e o retorno do pulso laser (T) ao equipamento, depois de atingir a superfície do objeto. Utilizando os valores conhecidos da velocidade da luz (V) - aproximadamente 300.000 km/s - e o índice de refração do meio em que o laser atravessa - no caso do ar, considera-se o valor de 1,00025 - é possível calcular a distância entre o instrumento e o ponto no objeto (D), conforme ilustrado na Figura 44 (MATEUS, 2012).

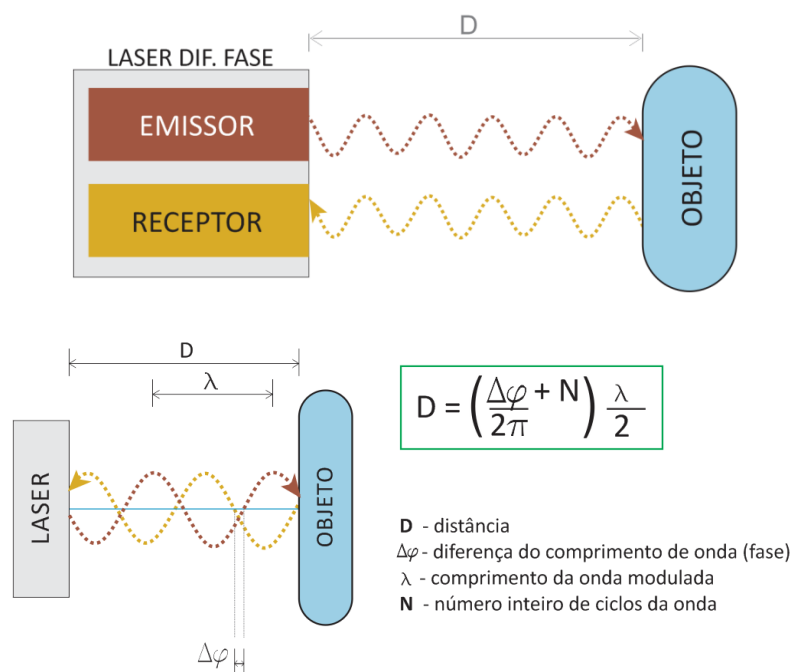
Figura 44 - Sistemas baseados em tempo de voo



Fonte: elaboração da autora.

Nos sistemas baseados no princípio da **diferença de fase** (*phase shift*), a medição da distância (D) é feita através da comparação das fases dos sinais emitidos e recebidos, conforme ilustrado na Figura 45. Esses sistemas precisam ter mais de um tipo de modulação de onda, para não haver ambiguidade no levantamento e garantir a elevada precisão do sistema. Segundo Mateus (2012), a precisão da medição da diferença de fase é da ordem de 1% do comprimento da onda modulada. Uma vez que se trata de processo contínuo de emissão de feixes de raio laser, os *scanners* baseados na diferença de fase geralmente são mais rápidos do que os sistemas LIDAR, porém com menores alcances.

Figura 45 - Sistemas baseados em diferença de fase

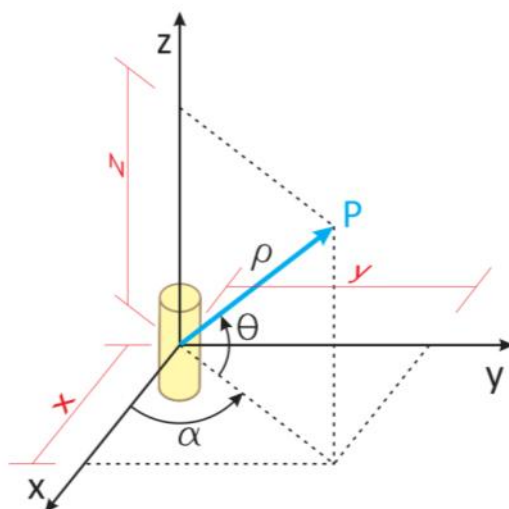


Fonte: elaboração da autora.

Nos dispositivos de tempo de voo e diferença de fase, os ângulos de varredura do laser são registrados por codificadores (*encoders*) que, juntamente com a distância calculada,

determinam as coordenadas esféricas do ponto levantado em relação ao referencial do laser (GONÇALES, 2007). Essas coordenadas esféricas (ρ , α , θ) obtidas na varredura (Figura 46) são convertidas para o sistema de coordenadas cartesianas (x , y , z) para o registro de cada ponto que compõe a "nuvem de pontos". O modelo produzido é visualizado praticamente em tempo real, à medida em que é feita a varredura.

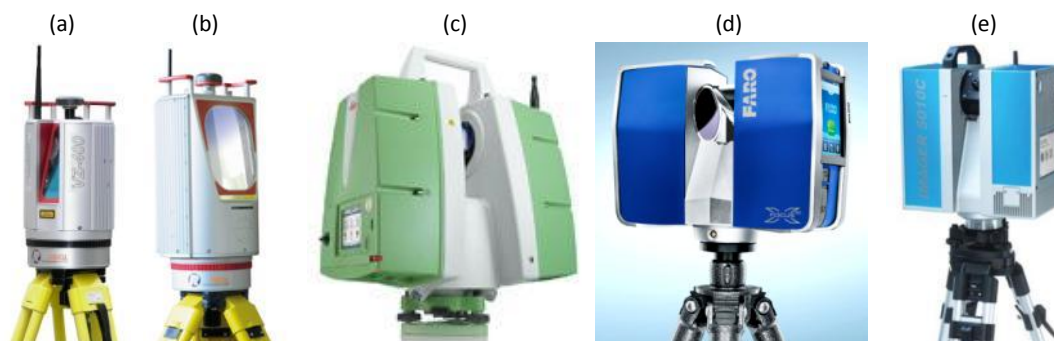
Figura 46 - Coordenadas esféricas (ρ , α , θ) obtidas pelo *laser scanner* (em amarelo)



Fonte: elaboração da autora.

A Figura 47 ilustra modelos de equipamentos para aplicações terrestres, dos tipos LIDAR e diferença de fase, atualmente disponíveis no mercado. O Quadro 7 apresenta algumas características desses equipamentos, como velocidade máxima de captura de pontos, valores de alcance e precisão média.

Figura 47 - Diferentes equipamentos do tipo tempo de voo - LIDAR (os três primeiros) e diferença de fase - DF (dois últimos): (a) Riegl Vz-400; (b) Riegl Vz-6000; (c) Leica ScanStation P20; (d) Faro Focus^{3D} X 330; (e) Z+F Imager 5010c



Fonte: (a) e (b) www.riegl.com; (c) www.leica-geosystems.com; (d) www.faro.com; (e) www.zf-laser.com. Acesso em: 13 mar. 2014.

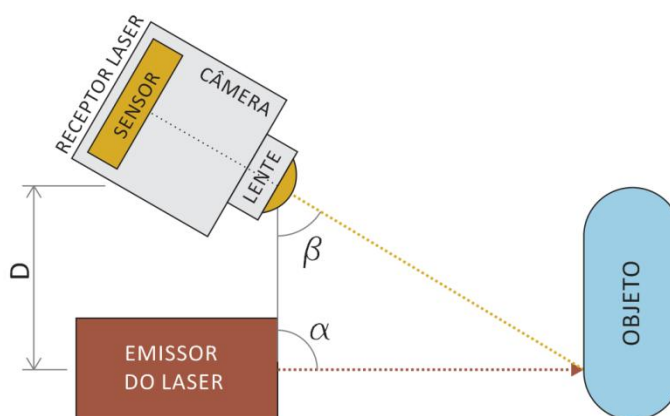
Quadro 7 - Comparação entre equipamentos do tipo LIDAR e diferença de fase

EQUIPAMENTO	TECNOLOGIA	VELOCIDADE (PONTOS/S)	ALCANCE (m)	PRECISÃO MÉDIA (mm)
RIEGL VZ-400	LIDAR	122.000	1,5 a 550	5
RIEGL VZ-6000	LIDAR	222.000	5 - 5.800	15
LEICA SCANSTATION P20	LIDAR	1.000.000	0,4 - 120	3 - 6
FARO Focus ^{3D} X 330	Dif. Fase	976.000	0,6 - 330	2
Z+F IMAGER 5010C	Dif. Fase	1.016.000	0,3 - 187,3	0,5 - 5

Fonte: elaboração da autora.

Os equipamentos baseados no princípio da **triangulação** são compostos por uma unidade de emissão do laser e no mínimo um sensor da câmera (unidade de recepção do laser). O pulso laser emitido é registrado pelo sensor da câmera. A cada emissão de pulso, os ângulos de emissão e recepção (α e β) são registrados no sistema e, através do conhecimento da distância da base (D) entre a unidade de emissão laser e as lentes da câmera, determina-se as coordenadas do ponto iluminado na superfície do objeto (ponto em que o laser é refletido), correspondente ao vértice do triângulo oposto à base D (Figura 48).

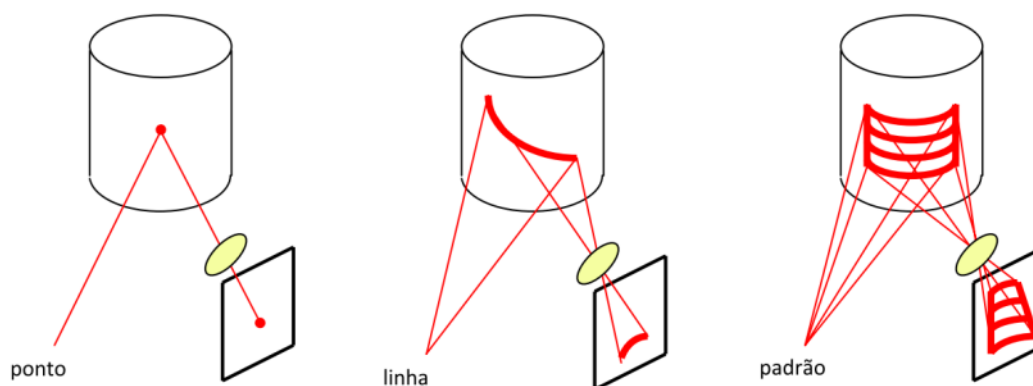
Figura 48 - Princípio do sistema laser de triangulação



Fonte: elaboração da autora.

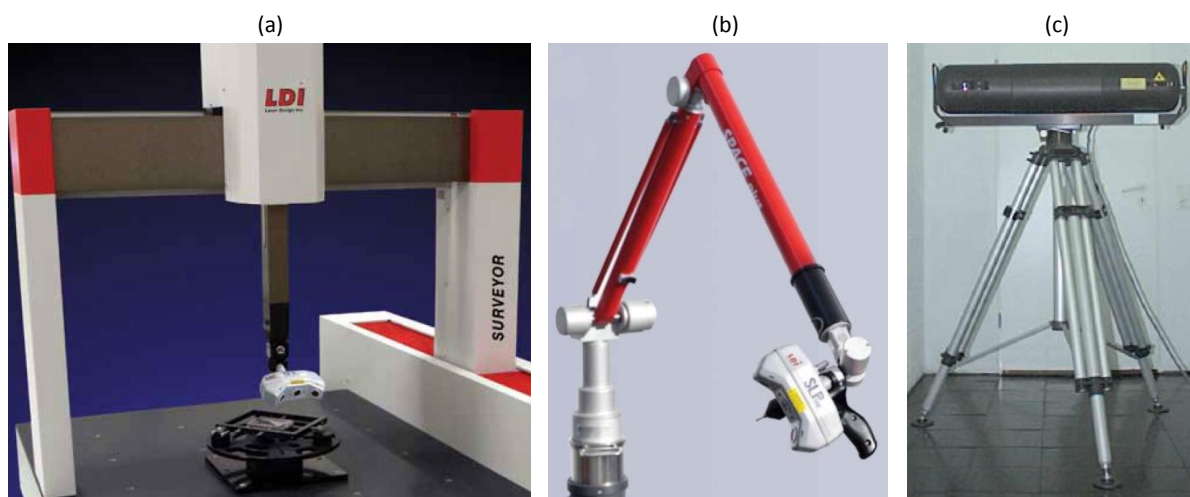
Os *scanners* de triangulação podem usar diferentes técnicas de projeção dos feixes de laser: pontos, linhas ou padrão, conforme pode ser visto na Figura 49. O tipo mais comum de emissão do laser é o feixe na forma de linha, no entanto, o mais preciso é o baseado na projeção de um padrão.

Figura 49 - Diferentes técnicas de projeção no sistema de triangulação



Fonte: adaptado de Genechten e colaboradores (2008, p. 19).

Figura 50 - Diferentes tipos de *scanners* baseados no princípio da triangulação: (a) sistema com base giratória; (b) braço digitalizador; (c) sistema com espelho giratório⁴⁹



Fonte: (a) e (b) <http://www.laserdesign.com>. Acesso em: 15 mar. 2014; (c) Boehler, Heinz e Marbs (2001).

Os autores Barber, Mills e Andrews (2011) classificam os *scanners* de triangulação em três tipos (Figura 50):

- sistema com base giratória (*rotation stage*) - o objeto é colocado dentro do *scanner* estático, sobre uma base giratória para a movimentação e varredura completa do objeto;
- braço digitalizador (*mechanical arm* ou *arm mounted*) - o *scanner* é montado em um braço articulado que se movimenta ao redor do objeto (fixo), para realizar a varredura;

⁴⁹ Especificações dos equipamentos: (a) SURVEYOR ZS-Series da Laser Design Inc); (b) SURVEYOR Space Arm da Laser Design Inc); (c) SOISIC da Mensi.

- sistema baseado em prismas ou espelhos (*mirror/prism*) - a varredura do objeto (fixo) é realizada pelo equipamento em posição estática, geralmente apoiado em um tripé, sendo necessário o escaneamento a partir de várias estações para cobrir de modo adequado o objeto.

Esses *scanners* são usados no levantamento de pequenos objetos afastados do equipamento em distâncias geralmente inferiores a 1 m, e em alta precisão, chegando até 50 microns (μm). A precisão do sistema depende da distância base (D), entre o emissor laser e o sensor receptor, e da distância entre o equipamento e o objeto. Os sistemas de triangulação baseados em prismas ou em espelhos são os que apresentam os maiores alcances, podendo chegar a 25 m, como o SOISIC da Mensi (Figura 50c). No entanto, há redução da precisão quando se utilizam maiores alcances, dada à distância fixa entre o emissor e receptor laser, que restringem o tamanho dos objetos a serem escaneados.

3.1.7 Considerações

As principais diferenças dos *scanners* estão relacionadas aos seguintes parâmetros: alcance, precisão e velocidade (taxa) de varredura. Os *scanners* baseados em tempo de voo (LIDAR) são os que apresentam maior flexibilidade de uso, uma vez que permitem uma grande variação dos alcances, geralmente entre 2 e 300 m. Podem ser usados em levantamentos de edificações ou de cidades, seja por plataformas terrestres (fixas ou móveis) ou aerotransportadas.

Os *scanners* baseados em diferença de fase são adequados para o levantamento de objetos arquitetônicos a partir de plataformas terrestres fixas, apresentando, nesses casos, maior precisão e velocidade de varredura, se comparados aos equipamentos do tipo LIDAR. No entanto, apresentam maiores limitações com relação aos alcances de varredura, uma vez que a precisão diminui significativamente quando se aumenta a distância entre equipamento e o objeto a ser levantado, não sendo recomendado para levantamento de grandes áreas urbanas.

Os *scanners* baseados no princípio da triangulação são os mais precisos (do micrômetro ao submilímetro), porém apresentam os menores alcances, sendo adequados para a varredura de objetos de pequenas dimensões, como esculturas e detalhes. Além disso, esses

equipamentos apresentam problemas de uso sob a luz direta do sol, necessitando do sombreamento (proteção da incidência solar) da área durante a varredura, em caso de levantamentos externos.

3.2 VARREDURA POR FOTOGRAFIAS

A técnica de geração de "nuvem de pontos" por processamento (digital) de fotografias foi desenvolvida a partir de avanços em duas áreas simultaneamente: a Fotogrametria e a Visão Computacional. O foco da primeira área está relacionado ao rigor geométrico e à precisão dos resultados, e da segunda ao reconhecimento de padrões e à geração de modelos geométricos a partir de fotografias, através de processos cada vez mais rápidos e automatizados.

Há vários termos que se referem à técnica de varredura por fotografias. Dentre os mais usados estão *Structure from Motion* (SfM) e *Dense Stereo Matching* (DSM).

Quando da revisão da literatura, verificou-se que, apesar de SfM e DSM serem usados, muitas vezes, referindo-se a todo o processo automatizado de geração do modelo de "nuvem de pontos" por fotos, há uma série de autores que tratam desses termos de modo diferenciado (POLLEFEYS et al., 2002; SZELISKI, 2010; IRSCHARA et al., 2012). Nesses casos, os termos "*Structure from Motion*" ou "*Structure and Motion*" estão associados às etapas iniciais de recuperação simultânea da geometria do objeto (na forma de "nuvem de pontos" esparsa) e de informações sobre a câmera (parâmetros internos⁵⁰, posicionamentos e orientações). E as expressões "*Dense Stereo Matching*", "*Dense Matching*", "*Multi-view Dense Matching*", "*Multi-view Stereo*", "*Dense Image Matching*", "*Dense Multi-view Stereo*", "*Dense Stereo Reconstruction*" e "*Dense Surface Modeling*" são usadas para se referir às etapas finais de processamento, relacionadas à geração dos modelos densos de "nuvem de pontos" ou de malhas triangulares.

⁵⁰ Os parâmetros internos podem ser obtidos de modo mais preciso e completo através do processo de calibração da câmera, onde são determinados: a resolução da imagem, a distância focal, a posição do ponto principal e as distorções da lente (GROETELAARS, 2004). Geralmente as ferramentas para SfM não requerem esse tipo de informação, que pode ser obtida através do EXIF disponível no arquivo da imagem, ou através do próprio processo de correlação automática das fotografias.

Outro termo utilizado para se referir a essa técnica foi atribuído por Walford⁵¹ (2009), que a chama de "*Photo-based scanning*", correspondendo, em português, à "varredura por fotografias".

Como o termo "*Structure from Motion*" está mais associado a aplicações na área da visão computacional e a geração de "nuvem de pontos" esparsa, e os termos "*Dense Stereo Matching*" - DSM e "varredura por fotografias" estão associados à criação da "nuvem de pontos" densa (sendo mais utilizados pelos principais programas fotogramétricos comerciais⁵²), estes dois últimos serão os adotados nessa tese.

A principal diferença do *Dense Stereo Matching* em relação à fotogrametria digital *stricto sensu* (baseada na identificação interativa de pontos homólogos) é a simplificação e automatização do processo de restituição. Na técnica DSM, uma série de parâmetros são resolvidos automaticamente, sem a necessidade de calibração da câmera e de associação interativa de pontos homólogos. No entanto, para resultados mais precisos é importante realizar a calibração da câmera e levantar pontos de controle da área ou do objeto de interesse, além de outros procedimentos/recursos geralmente disponíveis em programas fotogramétricos digitais⁵³.

3.2.1 Breve histórico

Como descrito anteriormente, o DSM foi desenvolvido a partir de estudos realizados nas áreas da Fotogrametria e da Visão Computacional. A seguir é descrito um breve histórico dos avanços realizados nessas duas áreas.

A Fotogrametria é uma técnica de levantamento cujas origens são tão antigas quanto à Fotografia, inventada em meados do século XIX. No entanto, seus fundamentos teóricos

⁵¹ Alan Walford foi o desenvolvedor de um dos primeiros programas comerciais para geração de "nuvem de pontos": o PhotoModeler Scanner, versão 6, lançado em 2008.

⁵² Esses programas são: (1) ShapeScan_SM (da ShapeQuest), associado aos termos "*dense stereo matching*" e "*3D scanning using digital imagery*"; (2) Photomodeler, associado à "*Photo-based scanning*"; (3) PhotoScan (Agisoft), que se refere à tecnologia "*multi-view 3D reconstruction*", mas o próprio nome "photoscan" significa "varredura por fotos". Em pesquisa realizada nas ferramentas de processamento remoto via *web* mais automatizadas (123D Catch, ARC 3D e Hypr3D), são utilizadas as expressões relacionadas à "*turns photos into 3D models*", ou seja, "transformar fotos em modelos 3D".

⁵³ Nos programas comerciais para DSM geralmente é possível o operador especificar uma série de parâmetros como: seleção de pares de fotografias a serem associadas para geração da "nuvem de pontos" densa, determinação da densidade da "nuvem de pontos" e utilização de pontos de controle, diferentemente dos programas de processamento remoto via *web*, onde os processos são realizados com a intervenção mínima do usuário.

relacionados à Geometria Projetiva e à Perspectiva foram desenvolvidos antes mesmo da criação da primeira fotografia, como puro desenho projetivo. Desde a época de sua invenção, em 1849, pelo engenheiro militar francês Aimée Laussedat, a restituição fotogramétrica passou por grandes transformações, de processos gráficos, analógicos e analíticos, até chegar aos processos digitais, iniciados na década de 1990, que ampliaram significativamente sua aplicação em diversas áreas. Uma abordagem detalhada sobre o histórico da Fotogrametria pode ser lida em Groetelaars (2004).

Apesar das origens do DSM ter relação estreita com os fundamentos geométricos e matemáticos da Fotogrametria, boa parte das questões ligadas ao DSM estão associadas a pesquisas na área da Visão Computacional realizadas nos últimos 30 anos, onde, segundo Szeliski (2010), o tema "*stereo matching*" foi e tem sido um dos mais estudados. No que pese a técnica DSM ter sido originalmente formulada para a criação de modelos geométricos (tridimensionais) a partir de estereopares, atualmente é possível utilizar diversas fotografias convergentes⁵⁴ do objeto. A seguir, são descritos alguns fatos relevantes na evolução da técnica *Dense Stereo Matching* ou *Structure from Motion*.

Em 1913, Erwin Kruppa - professor da *Technical University of Vienna*, publicou um trabalho que hoje é considerado o teorema "*structure-from-motion*". Ele provou que era possível a determinação dos posicionamentos da câmera e a localização tridimensional de pontos através da correspondência de cinco pontos homólogos em duas fotos (SNAVELY, 2008).

Seis décadas depois, surgiram os primeiros algoritmos para "estéreo correspondência" baseados em feições, tendo como destaque os trabalhos de Marr e Poggio (1976⁵⁵, 1979⁵⁶) e Moravec (1977⁵⁷) (SZELISKI, 2010). Segundo López (2011), foi o detector⁵⁸ de Moravec que

⁵⁴ As fotos convergentes visam cobrir todo o objeto de interesse, com grandes áreas de sobreposição. Os ângulos das tomadas fotográficas devem ser menores que 15 graus, de modo a não haver grandes variações entre os conjuntos de *pixels* das fotos a serem associadas.

⁵⁵ MARR, D.; POGGIO, T. Cooperative computation of stereo disparity. *Science*, n. 194, 1976. p. 283–287.

⁵⁶ MARR, D.; POGGIO, T. A computational theory of human stereo vision. In: ROYAL SOCIETY OF LONDON, 1979, [S.l.]. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 1979. p. 301–328.

⁵⁷ MORAVEC, H. Rover visual obstacle avoidance. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 1981, Vancouver. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 1981. p. 785-790.

⁵⁸ Detector é um tipo de algoritmo muito usado em visão computacional para selecionar automaticamente pontos específicos nas imagens.

utilizou pela primeira vez o conceito de "pontos de interesse" como trechos representativos da imagem, que podem ser usados para fazer a correlação de fotografias consecutivas.

Em 1977, Shimon Ullman redescobriu o teorema "*structure-from-motion*" de Kruppa e realizou os primeiros estudos⁵⁹ de recuperação simultânea da geometria do objeto e dos posicionamentos da câmera (BUCHANAN, 2010; SZELISKI, 2010).

Em 1992, Harris apresentou seu algoritmo desenvolvido para correlação de imagens, o detector de Harris, como evolução do detector de Moravec, e mostrou a importância de sua utilização para a criação de modelos geométricos a partir de fotografias tomadas de diversos ângulos (LOWE, 2004).

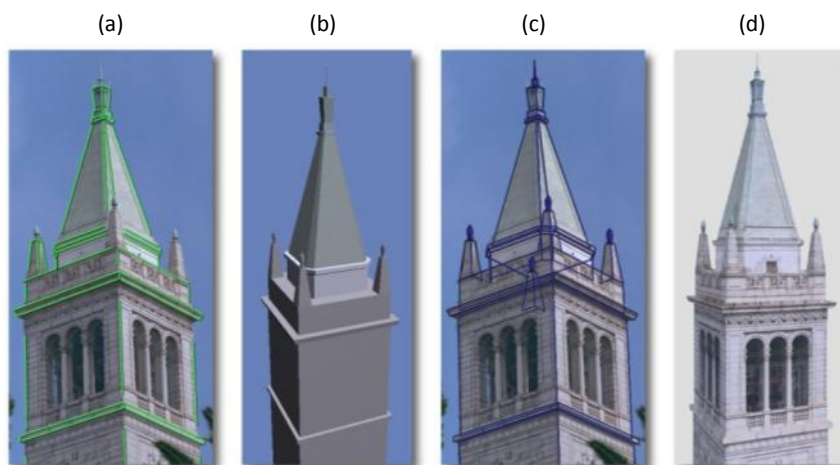
O detector de Harris possui muitas versões complementares e tem sido base para uma grande quantidade de trabalhos na área de reconhecimento de padrões visando a correlação automática de imagens (LÓPEZ, 2011). No entanto, esse detector é muito sensível a mudanças de escala, apresentando problemas na associação de imagens de diferentes tamanhos (LOWE, 2004).

David Lowe, em seu artigo publicado em 1999, apresentou seu novo algoritmo, o SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*), permitindo identificar mais "pontos de interesse", e sendo menos sensível a alterações nas imagens. Atualmente, o SIFT é o detector mais utilizado nas ferramentas para DSM. Isso se deve ao fato do conjunto de atributos locais extraídos pelo SIFT ser invariante a transformações de rotação, translação e escalonamento, insensível a presença de ruídos e parcialmente invariante a alterações de brilho, contraste, mudanças de ponto de vista e oclusões parciais (LÓPEZ, 2011).

Na mesma época, Debevec, Taylor e Malik (1996) apresentaram o sistema Façade, capaz de criar modelos geométricos tridimensionais fotorrealísticos (Figura 51) a partir de múltiplas imagens e utilizando processos mais automatizados de correspondência entre os estereopares, após a criação interativa de um modelo básico de referência. Esse trabalho é considerado a introdução da técnica "*Image-based Modeling*" (SEITZ, 2011).

⁵⁹ ULLMAN, S. The interpretation of structure from motion. In: ROYAL SOCIETY OF LONDON, 1979, [S.l.]. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1979. p. 405–426.

Figura 51 - Técnica “*Image-based Modeling*” criada por Debevec, Taylor e Malik (1996): (a) fotografia original com a marcação das arestas; (b) modelo geométrico gerado; (c) arestas do modelo projetadas na fotografia; (d) modelo fotorrealístico



Fonte: Disponível em: <<http://www.pauldebevec.com/Research/campanile-reconstruction.jpg>>. Acesso em: 20 mar. 2014

No final dos anos 1990, surgiram sistemas automatizados para geração de "nuvens de pontos" esparsa, sem a necessidade de calibração da câmera (SEITZ, 2011). Em 1998, Koch, Pollefeys e Van Gool⁶⁰, apresentaram modelos geométricos criados a partir de vídeos (sem calibração), o que culminou em grandes avanços nas técnicas de correlação de fotografias, processos de autocalibração e mapeamento de textura.

No início dos anos 2000, alguns pesquisadores publicaram trabalhos mostrando a utilização do SfM em um conjunto desorganizado de fotos, como Schaffalitzky e Zisserman (2002⁶¹), Brown e Lowe (2005⁶²). No entanto, essas técnicas foram utilizadas em pequena quantidade de fotos, tomadas pela mesma câmera.

Em 2006, Snavely, Seitz e Szeliski publicaram seu trabalho intitulado "*Photo Tourism*"⁶³ (Figura 52), um sistema para gerar modelos esparsos de "nuvens de pontos" a partir de fotos "desordenadas" disponíveis na internet, permitindo nova forma de "navegar" pelas fotos.

⁶⁰ KOCH, R.; POLLEFEYS, M.; GOOL, L. van. Multi Viewpoint Stereo from Uncalibrated Video Sequences. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION, Freiburg, 1998. **Proceedings...** Freiburg: [s.n.], 1998. p. 55-71.

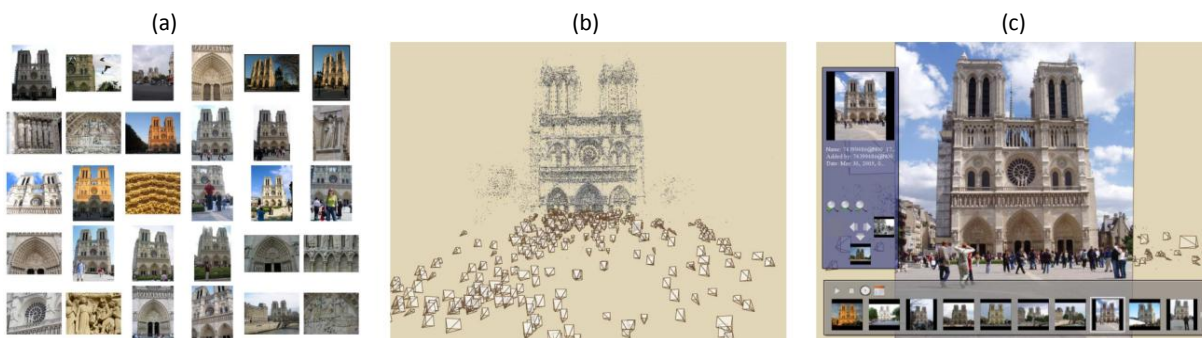
⁶¹ SCHAFFALITZKY, Frederik; ZISSERMAN, Andrew. Multi-view matching for unordered image sets, or "How do I organize my holiday snaps?". In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION - ECCV 2002, 7., 2002. **Proceedings...** Copenhagen: [s.n.], 2002, p. 414-431.

⁶² BROWN, Matthew; LOWE, David. Unsupervised 3D object recognition and reconstruction in unordered datasets. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON 3D DIGITAL IMAGING AND MODELING, 5., 2005. **Proceedings...** [S.l.]: [s.n.], 2005, p. 56-63.

⁶³ O *Photo Tourism* é fruto de um projeto de pesquisa do estudante de graduação Noah Snavely da University of Washington.

Esse sistema significou um grande avanço na técnica SfM, dado ao aumento da complexidade do processamento, onde foi possível o uso de grande quantidade de fotos, tomadas por diversas câmeras, em diferentes momentos e posições, com variações significativas em luminosidade, dentre outras características.

Figura 52 - Sistema "Photo Tourism" (a) coleções de fotografias desordenadas disponibilizadas na internet; (b) reconstrução dos posicionamentos das câmeras e geração de "nuvem de pontos" esparsa do objeto fotografado; (c) sistema de navegação através das fotos



Fonte: Snavely, Seitz e Szeliski (2006).

Ainda em 2006, a Microsoft desenvolveu o programa Photosynth, baseado no *Photo Tourism*. Em 2008, a nova versão do Photosynth, disponibilizada na Internet, permitia que usuários carregassem suas fotos para gerar "nuvens de pontos".

Em 2008, a empresa canadense Eos Systems Inc. lançou a primeira versão "scanner" do PhotoModeler (PhotoModeler Scanner 6), que requeria a calibração da câmera e a identificação interativa de pontos homólogos para orientação das fotografias. No final de 2010, surgiu a versão PhotoModeler Scanner 2010, que incorporou a opção "SmartMatch", eliminando a obrigatoriedade de identificação interativa de pontos ou uso de alvos codificados para orientação das fotografias, dada a possibilidade de uso da correlação automática de pontos homólogos, em situações específicas.

Em 2010, houve grande popularização da técnica DSM com o lançamento da ferramenta Photofly, que permitia a geração de um modelo geométrico em malha triangular (TIN) através do processamento remoto via *web*, nos servidores da Autodesk, das fotos carregadas pelos usuários. Em 2012, a Autodesk lançou o 123D Catch (em substituição ao Photofly), incluindo versão específica para iPad.

3.2.2 Princípio básico de funcionamento

Os algoritmos para DSM baseiam-se no princípio básico da fotogrametria estereoscópica ou estereofotogrametria, onde é possível reconstruir tridimensionalmente um objeto, a partir de imagens tomadas de diferentes pontos de vista e com grandes áreas de sobreposição (WESTOBY et al., 2012). Esse processo é realizado a partir da correlação automática de conjuntos de *pixels* homólogos em fotos distintas para obtenção das coordenadas tridimensionais de pontos contidos na superfície dos objetos fotografados, gerando assim, o modelo geométrico de "nuvem de pontos".

Para que seja possível essa correlação automática, é necessário que o objeto fotografado tenha textura não uniforme, de modo a produzir conjuntos diferenciados de *pixels* (padrões). Se o objeto possuir grande quantidade de textura uniforme, refletiva ou espelhada, o processo de associação dos *pixels* entre as fotos pode se tornar inviável ou apresentar um resultado final com muito ruído⁶⁴, com grandes áreas de sombra (sem informações) ou ainda ser pouco preciso. Este problema pode ser contornado através da sinalização das superfícies dos objetos a serem levantados, por meio de alvos colados ou projetados por um ponto de luz fixo. Além disso, é necessário garantir que as texturas (feições dos objetos) sejam bem visualizadas nas fotos, que a resolução das imagens estejam compatíveis com a precisão requerida pelo levantamento⁶⁵, e que a tomada fotográfica seja realizada de modo adequado (conforme descrito no item 3.2.4).

A forma mais simples de realizar a correlação dos *pixels* homólogos, no primeiro momento, seria tomar como referência o valor de intensidade de um *pixel* em uma foto e localizar na outra foto um *pixel* com o mesmo valor. No entanto, pode haver uma série de problemas decorrentes dessa busca (HULLO; GRUSSENMEYER; FARES, 2009):

- a) é possível haver ambiguidade na resposta, uma vez que podem existir vários *pixels* com os mesmos valores de intensidade;
- b) podem não existir *pixels* correspondentes entre as fotos, se existirem obstáculos que impeçam seu registro em uma determinada foto (tomada de outro ângulo);

⁶⁴ Utiliza-se o termo ruído para se referir a pontos registrados erroneamente na "nuvem de pontos".

⁶⁵ Isso pode ser feito basicamente de duas maneiras, através do cálculo da distância entre a câmera e o objeto fotografado, ou do controle da distância focal utilizada.

- c) é possível haver instabilidade na resposta, devido a variações radiométricas dos *pixeis*, situação muito comum, uma vez que a mudança de posição (entre as fotos) altera a coloração do *pixel*, influenciada pela diferença de luminosidade, sombreamento, reflexão de outros materiais, etc., e
- d) o tempo para correlação de *pixeis* individuais em toda a extensão da fotografia (geralmente de alta resolução), tornaria o processo extremamente lento.

A partir dos motivos apresentados, fica clara a razão de serem utilizados conjuntos de *pixeis* (áreas que incluem pontos vizinhos) para a correlação automática das várias fotografias, sendo possíveis ainda pequenas variações na coloração dos *pixeis*, definidas por um escore de correlação (HULLO; GRUSSENMEYER; FARES, 2009).

A escolha desses conjuntos de *pixeis* é realizada por algoritmos específicos, e representa importante etapa da técnica DSM. Foram identificadas na literatura várias expressões equivalentes que descrevem esses "conjuntos de *pixeis*", extraídos automaticamente das fotografias. A relação das principais expressões está no Quadro 8, onde são descritas, tanto na língua portuguesa como na inglesa. Entretanto, são utilizados com mais frequência os termos "feições" e "pontos chaves".

Quadro 8 - Principais expressões, na língua portuguesa e inglesa, utilizadas para se referir a conjuntos específicos de *pixeis* extraídos de fotografias

EXPRESSÕES EM PORTUGUES	feições	pontos chaves	pontos de interesse	pontos característicos	padrões
EXPRESSÕES EM INGLÊS	<i>features</i>	<i>keypoints</i>	<i>points of interest</i>	<i>feature points</i>	<i>pattern</i>

Fonte: elaboração da autora.

Antes de detalhar as etapas de geração da "nuvem de pontos" com a técnica DSM é importante entender o termo "feição" (*feature*). "Feição" pode ser definida como uma entidade (conjunto de *pixeis*) ou padrão, do qual é possível extrair algum tipo de característica, seja simbólica ou numérica (LÓPEZ, 2011). Segundo Silva (2010, p. 12), uma "*local feature*"⁶⁶ é:

⁶⁶ Além da "*local feature*" existe a "*global feature*", que permite definir e comparar as características globais da imagem baseados em área, perímetro ou simetria do objeto. Como as características globais são sensíveis a mudanças de escala e a orientação, é mais interessante o uso de técnicas de extração de características locais, menos sensíveis a variações das imagens - diferença de pontos de vista, de escala e orientação (PORTINARI JÚNIOR, 2013).

[...] um padrão da imagem que difere de seus vizinhos imediatos. Ela é geralmente associada a uma mudança de uma propriedade da imagem ou várias simultaneamente, porém a *feature* não está necessariamente localizada nesta mudança. As propriedades da imagem geralmente consideradas são intensidade, cor e textura.

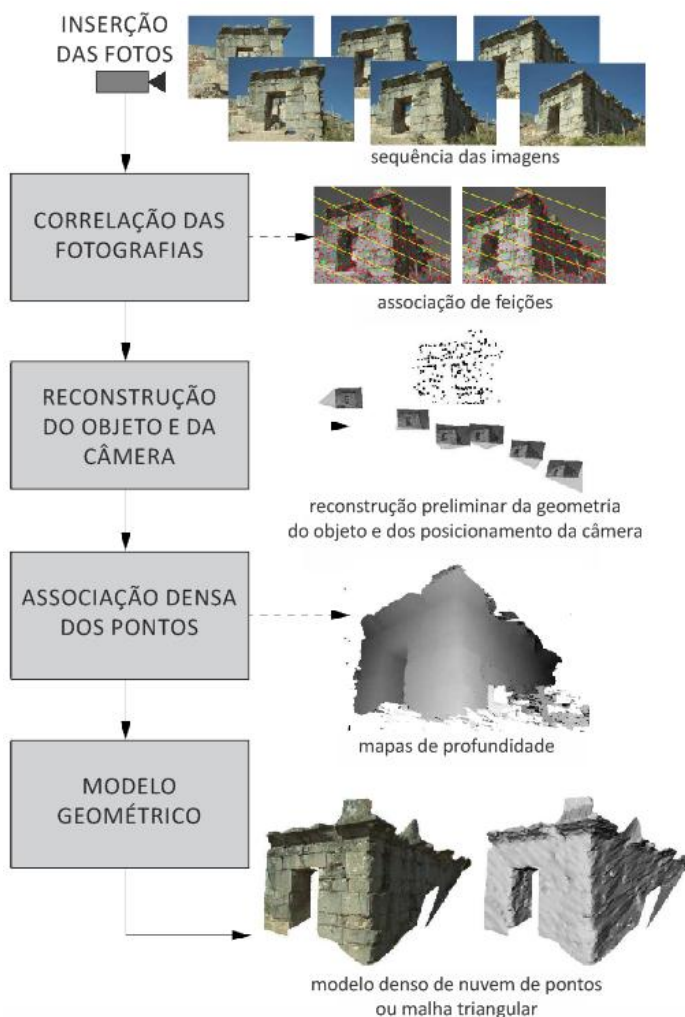
As feições (ou pontos chaves) são trechos nas imagens onde há maior discrepância de valores de intensidade, comparado com sua área vizinhança (PORTINARI JÚNIOR, p. 19). Podem ser encontradas e reconhecidas em outras imagens, por serem praticamente invariantes às mudanças de pontos de vista, de escala, rotação e iluminação nas diversas fotografias. Pontos chaves típicos são vértices, feições circulares, áreas com textura não uniforme, ou ainda feições aplicadas artificialmente, como os alvos (*targets*). A função desses pontos chaves é permitir a correta associação entre as fotografias e diminuir o tempo computacional, pois não é necessário o rastreamento de todos os *pixels* nas imagens (SILVA, 2010, p. 12).

3.2.3 Etapas para geração de "nuvens de pontos"

O processo de geração de "nuvem de pontos" com a técnica DSM pode ser dividido em cinco etapas (Figura 53), descritas a seguir (POLLEFEYS et al., 2002):

- inserção das fotos;
- correlação das fotografias através da associação automática de feições;
- reconstrução da geometria do objeto e da câmera (processo conhecido como *Structure from Motion*), gerando "nuvem de pontos" esparsa e obtendo valores aproximados dos parâmetros internos da câmera e dos posicionamentos das estações);
- associação densa de *pixels* homólogos (processo denominado de *Dense Matching*), por meio dos mapas de profundidade;
- criação do modelo geométrico, na forma de "nuvem de pontos" densa ou malha triangular.

Figura 53 - Síntese das etapas para geração de modelos geométricos através da técnica DSM



Fonte: adaptado de Pollefeys e colaboradores (2002).

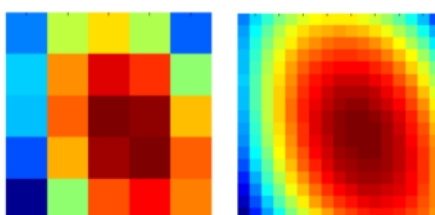
A partir da inserção das fotografias, a primeira etapa de processamento consiste em determinar os posicionamentos da câmera no momento da tomada fotográfica (orientação externa relativa). Esse processo é realizado através da detecção e associação de feições correspondentes nas diversas imagens, sendo dividido em três estágios (SZELISKI, 2010):

- **detecção das feições** - onde é realizada a busca por pontos chaves que aparecem em outras imagens;
- **descrição das feições** - os pontos chaves detectados são classificados através de descritores;

- **associação das feições**⁶⁷ - tomando-se como referência os descritores, é feita a associação dos pontos chaves correspondentes nas várias fotografias.

Inicialmente, há a identificação automática de pontos chaves⁶⁸ em cada imagem, realizada por algoritmos específicos. Muitas vezes é necessário usar um método de correlação que permita fazer a interpolação dos *pixels*, para que se possa trabalhar em nível do *subpixel* (Figura 54), permitindo aumentar a precisão no processo de associação das fotografias (REZNICEK; PAVELKA, 2008).

Figura 54 - Exemplo da interpolação em nível do *subpixel*



Fonte: Reznicek e Pavelka (2008).

Figura 55 - (a) Foto de uma edificação; (b) *Keypoints* representados por vetores (indicando escala, orientação e localização), através do algoritmo SIFT



Fonte: Lowe (2004, p. 11).

A identificação desses pontos chaves é seguida de sua classificação, ou seja, da geração de descritores para cada feição detectada, uma forma mais compacta e estável de identificação e associação dos *keypoints* nas diversas imagens (LOWE, 2004). Geralmente os descritores

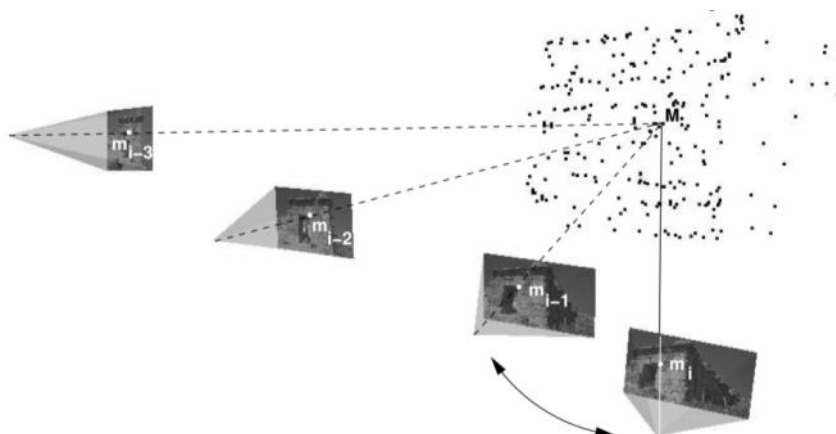
⁶⁷ Também chamada de *feature matching*, a etapa de rastreamento de feições (*feature tracking*) é uma alternativa para o terceiro estágio (associação das feições), sendo adequada para processamento de vídeo, pois a busca é feita somente em uma pequena área de vizinhança próxima a cada ponto detectado.

⁶⁸ O número de pontos chaves depende de vários fatores, como a resolução da foto, a textura do objeto e o algoritmo utilizado para detecção de feições.

são representados por vetores a partir dos valores de gradientes da área de vizinhança do ponto de interesse, conforme pode ser visto na Figura 55.

A etapa seguinte, de associação (*matching*⁶⁹) de pontos chaves, consiste em comparar os valores dos "descritores" (vetores) das feições nas várias fotografias. Para que a associação seja realizada de modo adequado é importante que os descritores permaneçam invariantes a mudanças de pontos de vista e iluminação e possíveis ruídos da imagem (MOONS; VERGAUWEN; GOOL, 2008).

Figura 56 - Associação de feições para obtenção da "nuvem de pontos" esparsa e determinação dos parâmetros da câmera



Fonte: Pollefeys e colaboradores (2002, p. 6).

A associação de feições inicia-se com um par de fotografias (Figura 56), permitindo obter as coordenadas tridimensionais dos pontos através da triangulação. O processo é estendido e refinado, através da utilização desse procedimento de modo sequencial em todas as imagens, gerando ao final dessa etapa:

- a "nuvem de pontos" esparsa - formada pela triangulação dos pontos chaves correspondentes nas várias fotografias;
- a estimativa dos posicionamentos e orientações da câmera, e
- a autocalibração da câmera para obtenção dos parâmetros internos (aproximados).

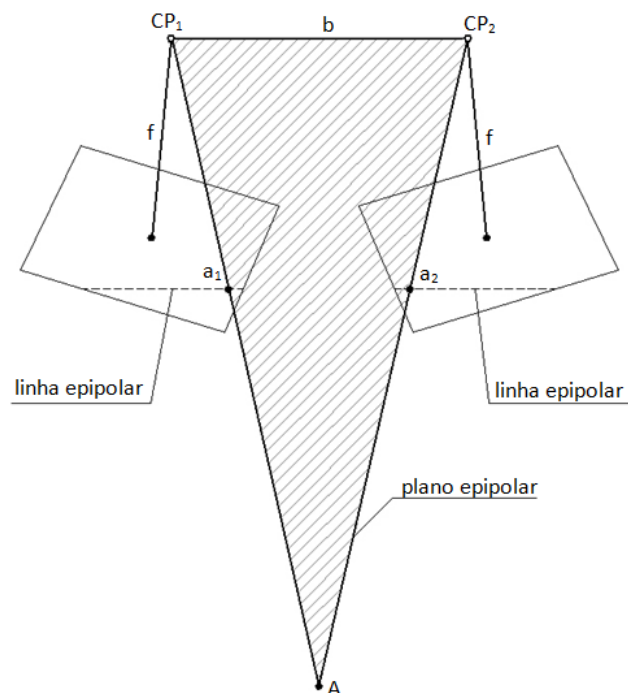
O próximo passo consiste na utilização de algoritmos para *dense matching* (ou *stereo matching*) para associação de todos os *pixels* de uma imagem com os correspondentes nas

⁶⁹ A associação de pontos chaves também é conhecida como casamento ou emparelhamento de feições.

outras fotografias, visando a obtenção de suas coordenadas tridimensionais e permitindo a geração do modelo denso de "nuvem de pontos" (POLLEFEYS et al., 2002).

Essa densa correlação de *pixels* homólogos torna-se viável nessa fase, uma vez que os parâmetros da câmera foram determinados na etapa anterior, permitindo simplificar a forma de busca e associação de todos os pontos entre as fotografias, através da determinação das linhas epipolares.

Figura 57 - Princípio da geometria epipolar

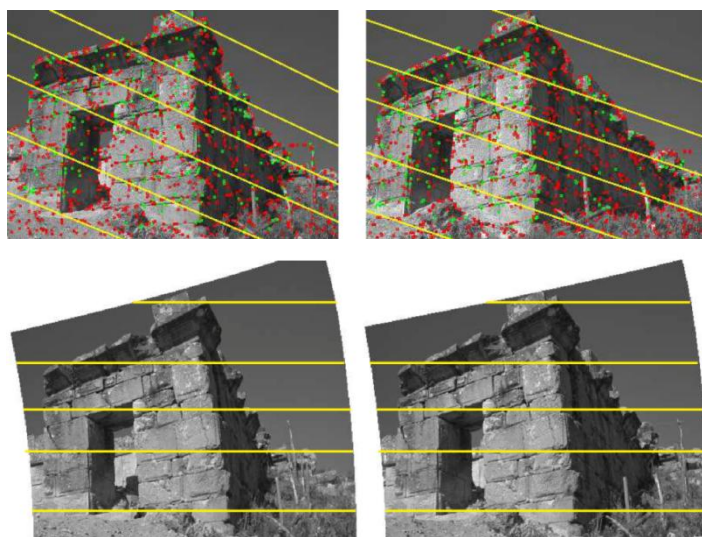


Fonte: Groetelaars (2004).

O princípio da geometria epipolar pode ser visualizado na Figura 57, que ilustra o ponto "A" do objeto visto em um par de fotografias, a partir dos pontos correspondentes nas imagens a_1 e a_2 . O plano definido pelos três pontos CP_1 , CP_2 e A é conhecido como plano epipolar. As linhas geradas a partir da interseção do plano epipolar com as duas fotografias são referidas como linhas epipolares correspondentes. Se um ponto do objeto estiver situado em determinada linha epipolar de uma fotografia, ele estará certamente situado na linha epipolar conjugada da outra foto (GROETELAARS, 2004). Dessa forma, há automação da correlação dos pontos homólogos, uma vez que a busca dos pontos correspondentes nas várias fotografias fica restrita a uma dimensão (1D), ao longo da linha epipolar, ao invés de toda a imagem (2D).

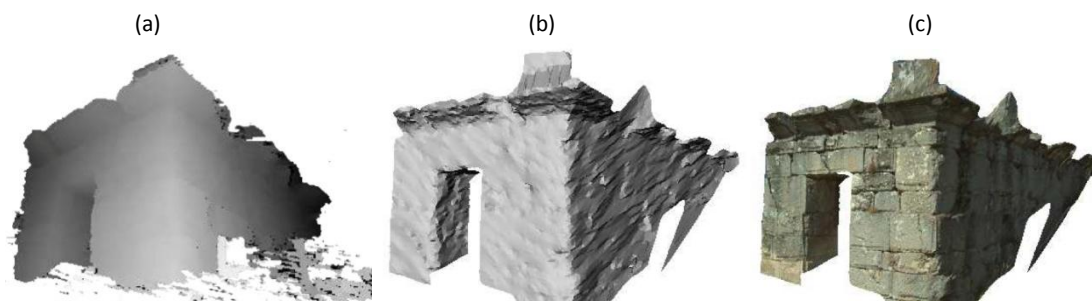
Outro procedimento que facilita a busca de *pixels* homólogos é a retificação epipolar. As imagens são ajustadas para tornar coplanares e paralelas as linhas epipolares conjugadas (Figura 58).

Figura 58 - Exemplo de um esteopar com linhas epipolares (amarelo) em duas situações: desalinhadas (imagens superiores) e alinhadas e na horizontal após a retificação epipolar (imagens inferiores)



Fonte: adaptado de Pollefeys e colaboradores (2002).

Figura 59 - (a) mapa de profundidade; (b) modelo em malha triangular; (c) modelo com foto-textura aplicada



Fonte: adaptado de Pollefeys e colaboradores (2002).

Depois disso, é possível estimar a profundidade (a distância da câmera para a superfície do objeto) para praticamente todos os *pixels* da imagem. Nessa etapa são criados os mapas de profundidade⁷⁰ - *depth maps* (Figura 59a), onde a distância de cada ponto do objeto em relação à(s) câmara(s) usada(s) é codificada em tons de cinza. Pontos muito distantes têm disparidade mínima, assumindo geralmente o valor 0, correspondente à cor preta, e pontos muito próximos têm a máxima disparidade, sendo atribuídos ao valor 255, cor branca (AZEVEDO, 2002). A partir da junção de todos os mapas de profundidade obtém-se o modelo

⁷⁰ Também conhecidos como mapas de disparidade (*disparity maps*).

denso de "nuvem de pontos" ou a malha triangular, com ou sem aplicação de foto-texturas (Figura 59b e c).

Após a criação do modelo denso de "nuvem de pontos" ou da malha triangular (dependendo da ferramenta utilizada), é possível realizar algumas operações básicas, como preenchimento de vazios, filtragem ou simplificação (decimação) da malha. Pode-se também corrigir a escala do modelo (1:x – indeterminada) para a escala natural (1:1) e sua rotação (eixos x, y e z), a partir de dimensões tomadas sobre o objeto real e dos eixos cartesianos do mesmo, ou ainda através de coordenadas tridimensionais obtidas por levantamento topográfico.

Finalizado o modelo de "nuvem de pontos" ou da malha TIN, é possível exportá-lo para outros programas para a realização de pós-processamento, ou seja, para a obtenção de outros produtos derivados, como desenhos, modelos de superfícies ou sólidos (paramétricos ou não) ou modelos BIM, HBIM⁷¹ (*Historic Building Information Modelling*), dentre outras possibilidades.

3.2.4 Tomada fotográfica

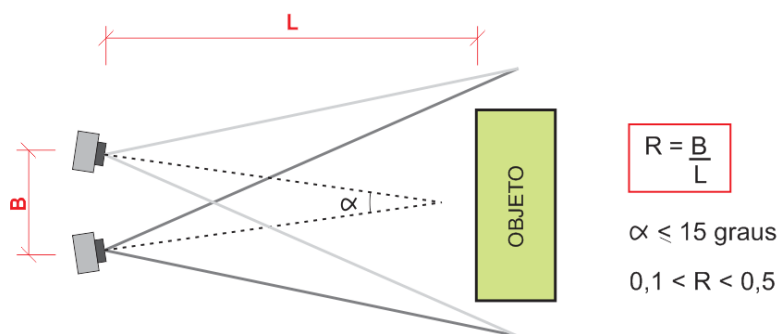
A tomada fotográfica, ou captura das imagens, é uma etapa extremamente importante, que influencia todas as fases da técnica DSM (inclusive sua viabilidade) e tem relação direta com a qualidade do produto final. Dentre os principais aspectos da tomada fotográfica, destacam-se: resolução das imagens, nitidez dos elementos fotografados, quantidade de fotos e os ângulos de tomada das mesmas, e presença de textura não uniforme nos trechos fotografados dos objetos (WESTOBY et al., 2012).

É difícil a especificação de número mínimo de fotografias a serem tomadas de um objeto para obtenção de resultado adequado da "nuvem de pontos", uma vez que são muitas as variáveis envolvidas como, complexidade do objeto, tipo de iluminação, tipo de material e de textura, escala, nível requerido de detalhe, posição e tamanho de obstáculos, etc. Entretanto, há uma série de cuidados que devem ser considerados na tomada fotográfica, quais sejam (GROETELAARS; AMORIM, 2012a):

⁷¹ HBIM é o termo mais utilizado atualmente para se referir a modelos BIM de edificações de interesse histórico-cultural. Esse assunto será abordado no capítulo 5.

- Cada parte do objeto a ser registrada deverá ser fotografada em pelo menos três posições diferentes, com ângulos nulos (fotos paralelas) ou menores que 15 graus entre si (Figura 60). Pierrot-Deseilligny, De Luca e Remondino (2011) recomendam que exista uma sobreposição mínima de 80% entre as fotografias tomadas do objeto.

Figura 60 - Esquema em planta dos dados a serem considerados na tomada fotográfica: distância entre as estações (B), distância para o objeto (L) e ângulo entre as tomadas fotográficas (α)



Fonte: elaboração da autora.

- Deve-se observar a relação R (B / L) no seguinte intervalo $0,1 < R < 0,5$, onde (B) é a distância entre as estações na tomada fotográfica, e (L) a distância da estação para o objeto fotografado. Esta relação busca assegurar a elevada precisão geométrica do produto (valores mais altos de R) e, ao mesmo tempo, não produzir grandes variações entre os conjuntos de *pixels* a serem comparados (menores valores de R), o que dificultaria ou impediria a correlação automática dos mesmos. O Quadro 9 permite comparar as faixas de valores mais adequados de R (áreas mais escuras) em três parâmetros distintos: geometria, recobrimento e correlação, concluindo na última linha, que a faixa mais adequada (Ótimo R) é entre 0,3 a 0,1 (HULLO; GRUSSENMEYER; FARES, 2009).

Quadro 9 - Determinação do valor ótimo de R : áreas mais escuras representam valores mais favoráveis

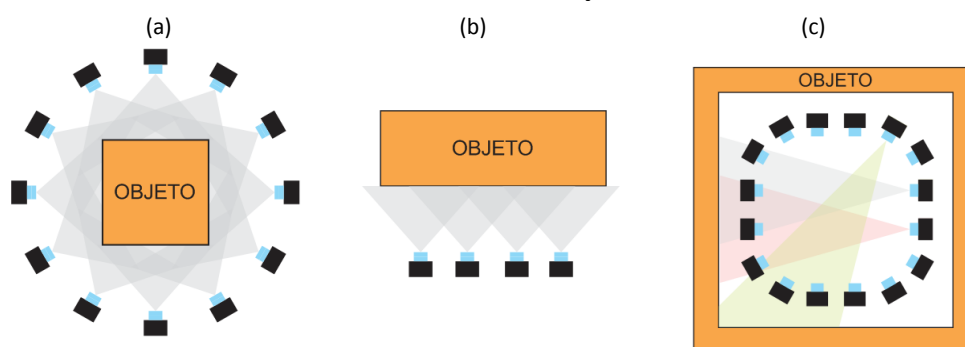
Valores de R	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
Geometria											
Recobrimento											
Correlação											
Ótimo R											

Fonte: adaptado de Hullo e colaboradores (2009).

- Deve-se fazer o levantamento fotográfico completo do objeto sob as mesmas condições de luminosidade, ou seja, deve ser realizado em curto intervalo de tempo, se a tomada fotográfica for externa (sob iluminação solar), ou deve-se utilizar um ponto de luz fixa, se o objeto estiver sujeito à iluminação artificial. Essas medidas contribuem para diminuir a variação radiométrica⁷² entre as distintas fotos, possibilitando o processo de correlação dos *pixels* entre as mesmas.

A Figura 61 ilustra exemplos de tomadas fotográficas (visualizadas em planta) para o registro adequado em DSM. São apresentadas diferentes situações: (1) levantamento completo das superfícies externas de um objeto ou edificação, com pequenas inclinações na tomada fotográfica; (2) registro de somente um lado do objeto ou uma fachada, com fotografias paralelas entre si e, (3) levantamento do interior de uma edificação, de modo sequencial e focando nas paredes mais afastadas. Pode-se observar nos exemplos que há grandes áreas de sobreposição das imagens e que as tomadas fotográficas são realizadas de diferentes locais, ou seja, não é possível tirar fotos de uma mesma posição, como no caso de panoramas fotográficos. Além dessas recomendações, é importante a tomada fotográfica do objeto em diferentes alturas, visando cobrir todo o objeto e evitando áreas de sombra.

Figura 61 - Exemplos de tomadas fotográficas: (a) exterior de um objeto ou edificação; (b) uma fachada; (c) interior de uma edificação⁷³



Fonte: elaboração da autora.

3.2.5 Ferramentas para DSM

Foram desenvolvidos, nos últimos anos, diversos programas para Dense Stereo Matching, sejam soluções comerciais ou acadêmicas, sejam ferramentas para processamento local ou

⁷² Corresponde à pequena variação das cores entre as imagens, que acontece, neste caso, pela mudança da localização da estação.

⁷³ Ilustração do campo de visão da câmera em algumas estações (triângulos coloridos) para mostrar as áreas de interesse do interior de um ambiente: as paredes mais distantes.

remoto via *web*, sejam ainda, programas livres ou proprietários. As maiores diferenças entre eles estão relacionadas a: custo, interface, necessidade ou não de calibração da câmera, limite de fotos a serem processadas, precisão e densidade da "nuvem de pontos" ou da malha TIN gerada, possibilidade de definição da resolução, nível de automatização dos processos e tipos de formatos disponíveis para exportação (GROETELAARS; AMORIM, 2012a).

De forma geral, pode-se dividir as ferramentas para DSM em três grandes grupos, descritos no Quadro 10:

- processamento remoto gratuito via *web* (*free online service* ou *web-based tools*);
- programas livres gratuitos (*free software/open-source*), e
- programas comerciais (soluções proprietárias).

Quadro 10 - Classificação das ferramentas para DSM

PROCESSAMENTO REMOTO VIA WEB	PROGRAMAS LIVRES GRATUITOS	PROGRAMAS COMERCIAIS
ARC 3D	VisualSfM e APERO-MicMac	PhotoModeler Scanner
Microsoft Photosynth	Structure from Motion Toolkit (BundlerFocalExtractor, BundlerMatcher, Bundler, CMVS, PMVS2)	ShapeScan_SM
Hypr3D		Agisoft PhotoScan
My3Dscanner		Smart3Dcapture scanner
Autodesk 123D Catch		4e software
		Zscan
	EVO (EVOCapture, EVOCheck, UMap e SiteManager)	

Fonte: elaboração da autora.

3.2.5.1 Processamento remoto gratuito via *web*

Uma das primeiras ferramentas disponíveis para processamento remoto via *web* foi o ARC 3D (www.arc3d.be/), desenvolvido pela Katholieke Universiteit Leuven, a partir de 2005. Em seguida surgiram outros serviços *online*, como Microsoft Photosynth (www.photosynth.net), Hypr3D (www.hypr3d.com), My3Dscanner (www.my3dscanner.com), Autodesk Photofly (não mais disponível) e Autodesk 123D Catch (<http://www.123dapp.com/catch>), sendo este último uma evolução do Photofly.

Os programas *online* apresentam características semelhantes como, facilidade de uso (interface amigável) e grande velocidade para a geração dos modelos geométricos ("nuvens de pontos" ou malhas TIN) a partir do processamento automatizado das imagens realizado nos servidores de alto desempenho dos prestadores do serviço. No entanto, apresentam poucos recursos de edição (como a escolha do nível de detalhamento do produto gerado e alterações na associação entre os pontos homólogos), maiores restrições de uso, sendo permitidos geralmente para uso pessoal e educacional, sem fins lucrativos. Além disso, o grande problema desta categoria de programas está relacionado à propriedade dos dados (fotos originais e modelos gerados), que passam a ser de domínio dos fornecedores do serviço, podendo ser usados em pesquisas dos desenvolvedores, ou divulgados na rede.

3.2.5.2 Programas livres gratuitos

Dentre os programas livres (com código aberto) e gratuitos, um dos pacotes mais antigos e conhecidos é o Structure from Motion Toolkit, formado pelas ferramentas BundlerFocalExtractor, BundlerMatcher, Bundler, CMVS, PMVS2, disponíveis no *website*: <www.visual-experiments.com/demos/sfmttoolkit/>.

Outros exemplos mais recentes incluem os pacotes de programas VisualSfM e APERO-MicMac. O VisualSfM, disponível em <www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm/>, tem código parcialmente aberto e utiliza também os programas CMVS, PMVS2 para densificação da "nuvem de pontos". O segundo pacote, disponível em <www.tapenade.gamsau.archi.fr/TAPeNADe/Tools.html>, permite realizar de forma automática as etapas de orientação interna e externa (no APERO), e gerar densa "nuvem de pontos" (no MICMAC), com base nos parâmetros calculados pelo *software* anterior (PIERROT-DESEILLIGNY; DE LUCA; REMONDINO, 2011).

Os programas livres geralmente são desenvolvidos em instituições de ensino e pesquisa, a partir de projetos financiados por agências de fomento à pesquisa. As maiores vantagens de sua utilização incluem a disponibilização gratuita (para *download*) das ferramentas para diversas aplicações. Os problemas mais comuns estão relacionados à interface e aos manuais/tutoriais, que geralmente apresentam maior dificuldade para uso, demandando maior tempo de estudo e maiores conhecimentos em ferramentas computacionais e programação.

3.2.5.3 Programas comerciais

Dentre os programas para DSM comerciais mais conhecidos estão o PhotoModeler Scanner da Eos Systems <www.photomodeler.com>, o Zscan da Menci <www.menci.com> e o PhotoScan da Agisoft <www.agisoft.ru>. Mais recentemente foram lançados os programas Smart3Dcapture Scanner da Acute3D <www.acute3d.com>, em janeiro de 2011, o 4e *software* da empresa 4e (www.4-e.es) e o novo pacote da Menci, o EVO <www.menci.com>, ambos no início de 2012. Esse último inclui vários módulos: EVOcapture, EVOcheck, UMap e SiteManager, sendo mais flexível do que o Zscan, uma vez que não requer uso da barra fixa para a tomada de trios de fotografias de pontos calibrados.

As maiores diferenças entre eles são os custos (que podem variar entre 179,00 a 13.000,00 dólares), a necessidade de calibração da câmera (nos programas da Eos System e Menci), a precisão e alguns recursos específicos, como possibilidade de edição, definição da malha, etc.

3.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Esse capítulo apresentou diversos conceitos, processos e tecnologias associadas aos sistemas de varredura, visando a sistematização e a padronização de informações dispersas e difíceis de serem encontradas na literatura internacional, especialmente as relacionadas à técnica DSM.

O conteúdo apresentado visou um conhecimento mais profundo das técnicas de aquisição do modelo "nuvem de pontos", adotado nessa tese como referência principal (ou base) para a modelagem BIM.

O estudo dos conceitos e a sistematização das etapas de processamento para geração de "nuvens de pontos" por fotografias (DSM) permitiu que a escolha e a utilização de ferramentas para DSM fosse realizada de modo consistente, tendo-se maior controle das diversas etapas, e consciência dos procedimentos que interferem diretamente na qualidade do produto final. Desse modo, foi possível entender melhor o funcionamento das ferramentas e comparar processos e produtos gerados (apresentados nos capítulos 6 e 7).

De modo geral, a fundamentação teórica apresentada nesse capítulo permitiu o entendimento do funcionamento de cada técnica e a identificação de suas características, visando dar suporte também à escolha da mais adequada para situações específicas.

Uma comparação entre o *3D laser scanning* e o *Dense Stereo Matching* pode ser vista no Quadro 11. Dentre as vantagens da varredura a laser, destacam-se a rapidez e a precisão na obtenção de grande quantidade de informações; e do DSM, o baixo custo de levantamento e a flexibilidade de uso. A grande desvantagem do *3D laser scanning* está relacionada ao elevado custo da tecnologia ou da contratação dos serviços de varredura; e do DSM, a necessidade de textura não uniforme e o processamento em escritório para geração da "nuvem de pontos".

Quadro 11 - Comparação entre *3D laser scanning* e *Dense Stereo Matching*

	3D LASER SCANNING	DENSE STEREO MATCHING
VANTAGENS	"nuvem de pontos" produzida em campo (de forma rápida e precisa)	baixo custo (necessitando basicamente de câmera digital e <i>software</i> específico)
	possibilidade de varredura com ausência de iluminação	flexibilidade de uso, mesma técnica pode ser utilizada para objetos de diferentes dimensões
	técnica com metodologias de aquisição mais consolidadas para obtenção de elevada precisão	facilidade de transporte da câmera
DESvantagens	utilização de diferentes equipamentos a depender das características do levantamento (tamanho dos objetos e alcance do laser)	necessidade de maior controle da precisão dos resultados
	elevado custo do equipamento	necessidade de superfícies com textura não uniforme ou aplicação de sinalização artificial
	problema na varredura de determinados materiais (transparentes, reflexivos, etc.)	necessidade de processamento computacional em "escritório" para geração da "nuvem de pontos"
	possíveis riscos à saúde se houver exposição humana direta ao feixe laser	não pode haver variação da iluminação direcionada aos objetos
APLICAÇÕES	levantamento completo (interior e exterior) de edificações, incluindo detalhes	levantamento volumétrico (externo) de edificações, de trechos internos ou de detalhes arquitetônicos, com texturas não uniformes

Fonte: elaboração da autora.

Considerando uma série de aspectos, o *3D Laser Scanning* é mais indicado para o levantamento completo de edificações (interior e exterior), pelo rigor/precisão no

alinhamento das cenas (modelos parciais) e geração do produto final. Já o DSM, é mais indicado para o levantamento rápido e de baixo custo do exterior de edificações (em escalas menores) e de detalhes arquitetônicos, que apresentam texturas não uniformes.

Capítulo 4

Processamento de "nuvens de pontos"

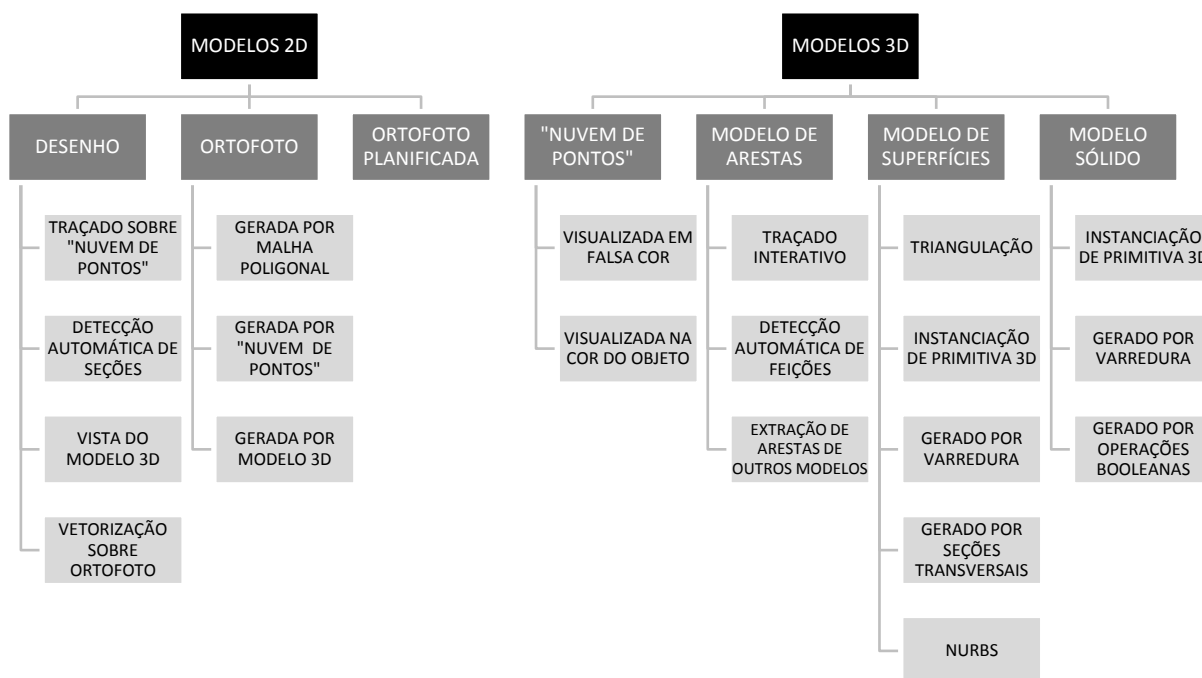
4 PROCESSAMENTO DE "NUVENS DE PONTOS"

Este capítulo trata das etapas de processamento de "nuvens de pontos" para obtenção de diversos tipos de produtos. Inicia-se com a apresentação de modelos bi e tridimensionais que podem ser obtidos a partir de processos interativos, semiautomáticos e automáticos sobre as "nuvens de pontos". Descreve as diversas etapas de levantamento realizado com varredura a laser, desde as fases iniciais de planejamento e aquisição dos dados em campo, até as fases finais de processamento da "nuvem de pontos". Ao final, classifica as ferramentas computacionais específicas para processamento desse tipo de modelo, apresentando suas principais características e funções.

4.1 REPRESENTAÇÃO NUMÉRICA DA FORMA

Neste item são discutidos os principais tipos de modelos para a representação da forma que podem ser obtidos pelos sistemas de varredura (*3D laser scanning* ou DSM), tanto os produtos primários ("nuvem de pontos") quanto os secundários, através do processamento das "nuvens de pontos". A Figura 62 ilustra os modelos bi e tridimensionais, juntamente com as principais operações necessárias para obtenção de cada tipo de produto.

Figura 62 - Modelos numéricos para a representação da forma

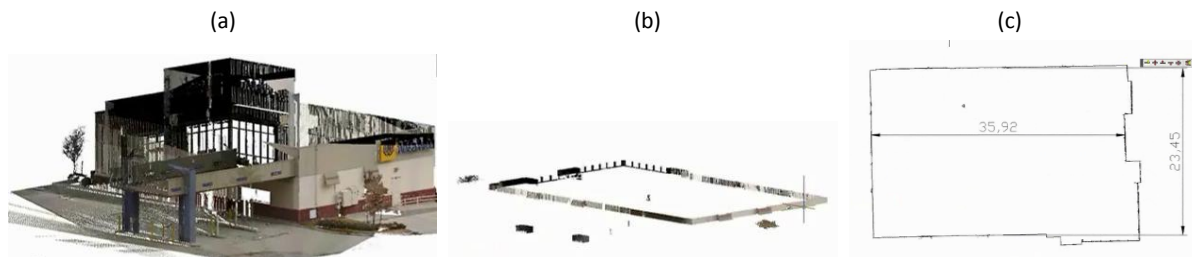


Fonte: elaboração da autora.

Com relação aos produtos bidimensionais, que podem ser obtidos pelos sistemas de varredura, tem-se: desenhos, ortofotos e ortofotos planificadas.

O processo utilizado para obtenção de **desenhos** (plantas, cortes e elevações) geralmente é realizado a partir do traçado interativo sobre uma seção de "nuvem de pontos" projetada no plano desejado, que corresponde ao plano de corte e ao que é visível após o mesmo (Figura 63).

Figura 63 - (a) "nuvem de pontos" do exterior de uma edificação; (b) seção selecionada da "nuvem de pontos"; (c) traçado do contorno em planta baixa

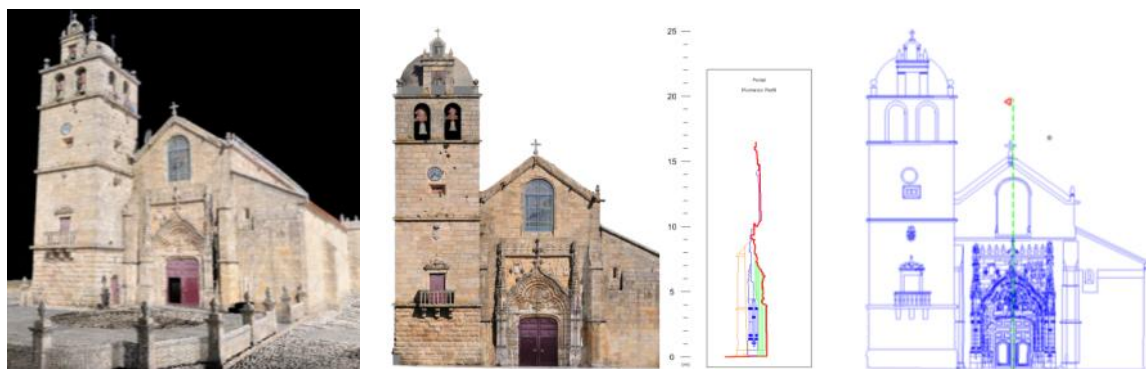


Fonte: imagens capturadas de um vídeo disponível em: <<http://www.kubit-software.com>>. Acesso em: 10 jun. 2012.

Outra forma de se obter desenhos por processo semiautomático é através do seccionamento da "nuvem de pontos" ou da malha poligonal em um plano definido pelo operador, gerando o desenho de uma seção do objeto. No entanto, é necessária a intervenção humana para verificar e complementar o produto gerado.

É possível gerar desenhos, de modo automático e indireto, a partir da seleção de posições do plano de corte no modelo geométrico (3D) já produzido. Além dessas formas, é possível a vetorização das feições de interesse sobre as ortofotos.

Figura 64 - (a) Modelo de "nuvem de pontos"; (b) ortofoto; (c) seção parcial; (d) fachada



Fonte: Disponível em: <http://arch3d.fa.utl.pt/III_seminario/conferencias/16_JBoavidaAOliveira.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2012.

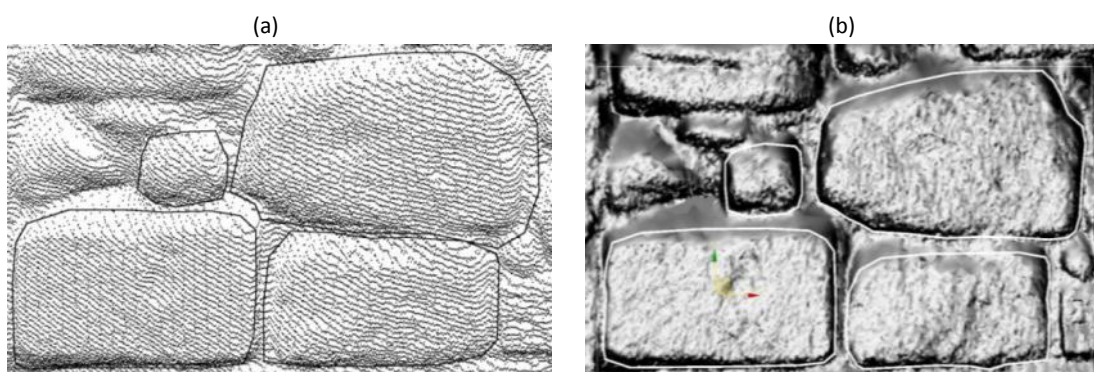
As **ortofotos** (Figura 64b) são imagens que não apresentam as deformações perspectivas sejam decorrentes do sistema de projeção cônica, da inclinação do eixo da câmara e das diferenças de profundidade do objeto, sejam das deformações decorrentes da refração da

luz pelo sistema óptico da câmera. São equivalentes às projeções cilíndricas ortogonais, podendo ser tomadas como fontes de informações métricas precisas na elaboração de desenhos (Figura 64d).

As ortofotos podem ser obtidas através da visualização em projeção cilíndrica de um ângulo conveniente (geralmente perpendicular à face principal do objeto) de uma "nuvem de pontos", de uma malha poligonal texturizada ou de modelos de superfícies gerados por técnicas fotogramétricas. Em objetos de formas mais complexas, podem ser geradas ortofotos de partes do mesmo, para posterior junção no modelo geométrico final, permitindo a obtenção de novas ortofotos (ou desenhos com texturas fotorrealísticas aplicadas) contemplando todo o objeto.

A vetorização interativa de feições é um processo lento e suscetível à habilidade e subjetividade humana. A Figura 65 ilustra diferentes resultados obtidos pela vetorização de ortofotos de um mesmo trecho da alvenaria de pedra, produzidas por "nuvem de pontos" e por malha triangular texturizada. Segundo Kimpton, Horne e Heslop (2010), a vetorização sobre a segunda ortofoto (Figura 65b) permite a identificação mais precisa dos contornos das pedras.

Figura 65 - Diferentes contornos obtidos pela vetorização de ortofotos geradas por: (a) "nuvem de pontos"; (b) malha triangular texturizada



Fonte: Kimpton, Horne e Heslop (2010).

Há alguns programas que permitem gerar **ortofotos planificadas** (Figura 66), úteis em se tratando de objetos com formas cilíndricas, cônicas ou elípticas.

Figura 66 - (a) "nuvem de pontos" do interior de uma edificação; (b) ortofoto planificada no programa LupoScan



Fonte: Disponível em: <<http://www.lupos3d.com>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

Com relação aos modelos numéricos para a representação tridimensional da forma que podem ser obtidos por sistemas de varredura, tem-se: as "nuvens de pontos" (produtos primários) e os modelos de arestas, de superfícies e sólidos (produtos derivados).

As "**nuvens de pontos**" constituem os produtos primários da varredura a laser e da técnica DSM (conforme já tratado anteriormente), permitindo representar as superfícies dos objetos através das coordenadas cartesianas (x , y e z) associadas a um atributo que pode ser a "cor visível" ou "falsa cor". Dada a sua simplicidade e a ausência de topologia, é um tipo de modelo que apresenta grandes limitações, sendo usado geralmente para fins de visualização, de determinação de dimensões do objeto ou como recurso para a geração de outros tipos de produtos.

Os **modelos de arestas**, também chamados de "estrutura de arame" ou *wireframe*⁷⁴, representam um modo de construção de objetos utilizando as arestas para definir seus limites, como segmentos de retas, poligonais e curvas. Foram os primeiros tipos de modelos geométricos (tridimensionais) desenvolvidos e, como não possuem superfícies, apresentam grandes limitações pela ambiguidade na visualização, sendo geralmente utilizados de modo auxiliar para a geração de outros produtos.

Os modelos de arestas podem ser obtidos pelo traçado interativo sobre a "nuvem de pontos", pela detecção automática de contornos (através da "nuvem de pontos" ou do

⁷⁴ O termo aresta ou *wireframe* é usado também para descrever um modo de visualização comum em programas para modelagem geométrica, onde são apresentadas somente as arestas que delimitam os objetos, independentemente do esquema de representação ou da estrutura de dados do modelo adotado. No entanto, o texto está focando no conceito associado à estrutura de dados do modelo geométrico.

modelo em malha triangular) ou através da extração das arestas de modelos de superfícies (malha poligonal e NURBS⁷⁵) e sólidos⁷⁶.

Na representação por **superfícies**, o modelo do objeto (sua volumetria) é definido pelas superfícies que o limitam. Como não representam as propriedades do interior do objeto, não permitem a análise de sua estrutura interna. Os tipos mais conhecidos de modelagem de superfícies são: instanciação de primitivas geométricas; planos opacos de vedação; malhas poligonais (sendo a malha triangular irregular a mais comum); superfícies NURBS, bezier, polinomiais, etc.; modelos gerados por varredura e por curvas (duas ou mais), e outros tipos de superfícies gerados pela seleção ou edição de formas preexistentes.

Os modelos **sólidos** permitem representar e manipular a geometria tridimensional de objetos de modo não ambíguo. Como sua modelagem está associada a determinadas propriedades, é possível realizar uma série de análises de sua estrutura interna e materializar fisicamente sua forma. Os principais métodos de geração de modelos sólidos são através de: instanciação de primitivas geométricas, operações de varredura, modelagem por fronteiras (B-Rep)⁷⁷, por composição (operações booleanas⁷⁸) ou por decomposição⁷⁹.

Existem diversas formas de geração de modelos geométricos a partir de "nuvens de pontos", seja através de programas CAD tradicionais, de ferramentas CAD-BIM⁸⁰ ou de programas específicos para processamento de "nuvem de pontos" (do tipo *plugin* ou *standalone*), cada um com suas especificidades. Geralmente nos dois primeiros grupos, utilizam-se métodos mais interativos, onde a modelagem é feita tomando a "nuvem de pontos" (importada)

⁷⁵ As superfícies NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) são usadas para representar objetos mais complexos, sendo geradas ou manipuladas a partir de pontos de controle de uma malha de curvas. Atualmente, pela sua versatilidade, as NURBS substituem praticamente as superfícies baseadas nas curvas de bezier e em polinômios.

⁷⁶ Essa operação é possível inclusive em ferramentas como o AutoCAD, que apresenta um comando (*xedges*) para extração das arestas de modelos de superfície e de sólidos. Em objetos curvos, nem todas as arestas visíveis são convertidas em linhas (*wireframe*).

⁷⁷ *Boundary Representation* (B-Rep), é um método de representação de modelos sólidos pelo conjunto de superfícies limítrofes do objeto, sendo mais adequado para a representação de formas em situações em que o conjunto de primitivas e as operações de varredura não são apropriadas para representação de um objeto.

⁷⁸ A modelagem sólida combina primitivas geométricas para a geração de modelos mais complexos usando as operações booleanas (união, interseção, diferença e seccionamento), através da técnica chamada *Constructive Solid Geometry* - CSG.

⁷⁹ Os tipos de modelagem por decomposição são: enumeração exaustiva, subdivisão do espaço ou decomposição de células (elementos finitos), que não serão aprofundados nesse trabalho.

⁸⁰ O processo de modelagem em ferramentas BIM é um assunto que será tratado nos capítulos 5 e 6.

como referência para o ajuste das formas, dimensões e posições dos objetos. E, no último grupo de programas, há mais recursos para automatização da modelagem e para análise dos produtos gerados. Dentre os métodos de modelagem mais usados, destacam-se:

- criação de modelos de arestas (*wireframe*);
- triangulação (superfícies);
- instanciação de primitivas geométricas (superfícies ou sólidos);
- operações de *sweep*⁸¹ (superfícies ou sólidos) de entidades bidimensionais;
- modelos gerados por curvas (superfícies);
- criação de formas livres (superfícies NURBS).

Após a geração dos modelos geométricos é possível a realização de operações para modificação ou refinamento da sua forma. As principais são:

- utilização de operações booleanas (sólidos ou superfícies fechadas);
- outras operações para modificação dos modelos geométricos (superfícies ou sólidos).

A escolha do método de modelagem depende de alguns fatores como: tipos de produtos e níveis de detalhe requeridos (em função de sua aplicação), tempo, recursos humanos, financeiros e tecnológicos disponíveis, dentre outros. Dependendo da natureza do trabalho e da diferenciação dos níveis de detalhe, partes do produto final podem ser gerados a partir de diferentes métodos. Nesses casos, é importante verificar antecipadamente a interoperabilidade entre os programas a serem utilizados, evitando-se problemas de compatibilidade e perda de informação.

A seguir, são detalhados os principais métodos de modelagem⁸², visando a geração de diferentes produtos derivados das "nuvens de pontos".

4.1.1 Criação de modelos de arestas

Os modelos de arestas correspondem a produtos primários de algumas técnicas fotogramétricas ou secundários da varredura a laser (Figura 67). Apresentam uma série de

⁸¹ Em português, "*sweep*" é chamado de "varredura". Não foi utilizado o termo em português, para evitar confusão com o outro sentido de "varredura", associado às tecnologias para captura de "nuvens de pontos".

⁸² Em alguns casos referem-se a processos disponíveis em ferramentas CAD (modeladores geométricos), em outros a operações realizadas em programas específicos para processamento de "nuvens de pontos", ou em ambos.

limitações, como: impossibilidade de atribuir materiais aos objetos, já que ele não apresenta superfícies, não permitem operações para visualização (como o *hide* e *rendering*), sendo comum a ocorrência de ambiguidades (não se sabe quais linhas estão na frente ou atrás). Além disso, não é possível calcular as propriedades físicas do modelo.

Figura 67 - Modelo de arestas sobre "nuvem de pontos"



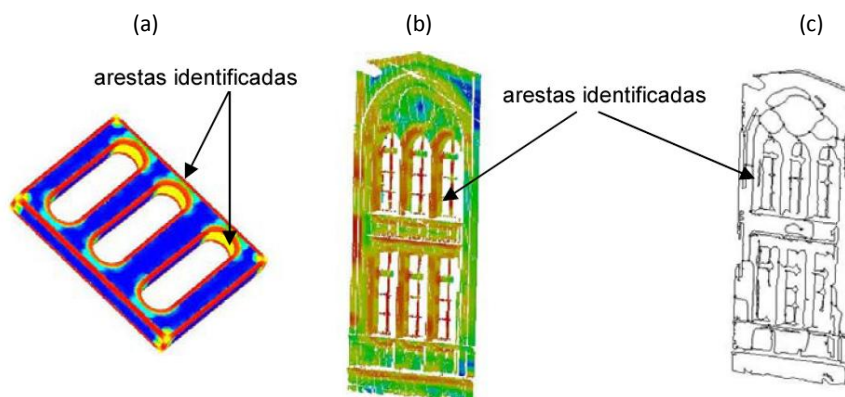
Fonte: Dutesco (2006, p. 88).

A criação de modelos de arestas pode ser realizada a partir de técnicas interativas, semiautomática ou automáticas.

No processo interativo, é necessário o traçado manual das feições com linhas, arcos ou polilinhas. Isto requer que o operador tenha conhecimento da edificação e tenha à disposição material fotográfico para auxiliar na interpretação de trechos da "nuvem de pontos" com menor resolução (GENEHTEN, 2008).

No processo semiautomático, é necessário selecionar uma pequena faixa da "nuvem de pontos", sobre a qual serão traçadas linhas que melhor se ajustem aos pontos. Nos processos automatizados, o programa realiza a detecção automática dos contornos dos objetos. Bons resultados podem ser obtidos quando a "nuvem de pontos" é suficientemente densa e quando a geometria do objeto é mais regular, o que é mais comum em plantas industriais e peças mecânicas, conforme ilustrado na Figura 68 (DUTESCU, 2006).

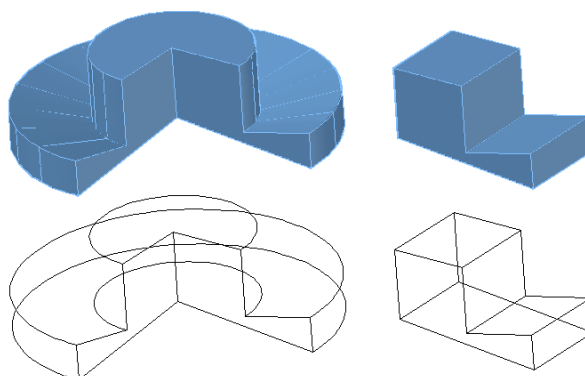
Figura 68 – (a) Detecção de feições em uma peça mecânica (contornos precisos); (b) "nuvem de pontos" de um elemento arquitetônico; (c) detecção das feições de detalhe arquitetônico (erros de classificação em forma complexa)



Fonte: adaptado de Dutescu (2006).

Há ainda a possibilidade de geração de modelos de arestas a partir da extração dos contornos de outros tipos de modelos já produzidos, como superfícies e sólidos (Figura 69).

Figura 69 - Modelos sólidos originais (imagens superiores, em azul) e arestas extraídas com o comando *xedges* do AutoCAD



Fonte: elaboração da autora.

Dadas as limitações dos modelos de arestas para a representação de formas detalhadas, geralmente eles são utilizados como base (ou auxílio) para obtenção de outros tipos de modelos geométricos, como superfícies e sólidos. Uma forma de melhorar a percepção da forma de objeto poligonal em *wireframe* é aplicar planos opacos de vedação, que podem estar associados a foto-texturas.

4.1.2 Triangulação

O termo triangulação, neste caso, refere-se ao processo de geração de malhas triangulares irregulares a partir de "nuvens de pontos"⁸³. A malha triangular irregular (do inglês,

⁸³ Em vários programas para DSM, a malha TIN é o primeiro produto gerado, antes mesmo da "nuvem de pontos".

Triangular Irregular Network - TIN) é o produto mais simples, sendo gerado por todos os programas para processamento de "nuvens de pontos".

As malhas TIN são tipos de modelos adequados para representação de objetos mais complexos e irregulares, que não podem ser gerados a partir outros métodos, como operações de varredura ou combinação de primitivas geométricas. A maior inconveniência desse tipo de modelo é requerer grande espaço para armazenamento, muitas vezes superior à "nuvem de pontos" original. Em programas mais robustos, podem tanto representar produtos finais, como intermediários para a geração de outros tipos de modelos, como as superfícies NURBS e os "modelos paramétricos"⁸⁴.

Apesar da malha TIN ser um dos produtos mais antigos derivados das "nuvens de pontos", é um tipo de modelo ainda muito utilizado para representação de formas complexas e irregulares, não só pela maior facilidade de sua obtenção (rapidez e disponibilidade de programas para sua geração), como pela capacidade de representação detalhada de formas irregulares.

4.1.3 Instanciação de primitivas geométricas

A representação de objetos pela instanciação de primitivas, sejam superfícies ou sólidos, é um método bastante utilizado de modelagem, devido à simplicidade e flexibilidade de emprego (LOPES, 2000). As primitivas geométricas, como prismas, cilindros, cones, pirâmides e planos, possuem atributos geométricos (e às vezes semânticos), cujos valores devem ser definidos pelo usuário no momento da inserção de uma nova instância. É possível criar formas mais complexas a partir da combinação de diversas primitivas, de modo a representar todo o objeto.

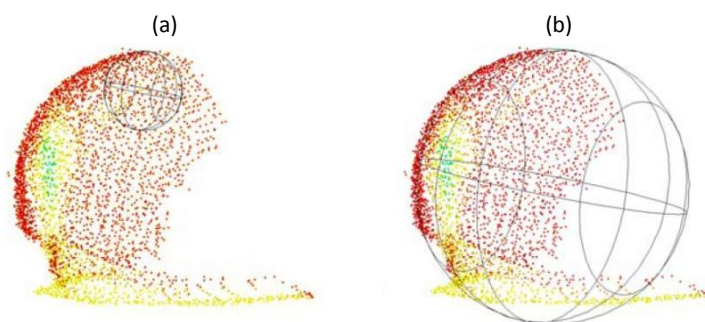
Existem programas que dispõem de primitivas mais complexas (como perfis metálicos, partes de peças mecânicas) e que permitem a criação de novas primitivas, que podem ser armazenadas em bibliotecas adequadas para determinadas aplicações.

⁸⁴ Os modelos paramétricos podem ser definidos, ajustados ou calibrados através de valores (parâmetros) determinados pelo usuário. Os parâmetros são estabelecidos hierarquicamente e podem controlar a forma e outras propriedades dos modelos. O conceito de modelagem paramétrica pressupõe a existência de meta-modelos e de instanciação (AMORIM, 2014).

É possível a instanciação de primitivas através de processos interativos, semiautomáticos ou automáticos.

A modelagem por processos semiautomáticos é o tipo mais comum, realizada em programas para processamento de "nuvens de pontos", a partir da seleção (feita pelo usuário) de um trecho da "nuvem de pontos" e posterior associação à primitiva tridimensional correspondente. A Figura 70 ilustra resultados de ajuste de uma esfera em duas situações distintas de seleção de um trecho da "nuvem de pontos", sendo correta a segunda, devido a um recorte mais abrangente da "nuvem de pontos".

Figura 70 - Ajuste da primitiva geométrica "esfera" sobre a "nuvem de pontos" selecionada: (a) falsa identificação; (b) correta identificação da esfera

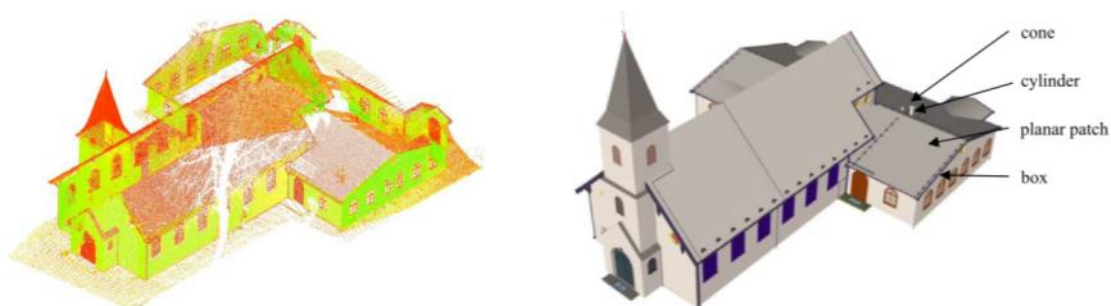


Fonte: Dutescu (2006).

Os processos mais automatizados estão voltados à área industrial, onde predominam os objetos com geometria regular, como tubulações, flanges, eixos, etc. Apesar dos recursos automatizados de modelagem, é necessária a supervisão humana para complementação/ajuste do modelo e verificação do produto gerado.

Para representação arquitetônica é mais comum a utilização de processos interativos, ou seja, a "nuvem de pontos" sendo utilizada apenas como referência de modelagem. O modelo de superfícies de uma edificação pode ser visto na Figura 71, gerado a partir da combinação de uma série de primitivas geométricas.

Figura 71 - Modelo de superfícies a partir do ajuste de primitivas sobre a "nuvem de pontos"

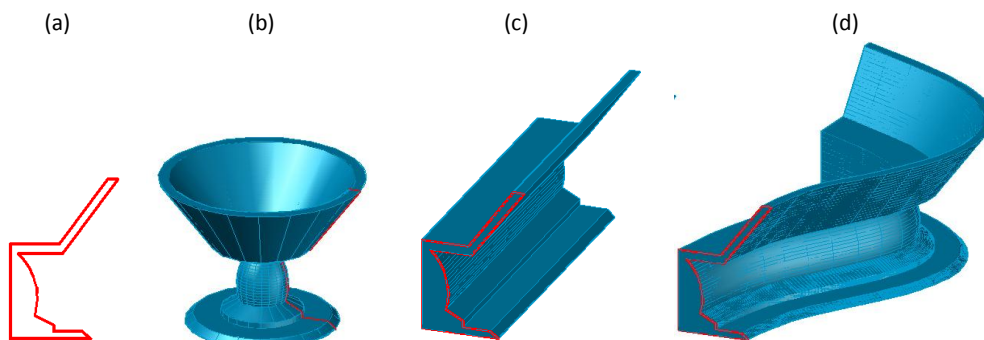


Fonte: Dutescu (2006, p. 40).

4.1.4 Operações de *sweep*

A geração de modelos de superfícies ou sólidos, através de operações de *sweep* (varredura), dá-se pelo movimento de uma entidade bidimensional (geratriz, conhecida como seção, perfil, contorno ou *profile*) ao longo de um caminho (diretriz, mais conhecida como *path*). Há dois tipos básicos de *sweep*, que variam em função da trajetória a ser realizada pela geratriz (Figura 72). Se o movimento é de rotação, a operação é denominada de revolução (*revolve*). Se o movimento da geratriz for de translação, trata-se de extrusão. Nesse último caso, há algumas particularidades, que variam em função da configuração da diretriz. Se o caminho não for especificado, a direção da extrusão será normal à geratriz, processo que pode ser chamado de extrusão "simples", usado para criar formas prismáticas. Quando a diretriz é uma curva sinuosa ou poligonal, tem-se a extrusão ao longo de um caminho, que permite criar formas mais complexas. Existem ainda as possibilidades de extrusão oblíqua e extrusão com variação da seção transversal.

Figura 72 - Modelos gerados por diferentes operações sobre um mesmo perfil: (a) perfil original; (b) revolução; (c) extrusão com diretriz reta; (d) extrusão com diretriz curva

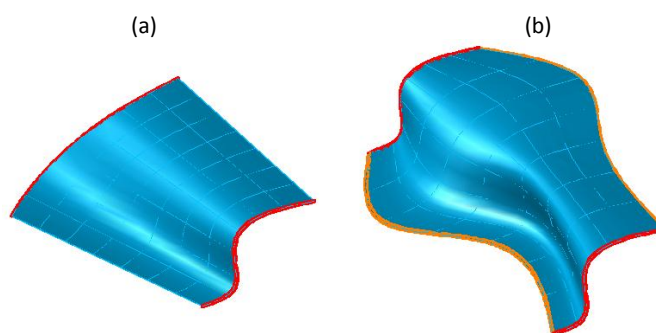


Fonte: elaboração da autora.

4.1.5 Modelos gerados por duas ou mais seções

Nesse grupo estão incluídos os modelos geométricos gerados por: (1) duas ou mais curvas transversais, operação geralmente chamada de *loft*⁸⁵ (Figura 73a), e (2) quatro seções (Figura 73b), sendo duas em uma direção "A" (em vermelho) e as outras duas na direção "B" (em laranja). Só podem ser executadas quando as curvas são de mesma natureza, ou seja, todas fechadas ou todas abertas. Geralmente são modelos do tipo superfície, mas, em alguns casos, pode-se gerar modelos sólidos, como o *loft* em seções fechadas.

Figura 73 - Modelos gerados por curvas (a) duas seções transversais; (b) quatro seções, sendo duas em cada direção



Fonte: elaboração da autora.

4.1.6 Criação de superfícies de formas livres

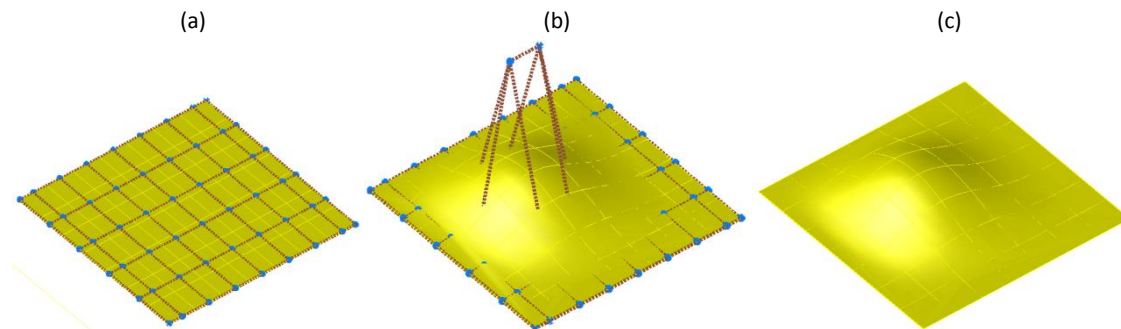
As superfícies de formas livres (*free-form*) são usadas para representar objetos mais complexos, dentre as mais conhecidas estão as superfícies do tipo NURBS. O termo NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) é usado para designar tanto um tipo de curva, como um tipo de superfície, desenvolvido na década de 1980.

Segundo Dutesco (2006, p. 68), a superfície NURBS é um dos tipos de modelos mais importantes, em diversas áreas industriais, devido à capacidade de representar tanto as formas geométricas mais simples quanto as mais complexas (incluindo as orgânicas), em formato de arquivo compatível com a grande maioria de programas para Computação Gráfica.

⁸⁵ É uma técnica ou um recurso, normalmente encontrado em programas para modelagem de formas complexas, que gera uma superfície cuja seção transversal é variável, mas conhecida. Pode ser usada quando se conhece a geometria das seções transversais, que podem ser curvas abertas ou fechadas, de mesma natureza, como círculos de raios variáveis, ou ainda, curvas de diferentes tipos, compostas ou não. Dois exemplos clássicos são, o casco de uma embarcação ou a fuselagem de um avião. Entretanto, pode ser usada para modelagem de edificações de formas complexas.

As formas livres são superfícies na forma de malha ou trama de curvas. Entre essas curvas estão os *patches* (retalhos), que juntos formam uma "casca" que envolve o objeto. As superfícies NURBS podem ser geradas ou manipuladas a partir de pontos de controle (Figura 74).

Figura 74 - (a) Superfície NURBS na forma de um segmento de plano; (b) deslocamento de dois pontos de controle para alteração da forma; (c) forma gerada, sem a visualização dos pontos de controle



Fonte: elaboração da autora.

Piegl (1991) descreve algumas vantagens na utilização das NURBS:

- é possível representar tanto formas analíticas padrão (cônicas, quadráticas, superfícies de revolução) como formas livres;
- há flexibilidade para representação de grande quantidade de formas, dadas às facilidades de manipulação dos pontos de controle e à existência de recursos de edição;
- maior rapidez na geração das formas complexas, além de necessitar de menor espaço de armazenamento;
- não há deformação dos modelos quando submetidos a operações de escala, rotação e translação.

As superfícies NURBS permitem a definição de superfícies complexas com curvas vetoriais contínuas, e com um menor número de pontos, se comparada às superfícies de malha poligonal tradicional, além da vantagem da superfície possuir o aspecto suave, tornando-as mais vantajosas para modelar formas reversas com curvaturas variáveis e "orgânicas" (CARDOSO, 2005).

Como desvantagens, são citadas três em particular: (1) necessidade de maior espaço de armazenamento, quando se tratam de curvas e formas simples; (2) criação de formas pouco

precisas, se o objeto não for manipulado corretamente, e (3) maior dificuldade para representação de interseções entre superfícies do que as técnicas tradicionais (PIEGL, 1991).

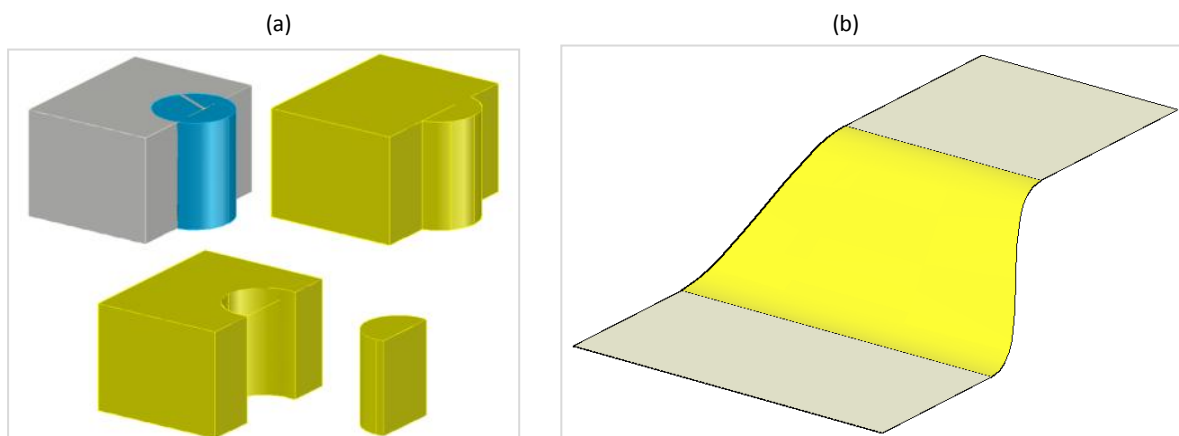
4.1.7 Operações para modificação dos modelos geométricos

As operações de transformação representam parte do processo de modelagem, geralmente aplicadas após a geração do modelo preliminar. Visam a modificação de algumas de suas características, permitindo o refinamento da geometria ou criando variações do mesmo elemento geométrico (POLONINI, 2014).

Segundo Polonini (2014), os métodos de transformação podem ser:

- geométricos - translação, rotação, espelhamento e escala de todo o objeto ou partes dele (neste último caso, deformando-o);
- de combinação - como as operações booleanas (união, diferença e interseção) ou através do *blend*, para combinação de duas ou mais superfícies (Figura 75).

Figura 75 - (a) Operações booleanas realizadas nos objetos de cores cinza e azul; (b) criação de superfície (amarelo) conectando dois objetos preexistentes (cinza), através do *blend*



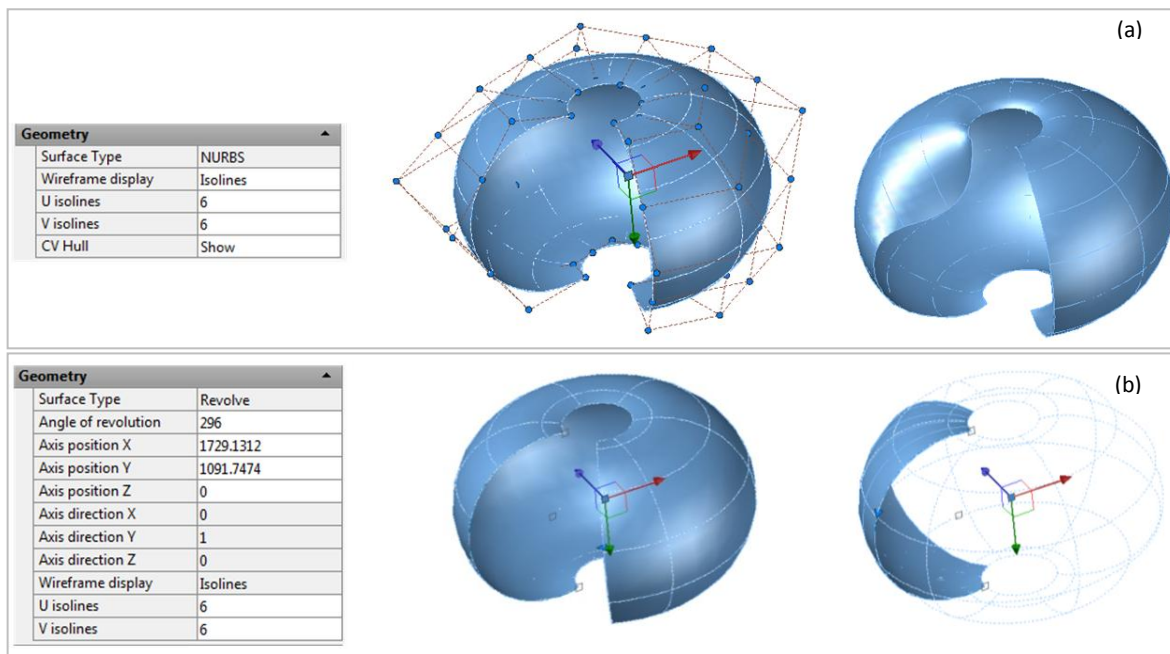
Fonte: elaboração da autora.

Outra possibilidade é a alteração de parâmetros, sendo estes sensíveis ao tipo de modelo gerado. Como exemplo, pode-se citar um modelo gerado no AutoCAD, através da revolução de um perfil. É possível a criação de três tipos de modelos idênticos em aparência com o mesmo comando *revolve*⁸⁶. No entanto, a escolha do tipo de modelo a ser criado, se superfície (do tipo *revolved surface* ou NURBS) ou sólido, irá influenciar as operações a

⁸⁶ É ainda possível criar um modelo em malha poligonal de aparência semelhante através de outro comando de revolução chamado *revsurf*.

serem realizadas posteriormente. A Figura 76 ilustra duas diferentes possibilidades de edição em modelos do tipo NURBS e *revolved surface*.

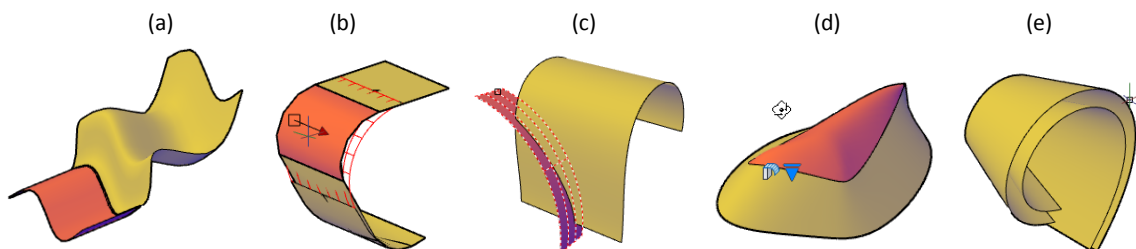
Figura 76 - Edição de dois tipos de modelo: (a) NURBS - manipulação interativa de pontos de controle; (b) "*revolved surface*" - alteração do parâmetro "ângulo de revolução" (de 296 para 40 graus)



Fonte: elaboração da autora.

Alguns programas permitem a conversão entre diversos tipos de modelos. No AutoCAD, por exemplo, é possível converter uma malha poligonal em "superfície padrão"⁸⁷ ou em sólido, sólido em superfície, ou ainda, "superfície padrão" em NURBS.

Figura 77 - Diferentes operações de modificação em superfícies: (a) surfextend; (b) surffillet; (c) surftrim; (d) surfpatch; (e) surfoffset



Fonte: Help do Autodesk AutoCAD 2012.

Além desse exemplo, existe uma série de comandos que podem ser utilizados para alteração ou complementação da forma preexistente. Dentre os principais, destacam-se os ilustrados

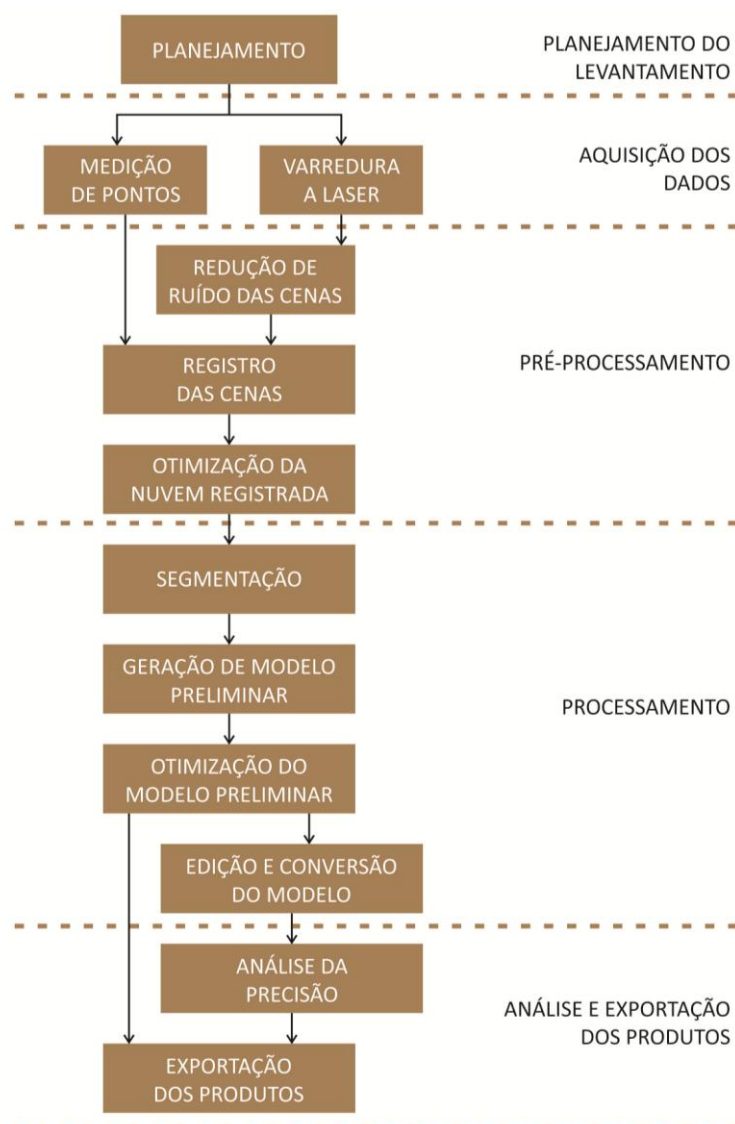
⁸⁷ O termo "superfície padrão" foi utilizado para diferenciar dos modelos de malha poligonal (*mesh*) e NURBS, que também são tipos de modelos de superfícies, porém com outras características. A superfície considerada "padrão" está associada aos comandos utilizados em sua geração, como *extrudedsurface*, *revolvedsurface*, *loftedsurface*, permitindo a alteração de uma série de parâmetros em suas propriedades.

na Figura 77, que permitem estender, concordar, aparar, fechar ou criar superfícies paralelas às selecionadas.

4.2 ETAPAS DE PROCESSAMENTO DO 3D LASER SCANNING

Neste item serão detalhadas as etapas de processamento com uso da tecnologia *3D laser scanning*, desde o planejamento do levantamento até a geração dos produtos derivados da "nuvem de pontos".

Figura 78 - Etapas de processamento do sistema de varredura a laser



Fonte: elaboração da autora.

As fases comumente realizadas para geração de "nuvens de pontos" pela técnica DSM já foram tratadas na seção 3.2.3. No entanto, as etapas finais de processamento da "nuvem de pontos" para geração de outros produtos são semelhantes para os dois sistemas de

varredura. As etapas comumente realizadas em um levantamento com a tecnologia *3D Laser Scanning* estão resumidas na Figura 78.

4.2.1 Planejamento do levantamento

Na etapa de planejamento, são definidos a finalidade do levantamento, a área, os objetos a serem capturados, bem como o nível de detalhamento requerido. Isso influenciará na localização das estações, na densidade das "nuvens de pontos" e no posicionamento dos alvos. Nesta fase, recomenda-se a tomada fotográfica da área para permitir a identificação das limitações espaciais dos objetos a serem levantados e de problemas passíveis de ocorrer, como: espaços muito movimentados, áreas de acesso restrito, objetos com superfícies especulares - vidros, superfícies polidas ou superfícies com baixa refletividade (GSA, 2009).

4.2.2 Aquisição dos dados

Na etapa de aquisição de dados, é feita a **varredura a laser** do objeto a partir de várias estações, para obtenção de diversas cenas, que visam levantar todos os objetos de interesse, reduzindo ao máximo as zonas de sombras (oclusões). Durante o escaneamento, geralmente são usadas diferentes densidades, que variam de acordo com a forma do objeto, com as finalidades do levantamento e com a definição das áreas de interesse mais detalhadas (GROETELAARS; AMORIM, 2011b).

Bryan, Blake e Bedford (2009, p. 21) definem níveis de precisão aceitáveis e valores de densidade da "nuvem de pontos", em função da escala de representação, conforme mostrado no Quadro 12.

Quadro 12 - Precisão e densidade da "nuvem de pontos" em função da escala

ESCALA	PRECISÃO ACEITÁVEL (mm)	RESOLUÇÃO DA "NUVEM DE PONTOS" (mm)
1/10	5	1
1/20	6	3
1/50	15	5
1/100	30	15
1/200	60	30
1/500	150	75

Fonte: adaptado de Bryan, Blake e Bedford (2009, p. 21).

Esses mesmos autores descrevem uma regra geral para determinação do espaçamento dos pontos: a resolução da "nuvem de pontos" deve ser ao menos a metade do tamanho do menor detalhe a registrar (BRYAN; BLAKE; BEDFORD, 2009, p. 116). Vale ressaltar que quanto maior a densidade da "nuvem de pontos", melhor será a percepção dos detalhes, no entanto, maior será o tempo de captura e o espaço de armazenamento do modelo de pontos, além das dificuldades óbvias de manipulação de arquivos maiores.

Além do espaçamento entre os pontos (resolução), há uma série de fatores que influenciam na precisão da "nuvem de pontos", dentre os quais pode-se citar: o material da superfície do objeto (cor, textura, refletividade), o tamanho do laser (*spot size*), o ângulo de incidência no objeto, a velocidade de escaneamento e a orientação horizontal e vertical em relação à direção do raio laser.

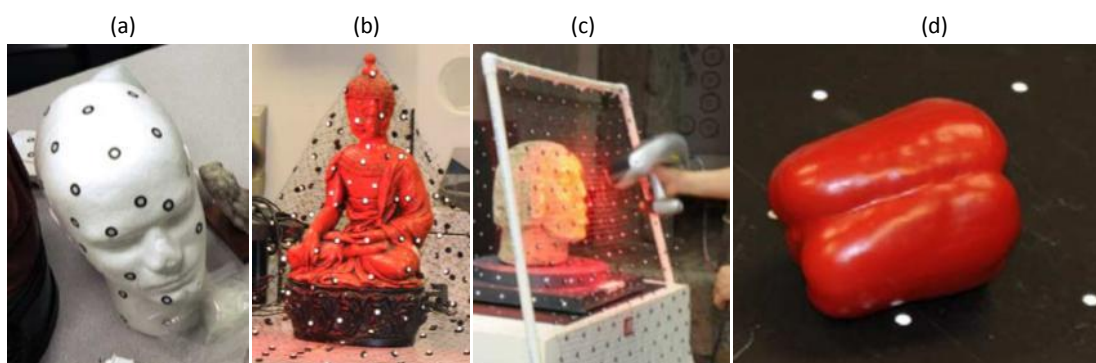
Ainda na aquisição de dados, é realizado o **levantamento dos pontos de controle** (geralmente com estações totais), que podem ser feições naturais do objeto, ou alvos (*targets*) aplicados sobre ou próximos à superfície do mesmo (Figuras 79 e 80), que tem como objetivos: (1) o registro das cenas, ou seja, o referenciamento das "nuvens de pontos" (modelos parciais) para um sistema de coordenadas único (arbitrário ou geodésico); (2) o controle da precisão dos resultados.

Figura 79 - Tipos de alvos para levantamento arquitetônico: (a) planos; (b) giratórios; (c) esféricos



Fonte: Abdelhafiz (2009).

Figura 80 - Tipos de alvos para pequenos objetos: (a) colados no objeto; (b) rede; (c) moldura; (d) na base



Fonte: Contreras (2009).

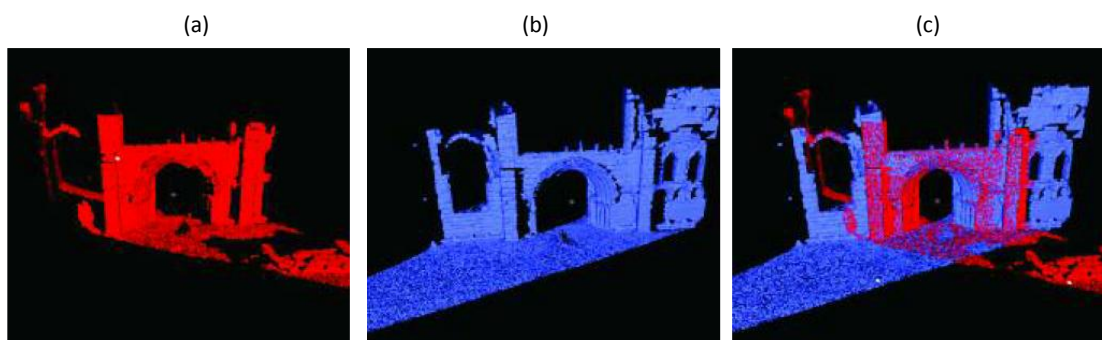
4.2.3 Pré-processamento

O pré-processamento consiste no preparo da "nuvem de pontos" para a realização das etapas posteriores. Inclui geralmente o registro (ou alinhamento) das cenas e as operações para otimização da "nuvem de pontos" (ZHIQIANG; WANG; LIU, 2009).

O **registro** consiste em posicionar as várias cenas (com suas coordenadas locais) em um único arquivo, com o mesmo referencial (Figura 81). Segundo Genechten e colaboradores (2008) e GSA (2009), isso pode ser realizado a partir das seguintes técnicas:

- identificação de alvos comuns a duas ou mais cenas;
- posicionamento do *scanner* sobre um ponto de coordenadas conhecidas (através dos pontos de controle levantados por estação total);
- identificação de características físicas do objeto (como vértices, limites e centros, escaneados, preferencialmente, com maior resolução);
- associação de duas ou mais "nuvens de pontos", com área de sobreposição de pelo menos 15 a 30% (preferencialmente 50%, para resultados mais robustos);
- associação de um trecho da "nuvem de pontos" de uma cena com uma superfície gerada de outra cena, correspondente à área selecionada, ou
- associação de superfície de uma cena com a superfície correspondente em outra cena.

Figura 81 - (a) "nuvem de pontos" da cena 1; (a) "nuvem de pontos" da cena 2; (c) "nuvem de pontos" após o registro



Fonte: Barber, Mills e Andrews (2011).

A técnica que utiliza alvos, para o registro da cena, é a mais utilizada e a que apresenta maior precisão. Nessa técnica, recomenda-se que existam entre cenas, ao menos, cinco alvos em comum, para haver redundância de informação, possibilitando a correção de erro em algum alvo (o que não seria possível se existissem apenas três). Além disso, esses alvos

devem ser dispostos de modo a estarem bem afastados entre si nas três dimensões (x, y e z) e em diferentes posições em relação ao equipamento laser (abaixo e acima, à esquerda e à direita), evitando-se, por exemplo, que estejam alinhados na horizontal e na vertical. O levantamento dos alvos pode ser realizado por métodos topográficos, garantindo maior controle da precisão e possibilitando o georreferenciamento da "nuvem de pontos". Além disso, os alvos e seus centros são identificados de modo automático ou semiautomático pelo programa de escaneamento. A desvantagem desse método é o maior tempo em campo para colocação dos alvos e para o escaneamento dos mesmos, com resolução superior à utilizada na varredura do objeto como um todo.

Em casos em que não é possível a colocação de alvos, pode ser utilizado o registro a partir da identificação de feições naturais. O GSA (2009) recomenda a utilização de pontos que façam interseção com três planos (por exemplo, três paredes de uma edificação), e que esses pontos naturais escolhidos na edificação sejam escaneados com alta resolução a partir de duas localizações.

Em casos onde não é possível a utilização de alvos, sejam naturais ou artificiais, podem ser usadas técnicas de associação de "nuvens de pontos". Dutesco (2006) sinaliza que esse método pode gerar resultados insatisfatórios se as "nuvens de pontos" apresentarem baixa resolução ou se forem selecionados trechos muito grandes desse tipo de modelo. Além disso, é um método sensível ao algoritmo utilizado.

O método anterior pode ser simplificado se for associado um trecho de "nuvem de pontos" (de uma cena) com a superfície correspondente (primitiva tridimensional) na outra cena ou entre superfícies correspondentes em duas cenas. Nesse caso, é desejável que a "nuvem de pontos" seja de boa resolução e que a primitiva modelada esteja bem ajustada ao trecho da "nuvem de pontos".

Antes e após o registro, é comum a realização de operações para **otimização da "nuvem de pontos"**, visando diminuir significativamente a quantidade de pontos e o tamanho do arquivo (GROETELAARS; AMORIM, 2011b). Essas operações incluem:

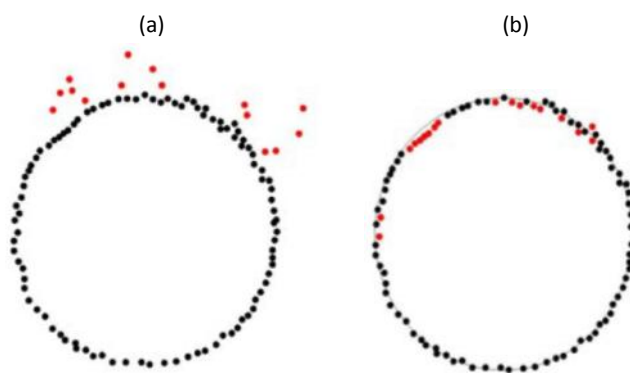
- filtragem;
- detecção e remoção automática de *outliers*;

- detecção e remoção automática de componentes desconectados;
- redução de ruído;
- reamostragem (*sampling*).

A **filtragem** ou limpeza consiste em apagar interativamente os pontos indesejados⁸⁸, como ruídos, obstáculos e objetos fora da área de interesse.

A **detecção e remoção automática de outliers** é uma operação realizada de modo semiautomático por programas para processamento de "nuvens de pontos", onde o usuário determina um valor de sensibilidade de seleção e depois decide se os pontos destacados estão corretos ou não. Os *outliers* são pontos dispersos, que não se ajustam a um padrão definido pela maioria dos pontos próximos da "nuvem de pontos". Eles são gerados durante o processo de escaneamento e podem produzir erros na etapa de modelagem. A Figura 82 ilustra a influência de diferentes valores de sensibilidade, na detecção dos pontos que "fogem a regra" de concentração dos pontos, nesse caso, uma circunferência.

Figura 82 - Detecção e remoção de *outliers*: (a) identificação de valores mais discrepantes; (b) seleção de pontos mais refinada



Fonte: Dutesco (2006, p. 33).

A **detecção e remoção automática de componentes desconectados**, ou seja, de pontos distantes da maior parte dos pontos da "nuvem de pontos", também é uma operação semiautomática, baseada nos valores determinados pelo usuário.

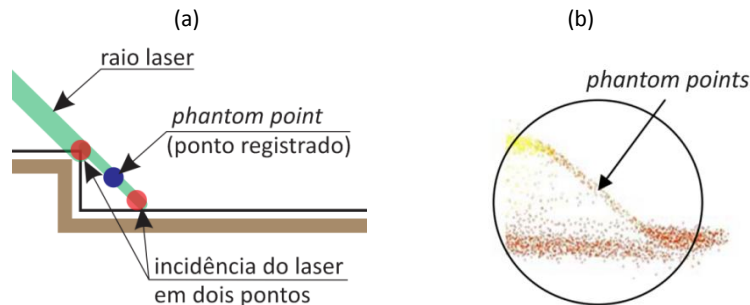
O processo de **redução de ruído** visa diminuir ou eliminar pontos registrados de forma "equivocada" em uma "nuvem de pontos". Esses pontos podem ser gerados durante a

⁸⁸ Os pontos indesejados podem ser divididos em duas categorias: (1) pontos que não atrapalham a área de interesse, mas não serão utilizados no registro nem na modelagem; (2) obstáculos na área de interesse, como carros, sinalizações ou pessoas na frente do objeto de interesse.

varredura a laser, em função de diversos fatores, como: a divergência do feixe do raio laser quando atinge arestas, o ângulo de incidência do laser em relação ao objeto escaneado, a resolução de varredura e as características da superfície do material. Dependendo dos fatores e da conformação desses falsos pontos, eles podem ser classificados em *phantom points*, *jumping points* ou *in-depth points* (DUTESCO, 2006).

A principal causa da aparição de *phantom points* ("pontos fantasmas") está relacionada à inclinação entre o raio laser e a aresta do objeto, o que gera a divisão do sinal, fazendo com que o raio laser incida em duas diferentes posições no objeto. A distância registrada é a interpolação entre as duas distâncias, o que acaba criando um ponto em posição inexistente no objeto (Figura 83). A remoção dessa categoria de "pontos falsos" deve ser realizada interativamente pelo operador durante a inspeção da "nuvem de pontos" ou da malha triangular. A automatização desse processo é difícil devido ao tamanho reduzido dos erros para serem considerados *outliers* ou pontos desconectados.

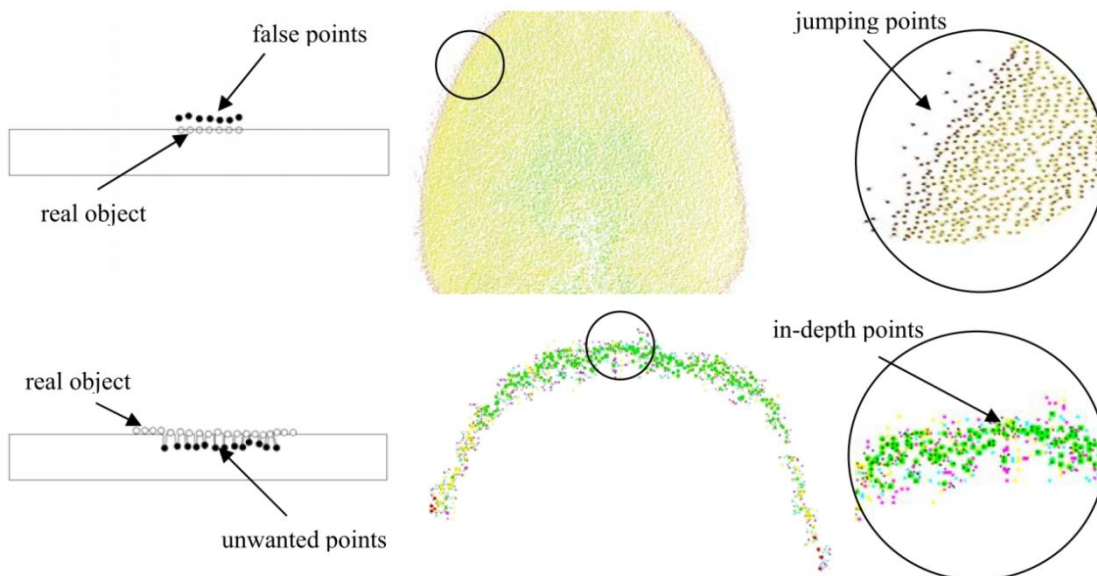
Figura 83 - Surgimento dos *phantom points* devido à inclinação do raio laser e a divisão do sinal: (a) corte esquemático da incidência de um raio laser em um degrau; (b) *phantom points* na "nuvem de pontos"



Fonte: (a) elaboração da autora; (b) Dutesco (2006, p. 34).

Os chamados *jumping points* (Figura 84a) são pontos registrados a determinada distância da superfície real dos objetos. O registro errôneo dos pontos deve-se à refletividade dos materiais. Os *depth points* (Figura 84b) aparecem quando são escaneadas superfícies porosas. A visualização de seções da "nuvem de pontos" é a melhor forma de detectar esses pontos, presentes nas áreas aparentemente mais espessas do que a realidade.

Figura 84 - "Pontos falsos" registrados na "nuvem de pontos" do tipo *Jumping point* e *in-depth points*



Fonte: Dutesco (2006).

A operação chamada de **reamostragem** (*point sampling*) reduz o número de pontos na "nuvem de pontos" visando melhorar a performance computacional e facilitar a etapa posterior de modelagem. Podem ser eliminados pontos presentes em áreas de sobreposição de diferentes cenas na "nuvem de pontos" registrada ou em modelos com densidade acima do desejado. Segundo Genechten e colaboradores (2008), a técnica mais adequada de remoção de pontos é através de reamostragem realizada por algoritmos do tipo "*curvature point sampling*", que permite manter pontos que representam regiões mais complexas e com curvaturas reversas, removendo pontos em áreas mais planas e homogêneas. Dessa forma, é possível a redução significativa da quantidade de pontos do arquivo original, sem a perda das características formais dos objetos.

O processo chamado **adição de pontos** permite a geração automática de novos pontos visando: (1) completar vazios na "nuvem de pontos", operação chamada de *fill holes*, ou (2) aumentar a densidade da "nuvem de pontos" como um todo, operação chamada de "refinamento".

Muitas vezes, a operação de preenchimento de vazios é realizada na etapa de geração da malha poligonal, especialmente em situações como: (1) os vazios são muito pequenos e difíceis de serem detectados; (2) os vazios da "nuvem de pontos" estão em uma posição em que não irão causar problemas de modelagem, como no caso de superfícies planas que

podem ser ajustadas com pequena quantidade de pontos; (3) vazios em áreas com curvaturas mais acentuadas são melhor tratados na etapa de modelagem da malha.

O processo de "refinamento" é usado para permitir gerar posteriormente uma malha poligonal mais densa e suave. No entanto, esta operação não melhora a qualidade da "nuvem de pontos", não substitui o preenchimento de vazios e geralmente acarreta maior tempo de processamento na fase de construção das superfícies (DUTESCO, 2006).

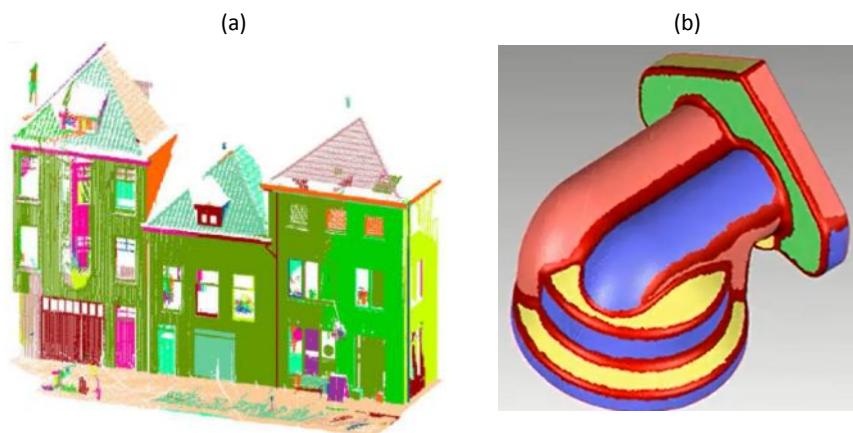
4.2.4 Processamento

A fase de processamento geralmente contempla as seguintes operações: segmentação, geração de modelo preliminar, otimização, edição e conversão do modelo.

4.2.4.1 Segmentação

O processo de segmentação tem como objetivo agrupar regiões ou objetos similares (Figura 85), como por exemplo: paredes, esquadrias, pisos e coberturas. Isto é possível a partir de critérios de agregação, como a definição de limites por alterações nas cores, mudanças de planos, de inclinações ou de material. A segmentação pode ser realizada através de processos interativos, em programas mais simples, como a seleção de trechos específicos das "nuvens de pontos", ou através de processos automatizados, em programas mais avançados, como o Edgewise e o Geomagic Studio, que fazem a classificação a partir de "nuvens de pontos" ou malhas poligonais (respectivamente).

Figura 85 - Segmentação de: (a) "nuvem de pontos" de uma edificação, mostrando os planos em diferentes cores; (b) malha triangular de uma peça mecânica



Fonte: (a) Pu e Vosselman (2009); (b) Disponível em: <www.geomagic.com>. Acesso em: 20 mar. 2012.

4.2.4.2 Geração de modelo preliminar

Como já abordado na seção 4.1, a modelagem inclui o processo de obtenção de desenhos e de modelos geométricos, que pode ser realizada através de processos interativos, semiautomáticos e automáticos. Tanto na modelagem interativa como automatizada, é comum a geração de produtos preliminares, que devem ser refinados e modificados até a obtenção dos produtos finais requeridos. Dentre os modelos preliminares mais comuns, pode-se citar quatro situações:

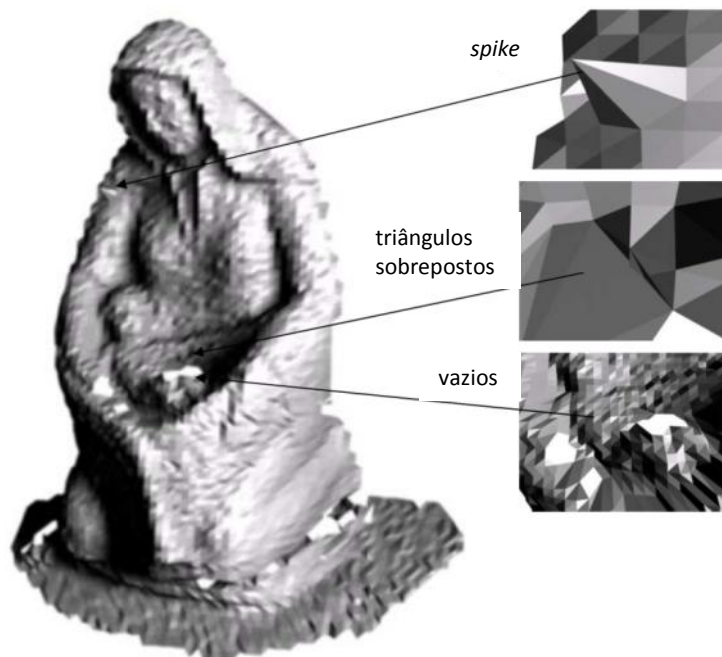
- primitivas geométricas, que podem ser editadas seguindo padrões predefinidos na biblioteca de elementos, caso frequente em se tratando de aplicações mecânicas e industriais, com diversos objetos com dimensões e características padronizadas;
- sólidos ou superfícies (através de diversas técnicas de modelagem), geralmente modificados para melhor ajuste na "nuvem de pontos" e/ou refinados para incluir mais detalhes; operação comum em documentação arquitetônica;
- malhas TIN, que devem sofrer operações de otimização para melhor representação de objetos mais complexos e irregulares;
- malhas TIN, produto intermediário necessário em vários programas para obtenção de outros tipos de modelos.

4.2.4.3 Otimização e edição do modelo preliminar

Após a etapa de modelagem preliminar, geralmente são realizados procedimentos de otimização e edição dos modelos. Pode-se citar alguns exemplos de otimização do modelo do tipo malha TIN:

- preenchimento de vazios, eliminação de triângulos sobrepostos, remoção de elementos estranhos (*spikes*), redução de ruído (alguns podem ser vistos na Figura 86);
- suavização e refinamento da malha;
- decimação da malha (*mesh decimation*).

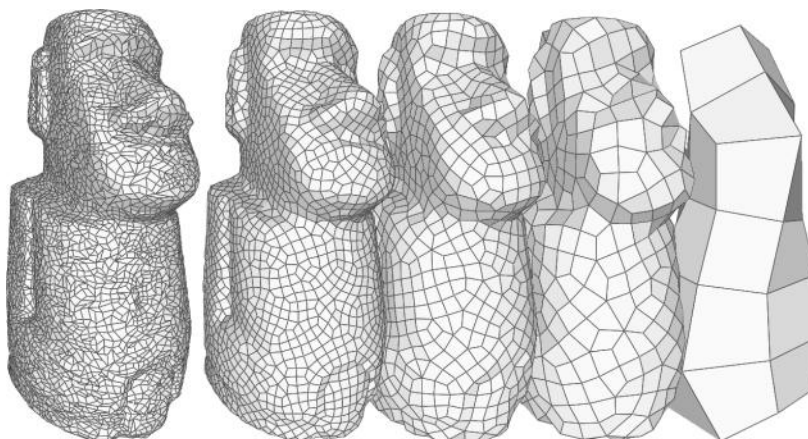
Figura 86 - Exemplos de erros geométricos e topológicos da malha triangular



Fonte: adaptado de Dutescu (2006, p. 59).

Outra operação comum é a suavização da superfície, aplicada quando a malha poligonal apresenta um aspecto rugoso, fragmentado, não correspondendo à suavidade da curvatura do objeto real. O algoritmo não somente subdivide cada face, criando novos vértices e novos polígonos, como também ajusta as coordenadas dos vértices existentes, permitindo melhorar a continuidade dos trechos curvos. Em se tratando de objetos prismáticos, novos vértices podem ser criados sem a movimentação das arestas existentes.

Figura 87 - Decimação de malha poligonal: modelos com redução gradativa no número de polígonos



Fonte: Disponível em: <<http://vcg.isti.cnr.it/Publications/2010/TPCPP10/>>. Acesso em: 2 jun. 2014.

A operação inversa ao refinamento é a "decimação da malha" (Figura 87), que reduz o número de polígonos (triangulares ou quadrangulares), visando diminuir o tamanho do

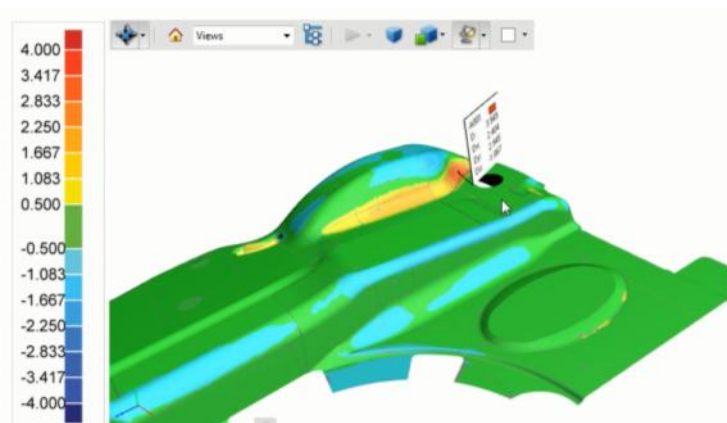
arquivo (consequentemente o tempo de processamento) e, ao mesmo tempo, permitindo preservar o nível de detalhe mínimo requerido pela aplicação.

Além disso, há operações que permitem aparar, estender ou ajustar a malha para pontos desejados. Outra operação que pode ser realizada sobre a malha triangular é a transformação desse modelo em outros tipos de produtos, como superfície do tipo NURBS e modelos paramétricos, procedimento disponível em programas mais robustos.

4.2.5 Análise da precisão e exportação dos produtos

Após a fase de processamento (segmentação, modelagem e otimização do modelo) é possível sobrepor a "nuvem de pontos" ao modelo geométrico gerado para verificação automática de sua precisão, a partir do uso de diferentes cores que indicam os desvios da modelagem (Figura 88).

Figura 88 - Relatório de precisão gerado no Geomagic Qualify



Fonte: Disponível em: <<http://www.geomagic.com/pt/products/qualify/demos/>>. Acesso em 12 mar. 2012.

Através da análise desses dados, é possível fazer ajustes no modelo e obter um produto ainda mais fidedigno. É importante que o operador saiba interpretar corretamente os dados, pois há casos em que a disparidade entre os modelos deve-se a erros inerentes ao processo de captura da "nuvem de pontos" e não necessariamente à modelagem posterior.

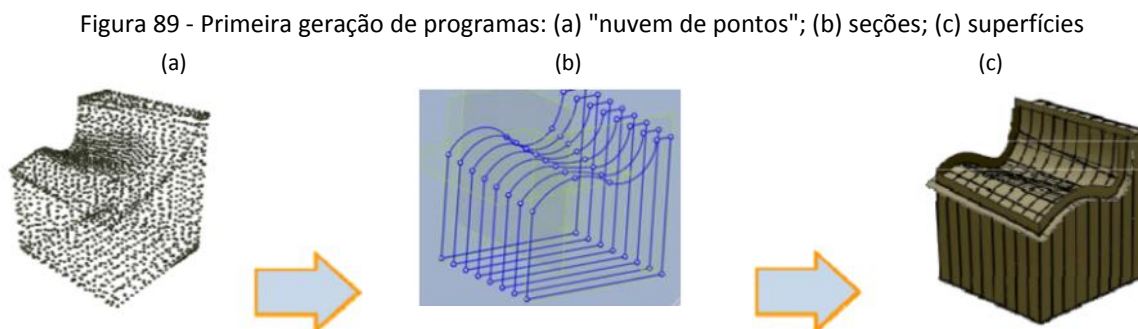
Finalmente, os produtos podem ser exportados para outros programas como as ferramentas CAD-BIM, programas para animação, *rendering*, simulação, realidade virtual, realidade aumentada, impressão 3D, prototipagem rápida, fabricação digital, dentre outros, conforme a aplicação prevista.

4.3 FERRAMENTAS PARA MANIPULAÇÃO DE "NUVENS DE PONTOS"

São requeridas diversas ferramentas nas várias etapas do trabalho com a tecnologia *3D Laser Scanning*, desde a captura até a visualização e o processamento das "nuvens de pontos".

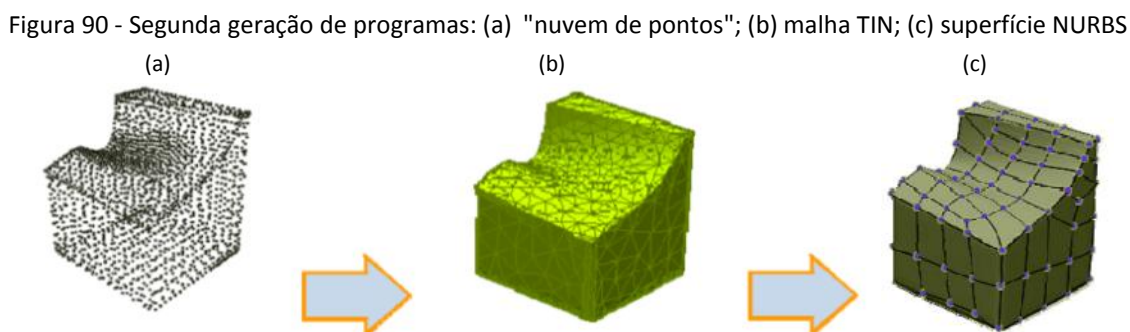
A escolha do *software* é baseada em vários fatores, incluindo o tipo e o objetivo do levantamento, a quantidade de dados, os tipos de produtos requeridos, os recursos financeiros disponíveis, o conhecimento e a habilidade do operador.

Segundo Chader (2008), pode-se dividir os programas de processamento de "nuvem de pontos" em três gerações. O processamento da primeira geração, no início da década de 1990, consistia em transformar a "nuvem de pontos" em seções (curvas ou polilinhas), para que fosse possível gerar as superfícies do objeto, conforme ilustrado na Figura 89.



Fonte: Chader (2008).

No final da década de 1990 foram desenvolvidas ferramentas para automatizar o processo de modelagem. Na segunda geração, ao invés de serem geradas a partir de seções, as superfícies de malha triangular são criadas pela conexão de pontos (da "nuvem de pontos") adjacentes com os vértices. Os programas mais avançados de segunda geração permitem gerar modelos do tipo NURBS a partir da malha triangular (Figura 90).



Fonte: Chader (2008).

Já os programas da terceira geração permitem gerar modelos paramétricos diretamente a partir da "nuvem de pontos" (CHADER, 2008). Geralmente são programas que apresentam recursos automatizados, permitem exportar os modelos paramétricos (Figura 91) para programas com o histórico da modelagem do objeto, e são conhecidos como programas para engenharia reversa.

Figura 91 - Terceira geração de programas: (a) "nuvem de pontos"; (b) modelo paramétrico



Fonte: Chader (2008).

Outra forma de classificar os programas é em função das operações realizadas. Muitos fabricantes disponibilizam diferentes módulos para cada grupo de operações descritas abaixo (apesar de existirem vários casos de sobreposições de tarefas em um mesmo *software*):

- escaneamento;
- visualização;
- processamento (tratamento da "nuvem de pontos" e modelagem);
- análise de precisão (inspeção do modelo).

Os programas do grupo de escaneamento, como Cyclone-SCAN, são usados nas fases iniciais de levantamento, permitindo armazenar e visualizar as "nuvens de pontos" capturadas pelo *scanner*, registrar as cenas e georreferenciá-las. Alguns deles permitem realizar operações básicas de modelagem.

Dentre os programas para visualização de "nuvens de pontos", pode-se citar: PolyWorks/IMView, LFM viewer, JRC 3D viewer, Geomagic Review, Cyclone TruView, Cyclone Viewer, Point Tools View Pro, Meshlab, sendo os dois últimos os mais robustos, visto que permitem a importação de diversos tipos de arquivos e a realização de medições básicas (PAYNE, 2010). A maioria dos "visualizadores" estão disponíveis gratuitamente nos

sites dos fabricantes. Dentre os “não gratuitos”, destaca-se o Point Tools View Pro, que permite gerar ortofotos em alta resolução, criar animações e visualizar desenhos e modelos geométricos, incluindo as "nuvens de pontos".

Dentre as ferramentas para processamento de "nuvem de pontos", pode-se citar: Cyclone-MODEL, Easypoint, PointCloud, LupoScan, Pointtools, Polyworks, Meshlab, Geomagic Studio, Edgewise, SilverLining e 3D Reshaper. Esses programas geralmente permitem a realização das seguintes operações:

- importação de diversos tipos de arquivos (provenientes de diferentes *scanners*);
- filtragem da "nuvem de pontos";
- determinação de distâncias, cálculo de áreas e volumes;
- geração de malhas poligonais tridimensionais;
- extração automática de seções a partir da malha poligonal tridimensional ou da "nuvem de pontos";
- edição do modelo e preenchimento automático de vazios;
- modelagem semiautomática, para associação de primitivas tridimensionais;
- exportação dos modelos para diversos formatos, como STL, OBJ, VRML1, VRML2, DXF, 3DS;
- verificação da qualidade do produto gerado.

As ferramentas mais sofisticadas permitem automatizar diversas tarefas, como a realização da segmentação e a extração automática de "nuvens de pontos" (Edgewise), para obtenção de feições (2D e 3D), além de permitir gerar superfícies do tipo NURBS e modelos paramétricos (Geomagic Studio, Geomagic Design X e 3D Reshaper). Há outros programas que permitem o mapeamento de imagens de alta-resolução sobre o modelo gerado, para criação de modelos fotorrealísticos e ortofotos (LupoScan e JRC 3D Reconstructor), gerando inclusive planificações de imagens nos formatos cilíndrico, esférico e cônico.

Os programas para análise da precisão, como o Geomagic Control, realizam a comparação do modelo gerado com a "nuvem de pontos", além de permitir a criação automática de relatórios de precisão.

Além desses programas do tipo *stand-alone*⁸⁹, existem os *plugins* que permitem incorporar funcionalidades a determinadas ferramentas, permitindo por exemplo, utilizar programas CAD ou CAD-BIM para criar diversos tipos de modelos a partir da "nuvem de pontos". Dentre eles, podemos citar LEICA CloudWorx (para AutoCAD e Revit), Pointools da CABS-CAD (para AutoCAD, Rhino, SketchUp) e IMAGINiT ScanToBIM (para Revit), Point Cloud (para Rhino).

A escolha do *software* não é uma tarefa trivial, devendo ser selecionado(s) o(s) que mais se adequem aos usos/produtos pretendidos do levantamento. Outros aspectos importantes a serem considerados são os formatos de importação e exportação de dados, evitando problemas de incompatibilidade de arquivos entre os programas utilizados.

De modo geral, os programas de engenharia reversa, específicos para processamento de "nuvens de pontos", permitem um grande número de operações, como Polyworks, JRC 3D Reconstructor, 3D Reshaper e Geomagic Studio. Os programas comercializados por fabricantes de equipamentos laser geralmente apresentam operações mais limitadas dos dados capturados, como visualização, detecção de alvos, registro de "nuvens de pontos" e conversão dos dados em formato RAW para outros formatos mais conhecidos, tal como os descritos anteriormente, no grupo dos programas específicos para a etapa de escaneamento.

4.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Esse capítulo apresentou um panorama dos produtos (2D ou 3D) possíveis de ser obtidos a partir do processamento da "nuvem de pontos", associados às operações que podem ou devem ser realizadas, seja a partir de programas específicos para manipulação desse tipo de modelo ou a partir dos recursos de modelagem de ferramentas CAD tradicionais. Esse conteúdo será aplicado nos capítulos 6 e 7, nos experimentos de modelagem de elementos mais complexos, realizados externamente à ferramenta BIM, como nos modelos gerados no AutoCAD e no Geomagic Studio.

Além disso, foram apresentadas diversas etapas de processamento específicas ao *3D Laser Scanning*, como a aquisição de dados e o pré-processamento, que fundamenta e detalha

⁸⁹ *Stand-alones* são programas independentes ou autônomos, ou seja, não necessitam de outro *software*, além do sistema operacional, para funcionarem.

etapas geralmente realizadas durante a varredura a laser, tal como foi aplicado no estudo de caso da Capela de Nossa Senhora da Escada (capítulo 7).

O capítulo 5, a seguir, apresenta conceitos relacionados à Modelagem de Informação da Construção, em especial, as aplicações relacionadas às edificações existentes, com uso de "nuvem de pontos".

Capítulo 5

Modelagem da informação de edificações existentes

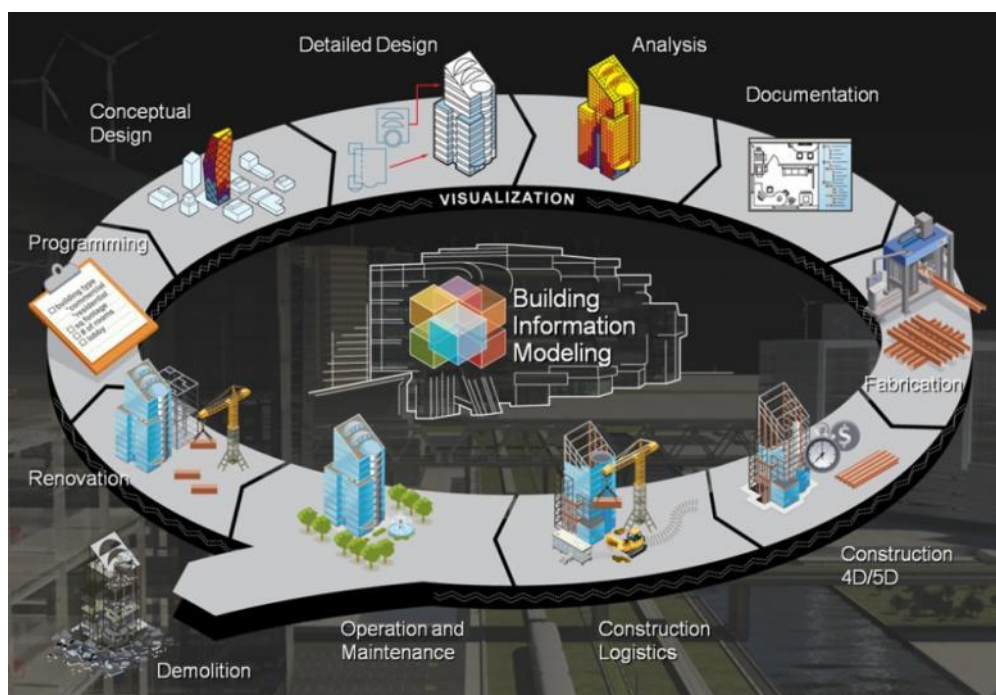
5 MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DE EDIFICAÇÕES EXISTENTES

Este capítulo aborda aspectos teóricos do paradigma BIM, como conceituação, características e suas relações com os níveis de desenvolvimento. Apresenta exemplos de aplicações de BIM em Arquitetura e Urbanismo, focando os casos em que há utilização (mesmo que parcial) de "nuvens de pontos" para geração do modelo BIM. Ao final, apresenta e discute aspectos metodológicos relacionados à produção dos modelos BIM de edificações existentes.

5.1 MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

Building Information Modeling (BIM), traduzido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)⁹⁰ como Modelagem da Informação da Construção, representa o que há de mais avançado em termos de Tecnologias da Informação - TI relacionada ao setor de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO).

Figura 92 - Paradigma BIM abrangendo todo o ciclo de vida da edificação



Fonte: Disponível em: <<http://buildipedia.com/in-studio/design-technology/the-daily-life-of-building-information-modeling-bim>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

O paradigma BIM está associado à produção e utilização de informações sobre as edificações durante todo seu ciclo de vida (Figura 92), que vai desde o estudo de viabilidade, o

⁹⁰ ABNT NBR ISO 12006-2:2010 - Construção de edificação - Organização de Informação da construção Parte 2: Estrutura para classificação de informação.

desenvolvimento do projeto, o planejamento de obra, a construção, incluindo a operação e a manutenção, até a reforma (ou requalificação) da edificação, podendo-se, em alguns casos, chegar à sua demolição.

Segundo Eastman e colaboradores (2011, p. 16), o BIM pode ser definido como "[...] uma tecnologia para modelagem e um conjunto de processos associados visando a produção, a comunicação e a análise de modelos de construção."⁹¹

A *National Building Information Modeling Standard - NBIMS*⁹² afirma que o termo BIM pode ser entendido de três maneiras: como um produto, como um processo colaborativo e, como um sistema de gerenciamento do ciclo de vida da edificação (NIBS, 2007, p. 19).

Para Santos (2012, p. 26), a Modelagem da Informação da Construção é

[...] o processo de produção, uso e atualização de um modelo de informações da edificação durante todo o seu ciclo de vida. Esse modelo, além da geometria da construção, contém numerosas informações sobre seus diferentes aspectos, potencialmente abrangendo todas as disciplinas envolvidas num empreendimento.

O uso de BIM implica uma mudança de paradigma, uma vez que a edificação deixa de ser concebida e representada de forma “abstrata” por entidades bidimensionais (de tecnologias CAD tradicionais) e passa a usar ferramentas 3D orientadas a objetos, onde cada elemento construtivo que compõe o modelo contém semântica, relacionamentos com os demais objetos e outras informações associadas aos componentes reais (SANTOS, 2012).

Para Amorim (2010b), o BIM pode ser entendido em três níveis: o conceito em si, o modelo (base de dados única) e as ferramentas/tecnologia, conforme a seguir:

- Conceito - enquanto conceito, o BIM compreende a ideia de um ambiente computacional complexo para projeção, representação e gerenciamento do edifício virtual, implementado num sistema gráfico tridimensional, que permite a participação de especialistas de diversas disciplinas que interagem entre si e interferem na edificação durante o seu ciclo de vida de forma colaborativa e integrada.

⁹¹ No original: "[...] a modeling technology and associated set of processes to produce, communicate, and analyze building models." (EASTMAN et al., 2011, p. 16).

⁹² O NBIMS é uma comissão do *National Building Information Modeling Standard (NIBS) Facility Information Council*.

- Modelo - o modelo BIM pode ser entendido, também, como um Edifício Virtual, uma base de dados digital (numérica) única, integrada, autoconsistente, onde seus componentes referem-se a elementos construtivos reais, sendo definidos não somente por sua geometria tridimensional, como também por seus atributos (materiais, custos, etc.), seu comportamento e suas relações com os demais componentes da construção.
- Ferramentas/tecnologia - representam uma nova geração de “programas inteligentes” orientados a objetos no setor AECO, e seus processos associados, que se propõem a produzir, armazenar e a gerenciar toda a informação (documentos de diversas naturezas) sobre a edificação no decorrer do seu ciclo de vida.

Apesar do termo BIM ter sido criado em meados dos anos 1990, pela empresa americana Autodesk para promover o seu novo *software*, o Revit⁹³, a ideia de representar digitalmente em repositório único de dados, toda a informação utilizada no ciclo de vida de um produto, já existia desde a década 1960, no início das pesquisas sobre o uso do computador no processo de projeto de edificações (SCHEER; AYRES FILHO, 2009).

5.1.1 Características

Pereira (2013) descreve as principais características da Modelagem da Informação da Construção como: (1) modelagem paramétrica; (2) modelagem orientada a objetos; (3) semântica dos objetos; (4) ciclo de vida da edificação; (5) base de dados digital unificada; (6) interoperabilidade; (7) trabalho colaborativo; (8) simulações de desempenho. Algumas dessas características são discutidas em mais detalhe a seguir.

O modelo BIM é baseado na **modelagem paramétrica** de objetos tridimensionais. O conceito de objetos paramétricos é central à compreensão de BIM e de suas diferenças em relação aos objetos geométricos (3D) tradicionais (EASTMAN et al., 2011). Segundo esses autores, os objetos BIM paramétricos apresentam as seguintes características:

- consistem em definições geométricas contendo atributos semânticos (como tipo de material, propriedades térmicas, acústicas, estruturais) e regras (como conectividade dos objetos e pertinência);

⁹³ O Revit foi comprado pela Autodesk em 2002, de uma empresa concorrente, a Revit Technologies.

- a geometria é integrada, consistente e não redundante;
- as regras paramétricas para os objetos permitem modificar automaticamente a geometria dos objetos associados, como por exemplo as paredes do pavimento irão acompanhar o nível (cota) da laje alterada;
- os objetos podem ser definidos e gerenciados em diferentes níveis de agregação e hierarquia. Por exemplo, se o peso de um subcomponente de uma parede é alterado, o peso total da parede é atualizado necessariamente;
- os objetos têm a habilidade de importar ou exportar conjuntos de atributos, como por exemplo materiais, dados sobre acústica, desempenho energético, que podem ser usados em outras aplicações.

Nesse tipo de modelo, é possível a alteração dos valores dos parâmetros para gerar diferentes instâncias do mesmo tipo de objeto. Isto simplifica os procedimentos relativos às modificações e revisões nos projetos, facilitando a geração de alternativas de soluções projetuais para uma dada edificação, de simulações de diversas naturezas, e auxiliando a definição de formas complexas (PEREIRA, 2013).

É importante observar que a variação nos valores dos parâmetros altera não somente a geometria do objeto, mas pode modificar comportamentos e propriedades do componente através dos seus atributos semânticos⁹⁴.

Essa característica (do modelo BIM) dos objetos possuírem **semântica** e buscarem simular elementos construtivos reais, permite o estabelecimento de regras ou condições⁹⁵ a serem atendidas para que os objetos permaneçam coerentes e sem conflitos, garantindo a transmissão eficiente de informações entre as diferentes etapas do desenvolvimento de um projeto.

Como o paradigma BIM pretende dar conta da produção e do gerenciamento de informações abrangendo todo o **ciclo de vida da edificação**, seu uso pode contribuir

⁹⁴ Atributos semânticos são variáveis que definem o significado, as propriedades, o comportamento do componente construtivo e as relações com os outros elementos.

⁹⁵ Um exemplo de regra associada aos diferentes objetos é a relação entre os elementos janela e parede. Só é possível a inserção de esquadrias associadas a paredes, não sendo permitido sua colocação em posições que avancem elementos estruturais ou que estejam "flutuando" em espaços vazios. Se o elemento parede for excluído, conseqüentemente todas as esquadrias também serão.

significativamente nas fases de: desenvolvimento do projeto, construção, operação e manutenção da mesma. Na projeção, as informações de diversas disciplinas são integradas e compatibilizadas, contribuindo para o trabalho colaborativo, para o estudo de diferentes alternativas e para a adoção de solução otimizada. A disponibilização de informações consistentes e integradas auxilia às fases seguintes de planejamento e construção, e possibilita a simulação de processos.

A partir do modelo BIM criado, é possível gerar uma série de outros produtos, como desenhos, modelos fotorrealísticos, animações, análises, simulações e exportar o modelo para ser disponibilizado em outros sistemas de informações, em bancos de dados, em plataformas *web*, ou em aplicações de Realidade Virtual e de Realidade Aumentada. Esses produtos podem ser visualizados e manipulados por diversos usuários e podem sofrer atualizações, quando for o caso.

Devido à amplitude de atividades e de atores no contexto BIM, uma única ferramenta não é capaz de dar conta de todos os processos ao longo do ciclo de vida da edificação. É necessária a utilização de diversas tecnologias, sendo cada uma mais adequada para determinadas fases, a serem realizadas por profissionais específicos. Pereira (2013, p. 40) apresenta um quadro que sumariza as principais ferramentas utilizadas em cada fase de projeto (Quadro 13).

Dentre as plataformas⁹⁶ BIM mais conhecidas no mercado pode-se citar: (1) Revit, líder de mercado, que inclui ferramentas para o desenvolvimento e gerenciamento de projetos de arquitetura, de instalações e de estrutura; (2) Bentley Systems, que oferece ampla gama de produtos para arquitetura, engenharia e construção; (3) ArchiCAD, a plataforma mais antiga, e que permite a interface com ferramentas para diversas funcionalidades.

⁹⁶ O termo "plataforma BIM" está relacionado a um sistema que produz e manipula dados para diversos usos, podendo ter ferramentas para modelagem geométrica, quantitativos, detecção de conflitos, *rendering*, etc. Já o termo "ferramenta BIM" refere-se a um programa específico com funções determinadas, como geração de modelos, análise de energia e orçamentação (EASTMAN et al., 2011).

Quadro 13 - Exemplos de ferramentas em diversas fases do ciclo de vida da edificação

Fase do ciclo de vida da edificação (aplicação)		Ferramenta
Estudo de viabilidade		<i>Trelligence Affinity</i>
		<i>Facility Composer</i>
Projetação	Arquitetura	<i>Revit Architecture</i>
		<i>ArchiCAD</i>
		<i>Vectorworks</i>
		<i>Bentley Architecture</i>
		<i>Allplan</i>
		<i>Autodesk Ecotect Analysis</i>
	Conforto ambiental	<i>Green Building Studio</i>
		<i>Graphisoft EcoDesigner</i>
		<i>Autodesk Project Vasari</i>
		<i>Energyplus</i>
	Estrutura	<i>DesignBuilder</i>
		<i>Tekla Structure</i>
		<i>Revit Structure</i>
		<i>CAD/TQS</i>
	Elétrica, Hidráulica/HVAC	<i>Bentley Structure</i>
		<i>Revit MEP</i>
		<i>Bentley – Building Electrical Systems</i>
		<i>MEP Modeler (ArchiCAD)</i>
Gerenciamento de projetos	<i>Bentley Mechanical Systems</i>	
	<i>DDS-HVAC</i>	
	<i>Navisworks</i>	
	<i>Synchro</i>	
Planejamento da construção / construção	<i>Solibri</i>	
	<i>Navisworks</i>	
	<i>Synchro</i>	
	<i>Solibri</i>	
	<i>Vico Software</i>	
	<i>Volare/TCPO</i>	
	<i>Primavera</i>	
	<i>MSPROject</i>	
	<i>Tron-orc</i>	
<i>Orca Plus</i>		
Uso: operação / manutenção	<i>ARCHIBUS</i>	
	<i>CAFM Explorer</i>	
	<i>Bentley Facilities</i>	
Requalificação / demolição	As mesmas ferramentas da fase de projeção	

Fonte: Pereira (2013, p. 40).

5.1.2 Níveis de desenvolvimento (LOD)

Uma questão importante com relação aos modelos BIM refere-se ao *Level of Development* - LOD ou seu nível de desenvolvimento. A classificação em diferentes níveis (LOD) está associada ao tipo, à quantidade e às características das informações (geométricas ou não) que devem constar no modelo BIM na medida em que é desenvolvido.

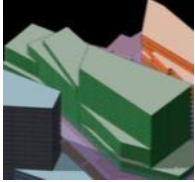
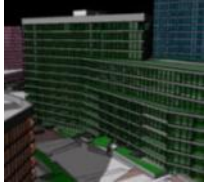

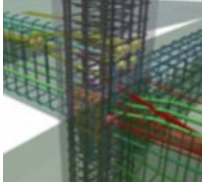

Em 2008, o *American Institute of Architects* (AIA) desenvolveu um protocolo com definições dos cinco níveis (LOD) do modelo BIM, sendo atualizado em 2013⁹⁷. A seguir, uma breve descrição de cada LOD, ilustrada no Quadro 14:

- **LOD 100** - os elementos podem ser representados graficamente no modelo através de uma simbologia genérica, com modelo volumétrico correspondente à fase de estudo de massa.
- **LOD 200**⁹⁸ - os elementos podem ser representados graficamente no modelo através de uma simbologia genérica com valores aproximados de forma, tamanho, localização e orientação. Esse LOD refere-se à fase de estudo preliminar do projeto.
- **LOD 300** - os elementos podem ser representados graficamente no modelo com sua geometria precisa (final) em termos de quantidade, tamanho, forma, localização e orientação. Esse nível corresponde à etapa de anteprojeto.
- **LOD 400** - os elementos podem ser representados graficamente com sua geometria precisa (final) em termos de quantidade, tamanho, forma, localização e orientação, com detalhes e informações relacionadas a fabricação, instalação e execução. Esse nível corresponde à etapa de projeto executivo.
- **LOD 500** - os elementos podem ser verificados em campo em termos de quantidade, tamanho, forma, localização e orientação. O LOD 500 corresponde ao *as-built*, para documentação da situação de edificação após a construção, visando o uso na operação e na manutenção.

⁹⁷ O protocolo criado em 2008 é o "*AIA Document E202 – 2008: Building Information Modeling Protocol Exhibit*". Os documentos atualizados em 2013 são "*E203-2013, Building Information Modeling and Digital Data Exhibit*", "*G201-2013, Project Digital Data Protocol Form*" e o "*G202-2013, Project Building Information Modeling Protocol Form*". Esses documentos apresentam uma série de definições, como: as pessoas responsáveis pelo modelo BIM em cada fase de seu ciclo de vida, os profissionais autorizados a usá-lo, as funções do modelo relacionadas às fases, o profissional que irá gerenciá-lo, etc.

⁹⁸ Segundo o AIA, para os LOD de 200 a 500 podem estar associadas também informações não gráficas ao modelo.

Quadro 14 - Diferentes LOD associados às características geométricas do modelo e suas funções/fases

	LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 400	LOD 500
NÍVEL					
GEOMETRIA	Modelo volumétrico	Geometria e informações aproximadas	Geometria e informações precisas	Geometria e informações detalhadas	Geometria e informações conferidas na construção
FUNÇÃO / FASE	Estudos de massa (concepção inicial do projeto)	Desenvolvimento do projeto (estudo preliminar)	Desenvolvimento do projeto (anteprojeto)	Detalhamento do projeto para construção (projeto executivo)	Atualização do modelo para manutenção e/ou intervenções posteriores (<i>as-built</i>)

Fonte: adaptado de Vandezande (2008).

Quadro 15 - Características dos elementos "paredes" e "esquadrias" em relação aos LOD

	LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 350	LOD 400
PAREDES	Representação esquemática de paredes externas, sem distinção de tipo e material. Espessura e localização das paredes podem ser alteradas.	Representação genérica de paredes separadas por tipo de material. Valores aproximados de espessuras de paredes, sem detalhamento das camadas.	Representação e especificação dos materiais e das camadas que compõem as paredes, com suas dimensões precisas.	Camadas das paredes modeladas como elementos separados e vão representados com suas dimensões precisas (finais)	Modelagem de cada elemento que compõe a alvenaria
ESQUADRIAS	Não são representadas as paredes internas, e os vãos das esquadrias.	Tipo, tamanho e localização aproximada das esquadrias. Janelas modeladas como componentes monolíticos ou com caixilho simples com vidro.	Janelas modeladas com dimensões e localizações precisas (finais). Informações associadas ao modelo: indicação de funcionamento, material e outras propriedades.	Modelagem dos elementos de fixação das esquadrias.	Perfil dos caixilhos, elementos de fixação do vidro e outros componentes.

Fonte: elaboração da autora, baseada nas informações contidas em Bedrick (2013), AIA (2013) e BIMForum (2013).

Um grupo de trabalho do BIMForum identificou a necessidade de criação de um LOD para a definição dos elementos necessários à coordenação entre disciplinas, a compatibilização de projetos e a verificação de interferências (*clash detection*). Segundo Bedrick (2013), os

requisitos para esse nível eram superiores aos do LOD 300, mas inferiores ao do LOD 400, por isso foi criado o LOD 350⁹⁹. O BIMForum produziu um documento com o detalhamento das informações que devem constar nos principais elementos construtivos da edificação. O Quadro 15 descreve as características principais dos elementos "paredes" e "esquadrias" relacionadas aos LOD 100, 200, 300, 350 e 400¹⁰⁰, apresentadas pelo BIMForum (2013).

Bedrick (2013) afirma que não se pode fazer uma correspondência rígida entre os LOD e as fases de projeto, uma vez que os elementos construtivos são desenvolvidos em diferentes ritmos ao longo do processo de projeto¹⁰¹. Dessa maneira, o modelo BIM de uma edificação irá conter, necessariamente, elementos em vários níveis de desenvolvimento (BEDRICK, 2013).

A determinação do LOD facilita o planejamento das etapas e a definição dos objetivos do cliente/proprietário, a definição de prazos e custos de projeto, permitindo a geração de modelos mais adequados às necessidades do cliente, com melhor custo-benefício.

5.1.3 Aplicações do BIM em Arquitetura e Urbanismo

Pode-se citar uma série de aplicações da tecnologia BIM na área de Arquitetura e Urbanismo, como aquelas que envolvem as fases de projeto e construção (GROETELAARS; AMORIM, 2013a):

- melhoria da visualização e representação das informações, onde os documentos gráficos como plantas baixas, cortes, fachadas e perspectivas são geradas automaticamente a partir do modelo único, diferentemente das ferramentas CAD tradicionais, que trabalham com representações fragmentadas da edificação, sendo comum haver ambiguidades e inconsistências de informações;

⁹⁹ Os protocolos do AIA de 2013 não incluem o LOD 350, mas o documento *Guide and Instructions* faz referência a esse novo nível. O LOD 350 apresenta a seguinte descrição: os elementos podem ser representados graficamente com sua geometria precisa (final) em termos de quantidade, tamanho, forma, localização e orientação, devendo se relacionar com as outras disciplinas. Esse LOD refere-se à etapa de compatibilização dos projetos (BEDRICK, 2013).

¹⁰⁰ As especificações do documento do BIMForum (2013) estão limitadas a descrições e ilustrações referentes aos níveis LOD 100, 200, 300, 350 e 400. Os autores não sentiram necessidade de abordar o LOD 500 por entenderem que esse nível refere-se à verificação das informações em campo.

¹⁰¹ O autor cita, como exemplo, a definição estrutural, geralmente determinada bem antes da elaboração do projeto de interior.

- possibilidade de uso das informações contidas no modelo BIM para gerar, com eficiência e precisão, quantitativos, orçamentos, cronogramas, além de permitir exportar modelos derivados para programas específicos, visando a realização de análises e simulações, como desempenho estrutural, energético, térmico, acústico e lumínico, dentre outros;
- estímulo ao desenvolvimento de alternativas de projeto para escolha da mais adequada técnica e economicamente, dada à maior facilidade na obtenção de simulações e de orçamentos, que possibilitam rapidez na avaliação de custos associados às decisões projetuais;
- maior flexibilidade na integração das informações produzidas pelas equipes de trabalho facilitando a colaboração, visto que todos os profissionais envolvidos têm acesso à mesma informação atualizada;
- possibilidade da verificação de interferências, de conflitos entre diversas disciplinas: arquitetura, estrutura, ar condicionado, instalações elétricas e hidráulicas, etc.;
- facilidade e assertividade na realização de revisões ou alterações de projeto, pois as informações são atualizadas automaticamente na base de dados unificada;
- possibilidade de análise semiautomática do projeto, validando-o segundo o código de obras (*code checking*), prática ainda não existente no Brasil, e
- refinamento no planejamento e no gerenciamento da construção, a partir da simulação e do acompanhamento das etapas da obra, dentre outras possibilidades de uso.

5.2 BIM EM EDIFICAÇÕES EXISTENTES

O emprego do BIM nas fases posteriores à construção, como operação, manutenção, reforma, requalificação, ou a ainda o registro de edificações existentes (históricas ou não) para fins de documentação arquitetônica, são temas menos explorados, sendo geralmente apresentados de modo mais conceitual.

As aplicações do BIM na documentação de edificações históricas também são assuntos pouco tratados, mas que tem começado a despertar o interesse de instituições de

ensino/pesquisa e órgãos ligados ao gerenciamento do patrimônio arquitetônico nos países mais desenvolvidos.

5.2.1 Sobre os conceitos de *as-built*, *as-is* e HBIM

Através dos estudos de caso descritos na literatura nacional e internacional, pode-se afirmar que o processo de aquisição das informações para criação de modelos BIM é baseado, em sua maioria, em cadastros por medição direta ou desenhos já existentes (complementados por fotografias - sem tratamento).

Apesar de vários autores citarem as potencialidades do modelo BIM para as fases de uso e manutenção de edificações existentes, poucos são aqueles que já utilizaram ou testaram de forma consistente, o modelo para auxiliar no gerenciamento dessas etapas do ciclo de vida da construção. Isto acontece, muitas vezes, devido à falta de correspondência tanto em nível de detalhe (quantidade de informações suficientes), como de precisão, entre o modelo BIM gerado e a situação real (existente) da edificação.

Com relação a esse aspecto, é importante diferenciar os casos onde:

- (1) se dispõe de informações (sejam desenhos, modelos geométricos ou modelos *as-designed* BIM¹⁰²) - relativas às fases de projeto e construção, e
- (2) as situações em que não existem dados disponíveis, geralmente em edificações mais antigas.

No primeiro caso, é comum haver revisão nos desenhos ou modelos de projeto, através da comparação desses com a situação encontrada na edificação, permitindo a atualização das informações alteradas durante a construção. Em casos onde é requerida maior precisão, pode-se realizar o levantamento cadastral para conferência das informações. Nessas situações, estão sendo produzidos desenhos ou modelos *as-built*. Apesar do termo "*as-built*" ser utilizado de forma ampla, incluindo diversas fases da edificação após a construção, ele é mais adequado quando se refere à documentação da edificação durante a obra e/ou logo após sua conclusão.

¹⁰² O termo "*as-designed BIM*" vem sendo utilizado atualmente referindo-se ao modelo, produzido na fase de projeto, para dar suporte à construção. No entanto, é um modelo que não foi atualizado, para refletir as alterações ocorridas durante a obra ou após a mesma.

No segundo caso, é mais comum a utilização de *as-is*. O termo "*as-is*" passou a ser usado mais frequentemente com o desenvolvimento das tecnologias de captura de "nuvens de pontos", dada a grande densidade de informações que podem ser coletadas, permitindo registrar com precisão a forma real dos objetos, com suas irregularidades e imperfeições decorrentes do processo construtivo e, principalmente, das deformações e dos desgastes naturais sofridos pela edificação ao longo dos anos. Assim, o termo "modelo *as-is*" está sendo utilizado, atualmente, para designar o estado atual da edificação, principalmente em situações em que é realizado o levantamento completo, preciso e detalhado com sistemas de varredura, visando dar suporte a projetos de intervenção (restauração, renovação, conservação). É comum também encontrar na literatura o termo "*as-found*", com o mesmo significado de "*as-is*" (GROETELAARS; AMORIM, 2012b).

Ainda, considerando esses conceitos, pode-se observar em artigos publicados nos últimos anos, mais precisamente a partir de 2011, o uso do termo "*as-is* BIM" (e não mais "*as-built* BIM"), referindo-se a edificações existentes que foram levantadas pela varredura a laser e representadas através de modelos BIM (ANIL; AKINCI; HUBER et al., 2011; ANIL et al., 2011).

Quando se trata de modelos BIM para a documentação de edificações históricas, o termo mais utilizado atualmente é o "*Historic Building Information Modelling*" - HBIM, introduzido por Murphy, McGovern e Pavia (2007), para descrever um método de modelagem paramétrica de componentes históricos a partir de "nuvens de pontos". Outro exemplo de trabalhos pioneiros nessa área é o artigo de Pauwels (2008), quando utiliza o termo "*Architectural Information Modeling*" - AIM, se referindo aos modelos de informação de edificações existentes, principalmente as históricas, para diferenciar dos modelos BIM gerados na fase de projeto/construção de novas edificações.

A expressão "modelos BIM de edificações existentes" foi adotada nesta tese, pois representa uma situação mais ampla, que não está necessariamente (ou somente) associada à técnica de varredura a laser, nem a documentação de edificações de interesse histórico-cultural.

5.2.2 Aplicações do BIM em edificações existentes

Apesar do uso do BIM ser mais comum nas etapas de desenvolvimento de projeto e construção de novas edificações, essa tecnologia apresenta grandes potencialidades para

documentação, gerenciamento, manipulação, análise e visualização das informações relativas às edificações existentes, durante a fase de operação das mesmas (uso e manutenção), incluindo possíveis reformas, restaurações, requalificações e/ou demolições.

Dentre as aplicações do BIM para edificações existentes, destacam-se algumas:

- verificação e consulta de informações durante a fase de operação e manutenção da edificação, permitindo a conferência dos dados, como prazo de validade dos componentes construtivos de uso essencial ou de segurança (para substituição e manutenção preventiva);
- realização de estudos, simulações, análises de interferências entre instalações existentes e previstas no projeto, favorecendo o desenvolvimento de projetos de intervenção mais consistentes e sustentáveis;
- possibilidade de integração do modelo com sensores e sistemas de monitoramento em tempo real (EASTMAN et al., 2011, p. 25);
- documentação de edificações históricas, permitindo uma série de operações, como classificação e listagem dos objetos e materiais, geração automática dos desenhos e documentação das diferentes fases construtivas da edificação (DORE; MURPHY, 2014);
- possibilidade de associar diferentes dados aos elementos construtivos, como fotos, desenhos e dados históricos, facilitando o acesso às informações.

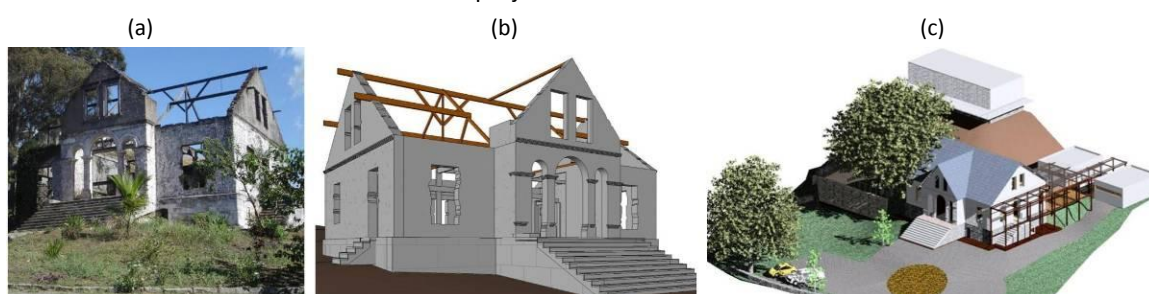
Observa-se que há poucos estudos publicados sobre a utilização da tecnologia BIM para a documentação de edificações existentes. No entanto, pode-se citar dois artigos que apresentam experiências iniciais sobre as potencialidades da tecnologia BIM para a representação de edificações históricas:

- Edificação arruinada na Ilha da Fumaça - Brasil: base para o desenvolvimento de projeto de restauro;
- Sinagoga Kluckygasse – Áustria: para fins de documentação arquitetônica e preservação da memória.

a) Edificação arruinada na Ilha da Fumaça - Brasil

O uso de modelo BIM para representação de uma edificação arruinada localizada na Ilha da Fumaça, no estado do Espírito Santo (Brasil), é descrito em trabalho acadêmico realizado na Universidade Federal do Espírito Santo (ALVES; OLIVEIRA, 2010). O modelo foi usado não somente para a representação do estado de conservação atual da edificação (Figura 93a e b) - através do cadastro por medição direta, mas como ferramenta para estudo e representação do projeto de restauro (Figura 93c).

Figura 93 - (a) Foto do estado atual da edificação; (b) modelo BIM da situação existente; (c) perspectiva do projeto de restauro



Fonte: Alves e Oliveira (2010).

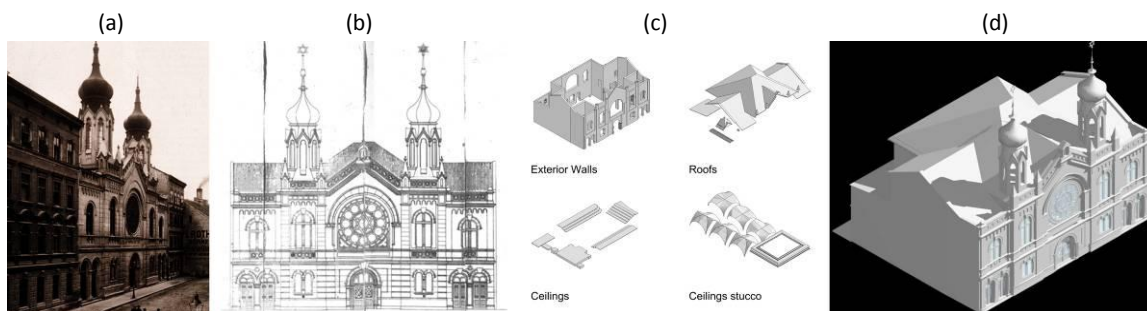
Os autores citam algumas vantagens em se trabalhar com a modelagem BIM em projetos de intervenção. Com o modelo BIM concluído é possível ter acesso a informações precisas sobre cada elemento construído, como materiais, dimensões, volume, acabamentos, sendo uma fonte rica de informações para o desenvolvimento do projeto de restauro. É possível ainda, identificar os elementos existentes, os que foram ou serão demolidos, os que serão construídos, ou ter as informações sobrepostas para fazer estudos, comparações e simulações.

b) Sinagoga Kluckygasse – Áustria

Um exemplo de aplicação de ferramenta BIM para representação de uma sinagoga destruída há mais de 60 anos, pode ser encontrado no artigo de Martens e Peter (2002). Os autores apresentam a metodologia utilizada no ArchiCAD para a reconstituição digital da Synagogue Kluckygasse, a partir de desenhos, fotos e dados históricos (Figura 94).

Devido à falta de dados mais precisos da edificação, principalmente relativos ao espaço interior, os autores afirmam que muitas informações foram deduzidas a partir de evidências históricas relativas a edificações construídas em épocas semelhantes.

Figura 94 - Sinagoga Kluckygasse: (a) foto antiga; (b) desenho da fachada principal; (c) objetos paramétricos (paredes, teto, telhado, etc.); (d) modelo BIM gerado



Fonte: Martens e Peter (2002).

O processo de modelagem foi realizado a partir das seguintes etapas:

- levantamento de dados e informações existentes: desenhos, fotos, descrições, dados históricos;
- comparação dos desenhos com as fotografias existentes, para verificação das diferenças entre o projeto (desenhos) e a execução (fotos);
- estruturação dos *layers* de acordo com as diferentes partes da edificação: paredes (internas ou externas), telhado, piso, forro, detalhes do forro, elementos de fachada, janelas, portas, balaustres, detalhes da fachada, detalhes interiores, vitrais, colunas, escadas, madeiramento do telhado, vigas, etc.;
- definição de níveis (planos horizontais de referência) - os elementos construtivos devem estar associados aos pavimentos correspondentes, podendo-se criar níveis intermediários se existir um grande número de ornamentos. Segundo Martens e Peter (2002), a divisão em níveis auxilia também na modelagem, principalmente quando existem várias pessoas trabalhando na mesma edificação, tornando-se referência para a correta junção das diferentes partes;
- utilização de diferentes cores, associadas aos diversos tipos de materiais, para a posterior associação das texturas correspondentes;
- criação de famílias para objetos repetitivos, armazenados em diretórios específicos para permitir alteração de partes individuais.

Martens e Peter (2002) apontam para a necessidade de definições de padrões e metodologias para a organização dos dados. Além disso, destacam que a função do modelo

BIM e a maneira com que as informações serão utilizadas têm grande influência na determinação dos processos de modelagem.

Vale ressaltar que o modelo BIM gerado dessa sinagoga serve para fins de interesse histórico, como reflexão historiográfica de como a edificação poderia ter sido. Não pode ser usado para fins de restauro, pois muitos dados foram modelados a partir de hipóteses e com base em documentos não fidedignos¹⁰³, o que não atende as recomendações do Art. 9º da Carta de Veneza: "o restauro cessa quando começa a hipótese".

5.2.3 Aplicações integradas de "nuvens de pontos" e modelos BIM

Nos últimos dois anos houve aumento no número de artigos publicados internacionalmente sobre o uso do *laser scanning* como base para a modelagem BIM. Foram identificados alguns artigos que mencionam, inclusive, o uso de "nuvens de pontos" geradas por fotografias (técnica DSM) como método complementar à varredura a laser.

O uso da "nuvem de pontos" passa a ter um papel mais "ativo" e importante na modelagem BIM, uma vez que seu principal uso, quando existia, restringia-se à conferência e atualização de dados já disponíveis (obtidos por medição direta ou presentes em desenhos antigos).

Isto se deve, provavelmente, à maior difusão das vantagens das tecnologias BIM para representação e gerenciamento das edificações e ao aumento crescente de intervenções em construções existentes, seja para requalificação ou para busca de soluções mais sustentáveis.

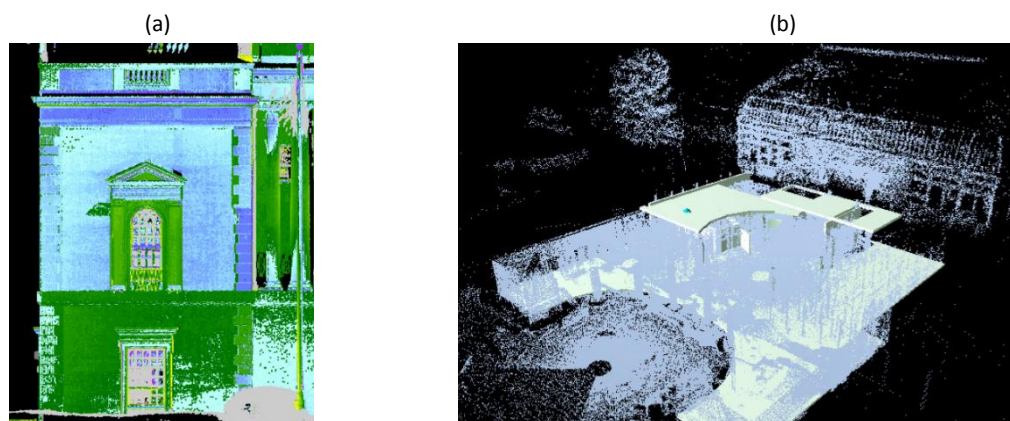
Como resposta à crescente demanda por modelos *as-is* BIM, verificam-se avanços significativos tanto em nível de *hardware* quanto de *software*. A cada ano surgem novas gerações de *laser scanners*, com melhores desempenhos (precisão e velocidade) e menores custos, e são lançadas novas versões de programas que incluem a importação de "nuvens de pontos" e sofisticados recursos para auxiliar na modelagem. Estes fatores favorecem a uma crescente utilização dessas tecnologias.

¹⁰³ O artigo 16 da Carta de Veneza recomenda que "os trabalhos de conservação, de restauração e de escavação serão sempre acompanhados pela elaboração de uma documentação precisa sob a forma de relatórios analíticos e críticos, ilustrados com desenhos e fotografias", sendo esses alguns dos documentos considerados fidedignos.

Dentre as principais aplicações e vantagens de utilização do uso integrado da "nuvem de pontos" e da tecnologia BIM para documentação de edificações existentes, pode-se citar:

- os modelos BIM gerados a partir de "nuvens de pontos" tendem a ser mais precisos, detalhados e obtidos de forma mais rápida do que através da utilização de processos tradicionais de levantamento;
- possibilidade de verificação da precisão do modelo existente de edificação, comparando-se com o modelo de "nuvem de pontos" (levantamento atualizado), como se pode ver na Figura 95a, que ilustra a diferença entre os modelos - em azul, 3 cm¹⁰⁴ e em verde, 0,5 cm (HUBER et al., 2010);
- possibilidade de monitorar periodicamente a evolução da obra, a partir da comparação da "nuvem de pontos" (com o registro de determinadas fases de construção) com o modelo da edificação na fase de projeto (Figura 95b), auxiliando no controle da obra, tanto em relação ao cronograma, como na qualidade de execução dos serviços;

Figura 95 – (a) Junção do modelo geométrico da edificação com a "nuvem de pontos" para verificação da precisão, através do uso de cores; (b) comparação do modelo BIM (projeto) com as "nuvens de pontos" da edificação capturadas durante a construção



Fonte: Huber e colaboradores (2010).

- auxílio na manutenção de edificações existentes e na conservação preventiva do patrimônio arquitetônico, dada a possibilidade de armazenar grande quantidade de informações, como levantamentos, desenhos, conteúdos históricos, estado de conservação, dados sobre manutenção e restauração, que podem ser adicionadas, atualizadas, compartilhadas, visualizadas e analisadas.

¹⁰⁴ Segundo os autores, a diferença de 3 cm deve-se ao erro de modelagem, que considerava as paredes (térreo e primeiro pavimento) alinhadas, o que não correspondia à realidade.

A seguir, são descritos alguns exemplos do uso de "nuvem de pontos" (sejam trechos ou edificações inteiras) como referência para a modelagem BIM:

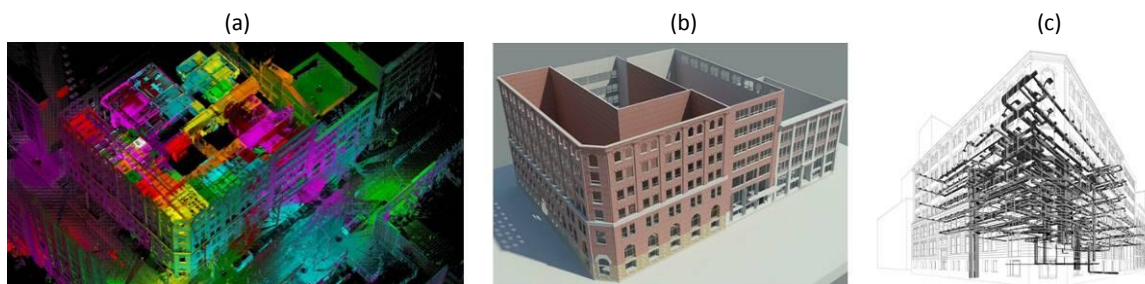
- Edificações na King Street East, no Canadá: estudos de desempenho energético;
- Sydney Opera House, na Austrália: manutenção da edificação;
- "Nuvens de pontos" para criação de componentes paramétricos, na Irlanda: criação de biblioteca de objetos paramétricos, e
- Igreja de Santa Maria, na Itália: disseminação das informações e registro das transformações históricas do monumento.

a) Edificações na King Street East – Canadá

O artigo de Attar e colaboradores (2010) mostra uma experiência inicial de integração da tecnologia *3D Laser Scanning* e BIM, através do programa Autodesk Revit, para a documentação de edificações na King Street East, sede da empresa Autodesk no Canadá. Os autores afirmam que o processo de modelagem utilizado não foi eficiente (servindo somente como referência de comparação e atualização de informações já existentes em cadastros antigos) e que não permitiu se tirar grandes proveitos da tecnologia *3D Laser Scanning*. Sugerem que sejam testados métodos mais eficientes e automatizados para a obtenção de modelos BIM a partir das "nuvens de pontos".

Esse modelo foi complementado com uma série de informações (elementos estruturais, instalações elétricas, mecânicas) para servir como "laboratório vivo" para análises e investigações sobre desempenho energético da edificação (Figura 96).

Figura 96 - Edificações na King Street East: (a) "nuvem de pontos"; (b) modelo com as principais paredes; (c) modelo com as instalações



Fonte: Disponível em: <<http://www.digital210king.org>>. Acesso em 10 abr. 2011.

b) Sydney Opera House - Austrália

Woo, Wilsmann e Kang (2010) apresentam a experiência da utilização de um modelo BIM para representar e gerenciar a Sydney Opera House (SOH). O modelo BIM da SOH foi criado nos programas Bentley Architecture, Structure e MEP e depois exportado para sistemas de gerenciamento de *facilities* - FM. Devido à complexidade das superfícies, foi realizado o levantamento com *3D Laser Scanning* de modo a permitir a modelagem do painel acústico do auditório.

Esse modelo foi usado para analisar propostas de projeto, a partir da comparação de simulações realizadas em diferentes soluções. Este caso mostrou que é possível criar modelos BIM para representar estruturas complexas. Além disso, apresentou-se a importância desse tipo de modelo para o gerenciamento da edificação, possibilitando a visualização da infraestrutura, dos espaços, dos móveis e equipamentos, e de outros dados associados à geometria, como: durabilidade dos materiais, volume, custo, consumo energético, comportamento estrutural e aspectos históricos, facilitando o acesso às informações (modelo único), a programação e o controle das atividades de manutenção.

c) "Nuvens de pontos" para criação objetos paramétricos - Irlanda

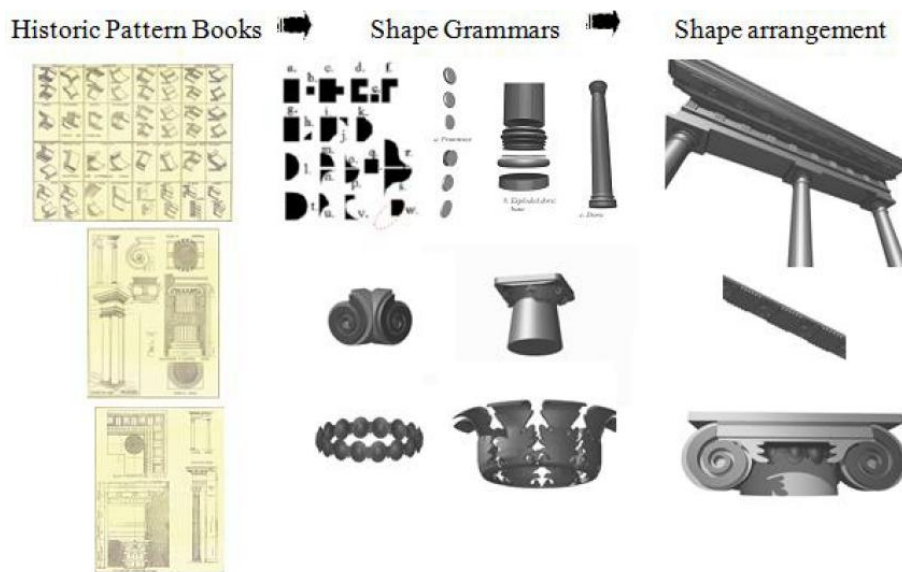
Os trabalhos dos pesquisadores de *Dublin Institute of Technology* (DIT), na Irlanda, abordam de modo mais incisivo o uso integrado da "nuvem de pontos" com a tecnologia BIM, além de desenvolverem algoritmos e métodos para auxiliar e agilizar o processo de documentação arquitetônica. Os autores usam o termo *Historic Building Information Modelling* - HBIM para tratar dessa nova forma de representação de edificações de interesse histórico-cultural, que usa os objetos paramétricos (elementos arquitetônicos construídos a partir de dados históricos¹⁰⁵) para serem mapeados sobre trechos de "nuvens de pontos" (MURPHY; MCGOVERN; PAVIA, 2009, 2011, 2013; DORE; MURPHY, 2012, 2014).

A análise da modelagem de elementos arquitetônicos está restrita ao período compreendido pelos séculos XVII e XVIII na Irlanda. A representação dos objetos paramétricos é baseada nos tratados de Arquitetura que vão desde Vitruvius e do Renascimento, até chegar ao sistema de composição arquitetônica de Durand (1819). A Figura 97 ilustra um exemplo de

¹⁰⁵ É importante ressaltar que esses modelos não servem para o restauro, pelas razões apresentadas na seção 5.2.2, no caso da Sinagoga Kluckygasse.

detalhes arquitetônicos em um tratado de arquitetura (*pattern book*), a utilização da gramática da forma (*shape grammar*) para interpretação e criação de perfis ou primitivas a serem usados na criação de objetos individuais, ou combinados (*shape arrangement*) para geração de objetos maiores como colunas, paredes, telhados etc.

Figura 97 - Exemplo de dados históricos em tratado de arquitetura para criação de objetos baseados na gramática da forma, que podem ser combinados para geração de formas mais completas



Fonte: Dore e Murphy (2014).

Os elementos construtivos são criados a partir da linguagem GDL (*Geometric Descriptive Language*), presente no *software* ArchiCAD. Segundo Murphy e colaboradores (2013), o GDL permite flexibilidade na modelagem dos elementos, que permite gerar objetos não somente a partir da combinação de primitivas geométricas, como inclui comandos para operações booleanas, triangulação, NURBS, dentre outros, para criação de “formas orgânicas” e não uniformes.

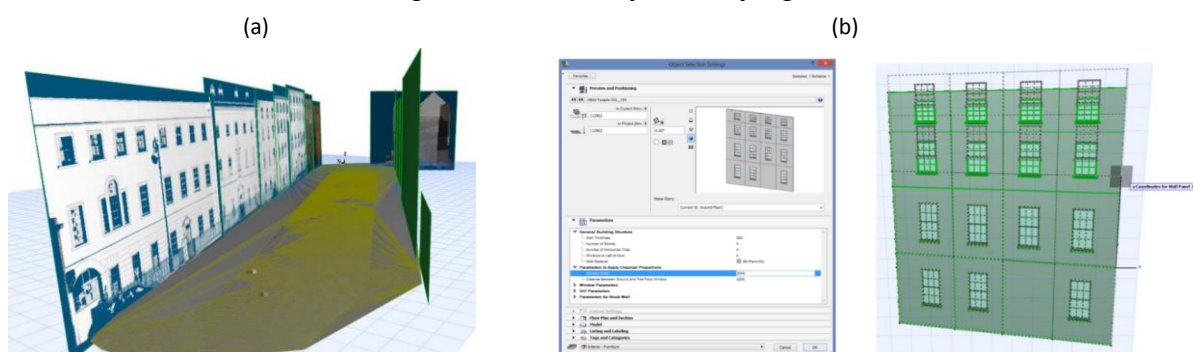
Dore e Murphy (2014) descrevem novos avanços alcançados visando automatizar a geração de modelos BIM de edificações existentes. Apresentam o *plugin* “Parametric Façade”¹⁰⁶ para o ArchiCAD, além do já desenvolvido “HBIM”, e realizam um estudo de caso realizado em uma rua histórica na Irlanda para avaliar a sua utilização prática.

O processo de criação do modelo HBIM inicia-se com a captura de dados em campo, seja pela varredura a laser (terrestre) ou pela fotogrametria. Depois, realiza-se a etapa de pré-

¹⁰⁶ O “Parametric Façade” foi desenvolvido a partir do estudo das proporções das aberturas de fachadas clássicas em tratados de arquitetura, de testes em edificações na Irlanda, e da utilização de conceitos da gramática da forma.

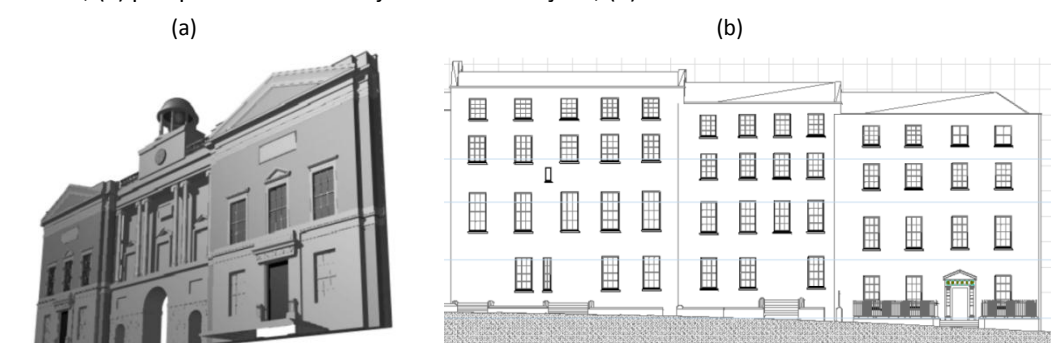
processamento dos mesmos¹⁰⁷, o seccionamento de trechos da "nuvem de pontos" e o desenho (vetorial) sobre seções realizadas na "nuvem de pontos" completa. O próximo passo, consiste em importar os dados pré-processados no ArchiCAD, usando um sistema de coordenadas de referência comum entre os arquivos (Figura 98a). Depois, utiliza-se o *plugin* Parametric Façade, que contém alguns componentes da biblioteca HBIM (Figura 98b).

Figura 98 - (a) Inserção e posicionamento preciso de diferentes tipos de informações no ArchiCAD; (b) caixa de diálogo do Parametric Façade e edição gráfica



Fonte: Dore e Murphy (2014).

Figura 99 - Modelos gerados após a incorporação de componentes paramétricos HBIM de uma rua histórica da Irlanda; (a) perspectiva de um conjunto de edificações; (b) desenho das fachadas de outro trecho



Fonte: (a) Murphy, McGovern e Pavia (2013) ; (b) Dore e Murphy (2014).

Ao final, são incorporados componentes presentes na biblioteca HBIM, que não estavam presentes no modelo da fachada paramétrica. Esses objetos são mapeados interativamente sobre os dados do levantamento e/ou os modelos de fachadas paramétricas, permitindo gerar os modelos completos das edificações (Figura 99) e uma série de outros produtos, como plantas baixas, cortes, fachadas, perspectivas e relação de esquadrias (Figura 100).

¹⁰⁷ O pré-processamento inclui as seguintes etapas: registro, segmentação, filtragem, triangulação, texturização e geração de vistas ortográficas (em planta e em elevação).

Figura 100 - Produtos obtidos automaticamente através do modelo BIM: planta baixa, corte, fachada, perspectiva, relação das esquadrias



Fonte: Murphy, MCGovern e Pavia (2013).

d) Igreja de Santa Maria - Itália

Brumana e colaboradores (2013) descrevem um exemplo de utilização de modelo BIM visando a disseminação das informações relativas à Igreja de Santa Maria em Scaria d'Intelvi (Itália), permitindo inclusive o registro e a visualização das transformações históricas sofridas pela edificação. Para a construção do modelo BIM, foram utilizadas várias fontes de dados, como levantamento a laser, fotogrametria, análise estratigráfica e documentos históricos.

O modelo BIM foi gerado a partir da importação de desenhos produzidos no AutoCAD, com auxílio do *plugin* CloudWorxs, para processamento da "nuvem de pontos". A modelagem de paredes irregulares foi realizada através da combinação de uma parede regular (de família disponível no programa) com uma camada irregular criada através das ferramentas de superfícies topográficas. Os autores relatam que esse método de representação não é adequado, não corresponde ao elemento construtivo real e não permite associar informações. Eles propõem a realização de outros experimentos visando solucionar esse problema, como importar seções para gerar objetos próprios do Revit.

Cada elemento estratigráfico foi modelado separadamente, visando a determinação da fase histórica correspondente. A visualização das fases construtivas foi possível através do uso de filtros, associados a diferentes cores (Figura 101).

Figura 101 - Uso de diferentes cores para representar as principais fases construtivas da Igreja de Santa Maria



Fonte: Brumana e colaboradores (2013).

Dada à complexidade de representação dos elementos do telhado, decidiu-se por representar os elementos distribuídos regularmente. As deformações ou diferentes distribuições das peças eram modeladas somente nos casos mais significativos.

e) Basílica de Colemaggio - Itália

Oreni e colaboradores (2014) relatam o processo de criação do modelo HBIM para ser usado no projeto de restauro da Basílica de Colemaggio, em L'Aquila, na Itália, edificação histórica construída no final do século XIII, que sofreu grandes danos e transformações ao longo dos séculos, muito em função de diversos terremotos que abalaram sua estrutura, incluindo o último que aconteceu em 2009.

O processo de geração desse modelo iniciou-se com o levantamento dos dados, que incluiu o uso integrado de várias técnicas:

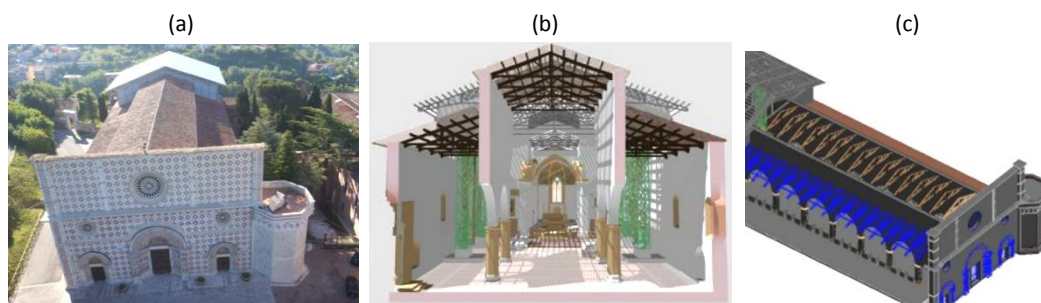
- *3D laser scanning* terrestre para levantamento do interior e exterior¹⁰⁸;
- fotogrametria terrestre para a geração de ortofotos de áreas onde a varredura a laser apresentou limitações,
- obtenção de panoramas fotográficos, para obtenção de mosaicos de alta resolução, em casos específicos;

¹⁰⁸ Nesse levantamento, foram capturadas 182 cenas (com o equipamento Faro Focus 3D), perfazendo um total de 8 bilhões de pontos.

- DSM para a geração da ortoimagem da cobertura, a partir de "nuvens de pontos" geradas por fotos aéreas capturadas por VANT (Figura 102a).

Um dos objetivos da pesquisa foi a obtenção de modelo fidedigno da edificação, com o registro de suas irregularidades. Para isso, foi utilizado o Rhinoceros¹⁰⁹ junto ao *plugin* Bentley Pointools (Figura 102b), que permitiram a modelagem das formas irregulares através das superfícies NURBS, como as paredes fora do prumo e outras anomalias registradas pelo *laser scanner*.

Figura 102 - Basílica de Colemaggio: (a) foto tomada por VANT; (b) modelo gerado no Rhino; (c) modelo BIM produzido



Fonte: Oreni e colaboradores (2014).

O segundo passo foi a importação dos elementos no Revit (Figura 102c), mantendo os dados paramétricos de cada forma, junto à possibilidade de inclusão de informações sobre os materiais, o estado de conservação, projeto de intervenção, etc. Para isso, foram realizados vários testes de conversão de elementos modelados no Rhino para objetos paramétricos do Revit. Finalmente, segundo os autores, chegou-se a um método de conversão adequado, sem perda de informações. No entanto, esse método não é descrito no artigo, sendo abordado somente o processo de conversão do modelo produzido no Rhino para o Midas¹¹⁰, para análise estrutural.

5.3 ASPECTOS METODOLÓGICOS RELACIONADOS AO AS-IS BIM

Nesta seção, são abordados aspectos metodológicos relacionados à geração de modelos BIM a partir de "nuvens de pontos". São apresentados métodos relatados em artigos, e

¹⁰⁹ Rhinoceros é um programa desenvolvido pela empresa Robert McNeel & Associates, muito difundido e utilizado atualmente para modelagem de formas complexas, especialmente para as áreas de *design* (diversos ramos), arquitetura e engenharia mecânica.

¹¹⁰ Midas é um programa desenvolvido pela MIDAS Information Technology, muito utilizado internacionalmente para análise estrutural, inclusive de formas complexas.

discutidos aspectos observados, em pesquisas realizadas ao longo dos últimos anos, sobre processos e ferramentas específicas para auxílio à modelagem BIM a partir de "nuvens de pontos". Depois, são tratadas as principais etapas envolvendo esse tipo de modelagem, desde a fase de aquisição de dados até a modelagem e verificação do modelo. Ao final, são apresentadas diferentes abordagens sobre nível de detalhe associado à documentação de edificações existentes, e discutida a importância na definição clara dos objetivos do modelo BIM para determinação dos níveis de detalhe e de precisão adequados.

5.3.1 Panorama de processos para geração de modelos *AS-IS* BIM

Os processos mais comuns de criação de modelos *as-is* BIM são através de: (1) uso das informações representadas em desenhos já existentes, correspondentes à fase de projeto; (2) realização de levantamento cadastral por medição direta (ALVES; OLIVEIRA, 2010). A grande limitação desses processos refere-se à simplificação da representação de formas mais complexas e irregulares. Além disso, é comum haver inconsistências e falta de correspondência entre os elementos representados e suas formas reais.

O uso de tecnologias para captura de "nuvens de pontos" tem permitido acelerar o processo de aquisição dos dados geométricos das edificações, e aumentar a precisão e nível de detalhe do levantamento. Apesar das vantagens da utilização das "nuvens de pontos", observou-se que na grande maioria dos artigos pesquisados, esses modelos são usados de modo indireto ou subutilizados¹¹¹. É comum a importação da "nuvem de pontos" em ferramentas CAD tradicionais (com auxílio de *plugins* específicos, como Cloudworxs) e sua utilização como referência para geração de desenhos (BRUMANA et al., 2013), para conferência de informações de registros já existentes (ATTAR et al., 2010; GIUDICE; OSELLO, 2013) ou para modelagem de trechos mais complexos da edificação (WOO; WILSMANN; KANG, 2010).

As maiores dificuldades citadas nesses trabalhos referem-se a: modelagem de formas irregulares através das ferramentas BIM, importação de objetos complexos gerados em outros programas, determinação do nível de detalhe adequado do modelo, associação de

¹¹¹ Acredita-se que o uso indireto ou a subutilização do modelo de "nuvens de pontos" para geração de modelos BIM deva-se à falta do estabelecimento de métodos adequados de trabalho para manipulação/utilização desse tipo de modelo diretamente na ferramenta BIM, aliado à possibilidade, relativamente recente (desde a versão 2012 do Revit), de inserção da "nuvem de pontos" no *software* BIM mais difundido e utilizado atualmente, o Revit da Autodesk.

atributos semânticos aos elementos construtivos e falta de famílias de componentes adequados às edificações existentes, especialmente as históricas. Os processos mais comuns encontrados na literatura com relação à modelagem BIM a partir de "nuvens de pontos" são:

- desconsideração das irregularidades dos elementos (como paredes fora de prumo e com "barrigas") e simplificação da representação de objetos complexos e detalhados, para utilização das famílias existentes na biblioteca do programa;
- criação e utilização de uma biblioteca de objetos paramétricos (HBIM), baseado em tratados de arquitetura;
- modelagem dos objetos de formas mais complexas em modeladores geométricos ou em programas específicos para processamento de "nuvem de pontos", para a posterior importação na ferramenta BIM¹¹².

O primeiro processo é o que permite maior rapidez na modelagem, mas é o que apresenta maiores limitações de precisão e nível de detalhe.

A criação e utilização da biblioteca HBIM, proposta pelos pesquisadores do *Dublin Institute of Technology* (DIT) na Irlanda (DORE; MURPHY, 2012, 2014), representa uma forma de gerar modelos detalhados de modo mais automatizado, no ArchiCAD. No entanto, a biblioteca de elementos e os parâmetros relativos à composição de fachadas são adequados a estilos arquitetônicos comuns no centro histórico da Irlanda, o que não é realidade para todos os países.

O terceiro processo (importação de formas complexas) parece mais adequado para a modelagem dos objetos complexos, considerando as irregularidades e deformações dos objetos existentes, uma vez que os programas de modelagem complexa e específicos para manipulação de "nuvens de pontos" apresentam mais recursos de modelagem. O grande problema desse método está relacionado à interoperabilidade entre os programas, para não somente evitar a perda de informações, como para permitir que a geometria seja transformada em elemento construtivo existente na ferramenta BIM.

¹¹² Alguns autores relatam os problemas de importação de objetos modelados fora da ferramenta BIM, uma vez que não conseguem associá-los aos elementos construtivos, sendo utilizados somente para a visualização da geometria.

De modo geral, verifica-se que o processo de criação de modelos BIM a partir de "nuvem de pontos", conhecido como "Scan to BIM"¹¹³, é ainda bastante interativo, apesar de alguns avanços ocorridos nos últimos cinco anos. A seguir, um breve relato sobre as técnicas utilizadas nos últimos anos, começando pelas mais antigas e que demandavam maior tempo de trabalho e/ou mais recursos:

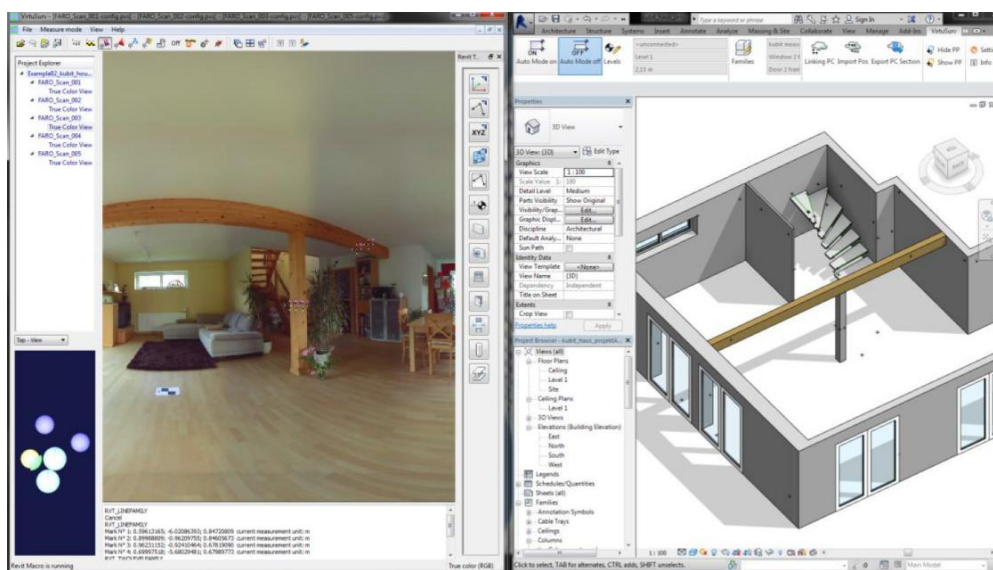
- geração interativa de modelos de superfície (sejam primitivas tridimensionais ou malha triangular irregular) em programa para engenharia reversa, ou no AutoCAD com auxílio de *plugins*, somente para permitir a importação dos objetos tridimensionais na ferramenta BIM e, assim, possibilitar uma nova modelagem com os elementos construtivos próprios da ferramenta BIM (processo de dupla modelagem interativa);
- surgimento de programas mais automatizados para modelagem, como o EdgeWise da ClearEdge3D, para o reconhecimento e geração automática de faces a serem importadas na ferramenta BIM, para a realização uma nova modelagem (agora interativa), tomando-se as faces como referência (MAUCK; GEE, 2010);
- lançamento do *plugin* ScanToBim (Imaginit Technologies), que possibilitou a importação direta da "nuvem de pontos" no Revit;
- possibilidade de importação direta da "nuvem de pontos" a partir da versão 2012 do Revit e do AutoCAD. Esse fato, junto ao desenvolvimento dos recursos de modelagem do módulo de criação de massas (*Conceptual Mass*), facilitou a criação de formas mais complexas dentro da própria plataforma Revit;
- surgimento de novos programas para processamento junto ao Revit, como o CloudWorks (Leica) e VirtuSurv (Kubit), bem como novas versões do Scan to BIM, com mais possibilidades para manipulação e modelagem sobre a "nuvem de pontos";
- lançamento do Autodesk Recap Pro, para importação, manipulação e exportação de "nuvens de pontos" para diversos programas, especialmente os da Autodesk.

Desses fatos, destacam-se a possibilidade de importação de "nuvens de pontos" diretamente no Revit e os *plugins* Scan to BIM e o VirtuSurv.

¹¹³ O termo Scan to BIM está associado também a um *plugin* da Imaginit Technologies e a uma empresa que gera modelos BIM a partir "nuvens de pontos".

O Scan to BIM permite modelar de modo semiautomático elementos construtivos como paredes, pilares, pisos e tubulações a trechos selecionados da "nuvem de pontos". Apresenta recursos que facilitam a visualização da "nuvem de pontos", permite a comparação entre o modelo BIM e a "nuvem de pontos", visando a detecção de interferências e a verificação da precisão do modelo gerado (através de gráficos ou planilhas com os valores dos desvios detectados).

Figura 103 - Visualização do modo de trabalho com o VirtuSurf: à esquerda realiza-se a seleção dos elementos construtivos sobre o panorama e à direita visualiza-se no Revit os elementos sendo modelados



Fonte: Disponível em: <http://www.kubit-software.com/CAD/Products/VirtuSurv/3D_Laser_Scanning_VirtuSurv_Revit.php>. Acesso em: 5 jul. 2014.

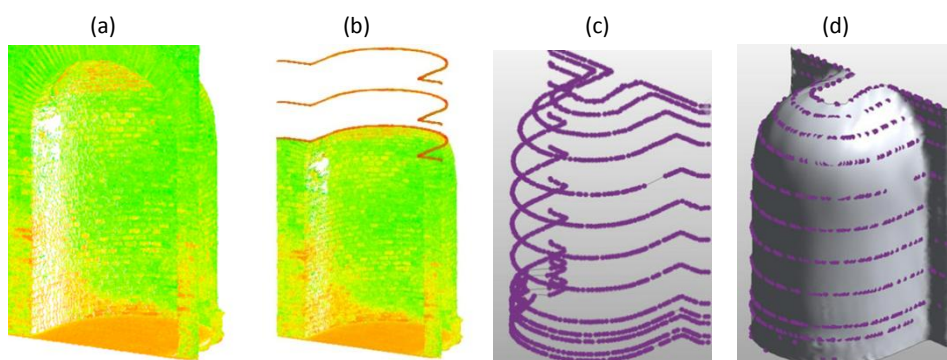
O VirtuSurf permite a modelagem dos elementos construtivos (como paredes, pilares, janelas e portas) a partir da seleção de pontos sobre o panorama gerado na varredura a laser. É um programa do tipo *standalone*, entretanto, trabalha integrado ao Revit desde 2013, apresentando uma interface de janelas (Figura 103) para visualização simultânea dos dois programas (VirtuSurf e Revit). A versão de 2014 permite a criação de famílias de componentes diretamente a partir da seleção de pontos sobre o panorama e possibilita a inserção de "nuvens de pontos" no editor de famílias do Revit, um avanço em relação aos outros *plugins*.

O Recap Pro permite importar "nuvens de pontos" em diversos formatos de arquivos, registrar diversas cenas, recortar trechos, apagar e limpar áreas selecionadas e exportar para formatos compatíveis com os programas da Autodesk. Seu uso é interessante, pois permite substituir, em muitos casos, a necessidade de programas para Engenharia Reversa, nas fases

de pré-processamento, que compreende tarefas como registro, limpeza e recorte da "nuvem de pontos".

Apesar desses programas acelerarem a modelagem, na medida em que apresentam uma série de recursos automatizados para associação dos elementos construtivos e visualização da "nuvem de pontos", eles limitam-se à utilização de famílias de componentes presentes na biblioteca do programa e não apresentam recursos para facilitar a modelagem de formas complexas e irregulares.

Figura 104 – Fluxo de trabalho com o GreenSpider: (a) "nuvem de pontos" de um trecho da edificação; (b) seccionamento da "nuvem de pontos"; (c) importação dos pontos com *splines*; (d) geração do modelo paramétrico no ambiente de massa conceitual



Fonte: adaptado de Garagnani e Manferdini (2013).

Garagnani e Manferdini (2013) propõem um novo método para facilitar a modelagem de formas complexas no Revit, conferindo maior precisão aos modelos gerados a partir de "nuvens de pontos". Eles apresentam algumas experiências realizadas com o *plugin* GreenSpider¹¹⁴, desenvolvido para o Revit visando superar a sua limitação de não permitir a seleção precisa (*snap*) de pontos específicos da "nuvem de pontos", e da exigência em se trabalhar com planos de referência para criar e/ou modificar os contornos dos objetos. O processo inicia-se com o seccionamento da "nuvem de pontos" através de planos paralelos em programas para Engenharia Reversa (Figura 104b), visando reduzir a quantidade de dados, mas, ao mesmo tempo, garantindo a precisão requerida. Para cada seção deve ser gerado um arquivo em formato ASCII. Com o GreenSpider, esses arquivos são importados no Revit no ambiente de modelagem de massa conceitual, visando sua visualização ou seleção

¹¹⁴ O GreenSpider pode ser baixado gratuitamente no *website* <<http://www.tcproject.net/pivotx/?e=149>>. Na versão atual é possível executar somente dois comandos: GSpoints, para importação dos pontos da nuvem, e GScurves, para traçar uma curva do tipo spline a partir da conexão dos pontos.

como "pontos independentes" ou já conectados automaticamente através de *splines* (Figura 104c). Essas *splines* podem ser usadas para a criação do objeto paramétrico.

5.3.2 Discussão sobre as etapas de modelagem BIM a partir de "nuvens de pontos"

O processo de modelagem BIM a partir de "nuvens de pontos" pode ser dividido nas seguintes etapas: aquisição de dados, pré-processamento, modelagem e verificação.

Na fase de **aquisição de dados**, obtêm-se em campo as "nuvens de pontos" de diversas estações, visando cobrir todo objeto. Recomenda-se o uso integrado da varredura a laser e da tomada fotográfica junto à medição de pontos (por topografia ou medição direta). A configuração da fase de aquisição de dados (como posicionamento das estações e dos alvos, os equipamentos utilizados e a densidade da "nuvem de pontos") influenciam diretamente as fases posteriores e deve ser estabelecida a partir do planejamento criterioso, considerando as características do objeto, do entorno e dos objetivos do levantamento.

Além da captura dos dados em campo, é importante a utilização de outras fontes de dados, que incluem: desenhos existentes, anotações, fotos antigas e atualizadas, e outras informações que podem ser analisadas e comparadas. Todas as informações disponíveis e suas ambiguidades devem ser resolvidas e integradas durante a fase de modelagem (PRABHU, 2010).

A fase de **pré-processamento** visar preparar os dados capturados para serem importados e utilizados na modelagem BIM. Isso inclui a filtragem dos dados, o registro das cenas, a segmentação das "nuvens de pontos" e a determinação do sistema de coordenadas de referência, para junção das diversas partes das "nuvens de pontos" (modelos parciais) com as outras fontes de dados.

A fase de **modelagem** é a mais longa e interativa de todas, consistindo no processo de transformação das "nuvens de pontos" (e outras informações obtidas em campo) em um modelo BIM, que envolve as seguintes etapas, não necessariamente separados e nessa ordem (TANG et al., 2010; HUBER; AKINCI, 2011): (1) modelagem da geometria de cada componente; (2) associação do objeto a uma determinada categoria (ou família); (3)

atribuição de parâmetros aos objetos, juntamente com seus metadados; (4) estabelecimento de relações espaciais e funcionais entre os componentes da construção.

A finalidade do modelo e o nível de detalhe devem estar bem definidos. Estes têm grande influência na maneira como os elementos serão modelados, nos tipos e nas quantidades de famílias de componentes que serão criados/utilizados.

Durante a modelagem, é comum a utilização de dados segmentados, como trechos de "nuvens de pontos", ortofotos, seções e desenhos, para facilitar a identificação das formas, dos contornos (geratrizes) e caminhos (diretrizes) a serem usados como referência para a criação dos modelos. É importante que exista um sistema de coordenadas comum entre as diversas fontes de dados, para permitir seu correto posicionamento no modelo.

Segundo Dore e Murphy (2014), a segmentação dos dados é importante, pois a modelagem sobre uma "nuvem de pontos" completa e densa geralmente apresenta alguns problemas: (1) lentidão da ferramenta BIM para manusear e processar grande quantidade de dados; (2) dificuldade na visualização da posição exata do objeto sobre o modelo completo da "nuvem de pontos".

Huber e Akinci (2011) destacam o seccionamento e o ajuste de superfícies (associação de primitivas à "nuvem de pontos") como as principais técnicas de modelagem de componentes BIM a partir de "nuvem de pontos".

No seccionamento, são criadas seções a partir da visualização de pequenas faixas de "nuvens de pontos". Essas seções são usadas como referência para utilização de comandos de modelagem, como *loft*, revolução, extrusão e varredura ao longo de um caminho. A desvantagem desse método é que somente uma parte dos dados é usada para a modelagem. Nesse sentido, é importante a definição criteriosa das seções (posição e quantidade) de modo a permitir a representação adequada da forma.

No método de ajuste de superfícies, o usuário seleciona um ponto ou um conjunto de pontos e especifica o elemento construtivo presente na biblioteca do programa (como piso, parede, pilar, tubulação) que deve ser ajustado a esse trecho de "nuvem de pontos". Através de ferramentas automatizadas pode-se estender a seleção do pequeno trecho de "nuvem de

pontos" para contemplar todos os pontos relacionados àquela superfície. Podem ser usados recursos de interseção de superfícies para corrigir as arestas adjacentes.

Segundo Prabhu (2010), é interessante registrar (como parâmetro) junto aos elementos construtivos, a técnica de cadastro utilizada e o responsável pelo levantamento. Além disso, o autor aponta a possibilidade de associar uma série de arquivos (fotografias, vídeos, "nuvem de pontos") como um *link* externo do modelo BIM.

A fase final de modelagem é a preparação para a visualização dos dados e a exportação para outros programas, para as mais variadas finalidades, como simulação, disponibilização na *web*, associação a um sistema de informações geográficas, etc. A forma com que os dados são gerados e estruturados influencia diretamente no modo de visualização e interpretação das informações. A utilização de padrões neutros é fundamental visando a interoperabilidade de informações, sem a degradação dos dados. No entanto, como é comum haver problemas de interoperabilidade entre os programas, devem ser testados, antecipadamente, métodos para conversão de formatos visando uma correta migração dos dados.

Após a modelagem, ou em alguns casos durante a mesma, é importante a **verificação** dos dados, visando garantir a confiabilidade da modelagem e sua adequação às funções requeridas e aos níveis de tolerância estipulados. Essa verificação ou validação pode ser realizada com auxílio de programas que permitem registrar os desvios entre modelos, como a comparação da "nuvem de pontos" e o modelo gerado.

5.3.3 Níveis de detalhe

Os níveis de detalhe (*levels of detail*) do modelo BIM de uma edificação existente não podem ser confundidos com os níveis de desenvolvimento (*levels of development*) discutidos na seção 5.1.2. O nível de detalhe refere-se à quantidade e detalhamento de informações (gráficas e não gráficas) incluídas nos elementos do modelo. E o nível de desenvolvimento está relacionado ao grau de maturidade na definição dos elementos, ou seja, o quanto a

equipe de projeto pode confiar na informação quando for utilizar o modelo¹¹⁵ (BEDRICK, 2013).

Apesar de já existir a classificação de diferentes níveis de desenvolvimento (LOD) do modelo BIM para novas construções, ainda não existe protocolo semelhante, utilizado como padrão internacional, associado à documentação de edificações existentes, com a determinação de níveis de detalhe relacionados aos diferentes objetivos do modelo BIM.

Em se tratando de edificações existentes, foram encontradas na literatura classificações relacionadas a: informações que devem constar no modelo com finalidade de manutenção (EAST, 2013), parâmetros de varredura a laser (GSA, 2009), níveis de detalhe associados ao padrão CityGML para representação tridimensional de cidades, níveis de detalhe de modelos BIM produzidos por "nuvens de pontos" (PLOWMAN, 2012).

No manual "The COBie Guide" (EAST, 2013) estão especificados uma série de parâmetros mínimos que devem constar no modelo para fins de manutenção, como tipo, localização, modelo, números de série, data de instalação e garantias dos equipamentos técnicos.

Já no "*GSA BIM Guide For 3D Imaging*" (GSA, 2009), são apresentados aspectos relacionados à varredura a laser, como a determinação de tolerância e tamanhos mínimos dos objetos a serem modelados, associados a diferentes níveis de detalhe (Quadro 16). O nível 1, menos detalhado, é mais adequado para o levantamento na escala urbana, para registro de conjuntos de edificações e para desenvolvimento de projetos urbanísticos. Os outros níveis são adequados para aplicações na escala da edificação, com aumento do nível, a depender da finalidade. Nos níveis mais detalhados, correspondentes ao 3 e 4, os valores de tolerância são 6 e 3 mm respectivamente, e os tamanhos mínimos de objetos a serem registrados são a partir de 13 mm.

¹¹⁵ A distinção entre esses dois conceitos pode ser melhor entendida através do seguinte exemplo. Um arquiteto pode inserir um componente bastante detalhado de luminária (disponível em uma determinada biblioteca) em seu modelo ainda em fase de concepção, sem ter avaliado completamente a pertinência de sua utilização e localização no projeto. Nesse caso, tem-se um nível de detalhe de modelo de luminária bastante elevado, mas um baixo nível de desenvolvimento. O elevado nível de detalhamento pode transmitir uma falsa ideia de maior desenvolvimento do modelo (FARINA, 2013).

Quadro 16 - Associação dos níveis de detalhe com valores de tolerância e tamanhos mínimos do objeto

NÍVEIS DE DETALHE	TOLERÂNCIA (mm)	TAMANHO MÍNIMO DO OBJETO (mm)
Nível 1	51	152
Nível 2	13	25
Nível 3	6	13
Nível 4	3	13

Fonte: adaptado de GSA (2009, p. 5).

O padrão CityGML classifica os modelos geométricos de cidades em cinco níveis de detalhe, conforme ilustrado na Figura 105. O LOD 0 consiste no modelo digital de terreno (MDT) com a possibilidade de aplicação da textura obtida por imagens aéreas ou de satélite. O LOD 1 representa o MDT (LOD 0) juntamente com os modelos simplificados das edificações, criados a partir da determinação de suas alturas. O LOD 2 consiste na representação simplificada das fachadas (igual ao LOD 1), acrescentando a modelagem das coberturas, e também a possibilidade de aplicação de foto-texturas. O LOD 3 representa um modelo detalhado do exterior das edificações (com varandas, portas, janelas, etc.) e o LOD 4, o modelo completo da edificação, contemplando inclusive seu interior (divisões internas, escadas, esquadrias, etc.).

Figura 105 - Os cinco níveis de detalhe (LOD 0 a 4) definidos pelo padrão CityGML



Fonte: adaptado de Stadler e Kolbe (2008).

O único material encontrado sobre níveis de detalhe em modelos BIM gerados a partir de "nuvens de pontos" foi o "*BIM Survey Specification*", produzido pela empresa inglesa de levantamento Plowman Craven¹¹⁶ (PLOWMAN, 2012).

¹¹⁶ Plowman Craven é uma empresa de levantamento fundada desde 1964, que utiliza a tecnologia *3D Laser Scanning* desde 1999, e atualmente utiliza a "nuvem de pontos" como referência para a modelagem BIM. O "*BIM Survey Specification*" visa auxiliar os clientes na especificação dos produtos requeridos, e facilitar o entendimento da empresa sobre a maneira como os produtos serão gerados.

Plowman (2012) determina cinco níveis de detalhe genéricos (*generic levels of detail*) que estão relacionados às fases de levantamento e de modelagem. A depender da necessidade, podem ser gerados modelos com níveis de detalhe "customizados", com variações em relação ao padrão especificado no documento da empresa. Os níveis de detalhe são classificados em:

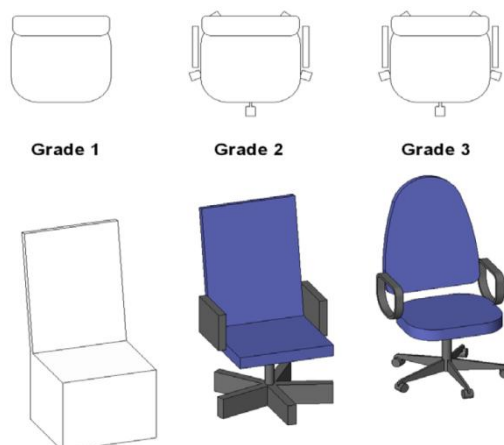
- *Level 1 – Mass Model*, contemplando somente a volumetria externa da edificação, sem esquadrias ou detalhes arquitetônicos.
- *Level 2 – Shell and Core Model*, contém os principais elementos estruturais e aberturas da edificação, incluindo pisos, pilares, vigas e aberturas dos vãos, sem detalhes e mobiliário e sem criação de novas famílias, gerando uma representação compatível com a escala 1/200.
- *Level 3 – Standard Survey Model*, nível de detalhe padrão, compatível com as escalas 1/50 ou 1/100, incluindo detalhes de elementos básicos. Podem ser criadas famílias básicas para portas e janelas, mas sem definição de superfícies de acabamento. Mobiliários fixos podem ser modelados de modo simplificado, se for necessário.
- *Level 4 – Detailed Survey Model*, inclui um maior nível de detalhe na criação das famílias. Podem ser representados os materiais de acabamento das superfícies mais significativas. Nível de detalhe compatível com as escalas 1/50 ou mesmo 1/20. Se necessário, podem ser gerados modelos separados de estrutura e das instalações.
- *Level 5 – Detailed Survey Model with supplied meta-data*, idêntico ao nível 4, mas incluindo informações textuais relacionadas aos objetos modelados e metadados (não geométricos) obtidos por terceiros.

Segundo Plowman (2012), para a definição dos níveis de detalhe dos componentes modelados foi adotada a classificação do "AEC (UK) BIM Protocol"¹¹⁷, que divide os componentes em quatro níveis, de *Grade 0 (G0)* a *Grade 3*. No G0, os objetos são representados de forma esquemática (como a simbologia elétrica usada em projetos). No G1, os objetos são representados com um mínimo de detalhe e com especificações genéricas. No G2, adequado para a maioria dos projetos, é possível a identificação do tipo e

¹¹⁷ Protocolo inglês que descreve aspectos relacionados a intercâmbio de arquivos, metodologia de modelagem, normas e convenções para nomenclatura de pastas, de estilos de apresentação (tipos de linhas, espessuras de traços, hachuras) para padronização no setor de Arquitetura, Engenharia e Construção do Reino Unido.

dos materiais. E o G3 é idêntico ao G2, com exceção da representação tridimensional¹¹⁸ (Figura 106).

Figura 106 - Níveis de detalhe dos componentes



Fonte: AEC UK (2012, p. 26).

O AEC (UK) determina que a aparência gráfica seja independente dos metadados incluídos no objeto, permitindo que seja possível, por exemplo, ter um objeto no *Grade 1* com os dados completos de fabricante, custo e especificações.

Além dos níveis de detalhe, é importante a definição da precisão requerida para o levantamento e dos valores de tolerância de modelagem. A precisão do levantamento influencia diretamente nos procedimentos de varredura a laser em campo, como na definição da densidade da "nuvem de pontos". Para maior confiabilidade dos dados e para possibilitar a verificação da precisão do escaneamento a laser é importante o levantamento de pontos de controle por estação total.

Quadro 17 - Associação dos níveis de detalhe (*levels*) com escalas de representação e espaçamento dos pontos na "nuvem de pontos"

NÍVEIS DE DETALHE	ESCALAS CORRESPONDENTES	ESPAÇAMENTO DOS PONTOS (mm)
<i>Level 1</i>	Menor que 1/200	20
<i>Level 2</i>	1/200	20
<i>Level 3</i>	1/100 ou 1/50	10
<i>Level 4</i>	1/50 ou 1/20	5
<i>Level 5</i>	1/50 ou 1/20	5

Fonte: elaboração da autora, baseada nas informações de Plowman (2012).

¹¹⁸ O AEC (UK) BIM Protocol chama atenção de que quando houver dúvida sobre o nível de detalhe adequado, os usuários devem optar por uma representação tridimensional mais leve (menos detalhada), uma vez que a eficiência do modelo é bastante influenciada pela quantidade de dados presentes na geometria dos componentes.

Plowman (2012) apresenta três grandes grupos associados a diferentes valores de espaçamento de pontos - ou densidade da "nuvem de pontos" (Quadro 17).

A definição dos níveis de tolerância de modelagem tem relação direta com a forma com que os objetos serão modelados, permitindo determinar, por exemplo, até que ponto devem ser considerados e representados os desvios de paredes e forros. Para resolver esses casos, Plowman (2012) considera que o método mais efetivo é definição dos valores máximos de tolerância em que o elemento modelado pode desviar da "nuvem de pontos", e classifica os desvios em três níveis, com valores de tolerância de 60, 30 e 15 mm. Aponta ainda que, quando necessário, deve-se utilizar recursos do Revit para modelagem mais complexa (*Model in-place* ou *Conceptual Mass*) visando a representação mais precisa dos elementos irregulares.

5.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A partir das informações apresentadas e discutidas nesse capítulo, é possível vislumbrar uma série de aplicações dos modelos BIM para documentação de edificações existentes, mas também identificar limitações das tecnologias e dos métodos atuais para representação das irregularidades e complexidades inerentes às formas existentes, em especial às históricas.

Essas limitações são evidentes quando observados os exemplos dos modelos BIM de edificações existentes apresentados em artigos. De modo geral, verifica-se uma simplificação excessiva do modelo, grandes problemas para a modelagem de formas complexas (como paredes irregulares e ornamentos detalhados) e utilização de texturas genéricas, muito diferentes das informações presentes na edificação "real".

Acredita-se que isso acontece devido à falta de conhecimento ou sistematização de métodos de trabalho para utilização dos modelos de "nuvens de pontos" de modo adequado, visando resolver problemas específicos durante a modelagem BIM, e levando em consideração o nível de detalhe e a aplicação desejada.

O modelo de "nuvem de pontos" é capaz de registrar com alto nível de detalhe as irregularidades/complexidades dos elementos construtivos e decorativos, às vezes imperceptíveis a olho nu. Essas informações são preciosas para a modelagem mais precisa do modelo BIM. Entretanto, a modelagem minuciosa dessas irregularidades pode demandar

um tempo de trabalho extremamente elevado, que não se justifica para muitas aplicações. Além disso, o tamanho do arquivo aumenta significativamente, dificultando o manuseio e o armazenamento das informações.

Uma das maiores vantagens do levantamento a laser é que as "nuvens de pontos" podem ser visualizadas/utilizadas para extração de informações adicionais, quando requeridas, e podem ser gerados modelos com diferentes níveis de detalhe necessários para uma dada aplicação.

As informações apresentadas sobre nível de detalhe, resolução da "nuvem de pontos" e níveis de tolerância representam uma referência inicial. Todavia, os valores precisos devem ser determinados pelo usuário/solicitante do serviço e devem ser adequados às especificidades do projeto em pauta.

Nesse sentido, verifica-se a importância em se definir claramente os objetivos do modelo BIM associados aos níveis de detalhe e precisão requeridos. Desse modo, é possível determinar não só **quais** dados deverão constar no modelo, mas **como** eles deverão ser representados. Esses assuntos serão abordados nos capítulos 7 e 8.

O capítulo 6, a seguir, apresenta experimentos realizados com as tecnologias selecionadas, para diversas finalidades: (1) geração de "nuvens de pontos" por fotografias (DSM); (2) processamento das "nuvens de pontos" em programa para Engenharia Reversa; (3) avaliação dos métodos de modelagem complexa em ferramenta BIM.

Capítulo 6

Experimentação e análise das ferramentas

6 EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DAS FERRAMENTAS

Foram realizados experimentos com diversas tecnologias e ferramentas, envolvendo desde a fase de captura de "nuvens de pontos" por fotografias, até o processamento dos dados em programa para engenharia reversa e a modelagem em ferramenta BIM. Esta etapa visou a apropriação de diversas ferramentas, a análise de fluxos de trabalho e de produtos gerados, e a avaliação das potencialidades e limitações das tecnologias.

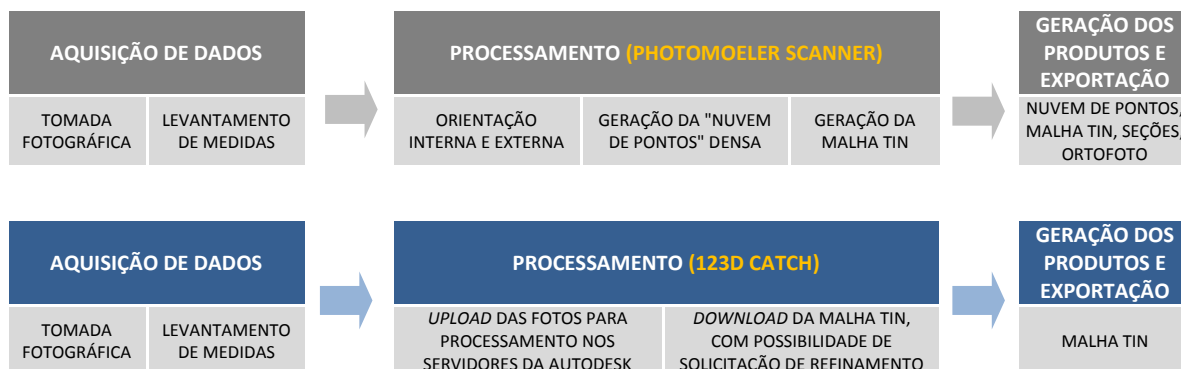
Dentre os principais experimentos realizados, destacam-se:

- (1) geração de "nuvens de pontos" por fotografias de pequenos objetos, para análise comparativa de processos e produtos gerados por diferentes ferramentas para DSM (PhotoModeler Scanner e 123D Catch);
- (2) obtenção de produtos derivados da "nuvem de pontos" (como superfícies NURBS e curvas de isovalor), a partir da utilização de programa para Engenharia Reversa (Geomagic Studio);
- (3) criação do modelo BIM de uma edificação da FAUFBA, a partir de produtos gerados por Fotogrametria Digital (*stricto sensu*) e por DSM, para comparação de processos e análise dos resultados;
- (4) avaliação dos métodos de modelagem mais complexa no Revit.

6.1 COMPARAÇÃO DE FERRAMENTAS PARA DSM

O processo de geração de "nuvem de pontos" com a técnica DSM pode ser estruturado em diferentes etapas, que apresentam especificidades a depender da ferramenta utilizada. Descreve-se, a seguir, a síntese dos fluxos de trabalho para utilização das ferramentas PhotoModeler Scanner e Autodesk 123D Catch (Figura 107), juntamente com análise dos produtos gerados em cada uma. A descrição detalhada dos procedimentos necessários para a etapa de "processamento" nas duas ferramentas pode ser vista no Apêndice A.

Figura 107 - Síntese do fluxo de trabalho para produção de "nuvens de pontos" pelas ferramentas PhotoModeler Scanner (cinza) e 123D Catch (azul)

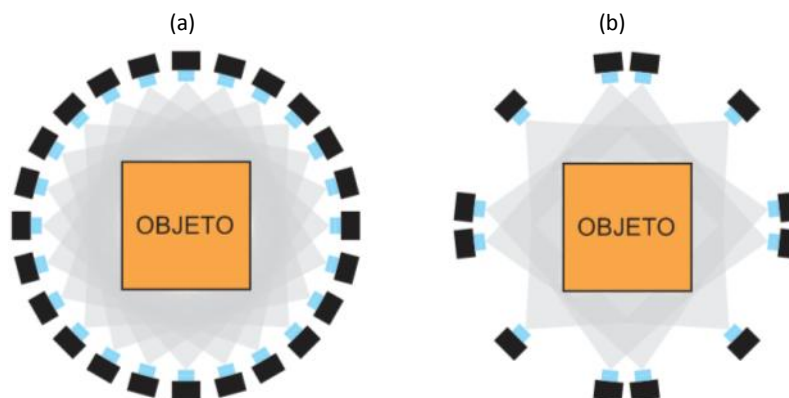


Fonte: elaboração da autora.

6.1.1 Aquisição de dados em campo

Essa etapa consiste na tomada fotográfica e no levantamento de algumas medidas para a determinação da escala do modelo. A depender do programa para DSM utilizado podem existir diferenças na configuração do posicionamento das estações.

Figura 108 - Tomada fotográfica para DSM: (a) posicionamento padrão; (b) posicionamento possível no PhotoModeler, com estações isoladas nas quinas e estações próximas nas faces para a correlação de *pixels* homólogos



Fonte: elaboração da autora.

De modo geral, deve-se seguir as orientações citadas na seção 3.2.4 (Figura 108a). No entanto, quando se utiliza a opção mais interativa do PhotoModeler Scanner, pode-se adotar outra disposição das estações, conforme ilustrado na Figura 108b, permitindo diminuir a quantidade de fotos, mas garantindo elevada precisão. A precisão geométrica na determinação do posicionamento e orientação das estações é assegurada pelos ângulos maiores entre as tomadas fotográficas (entre 45 e 90 graus), ao passo que a precisão na correlação automática dos pontos homólogos é garantida pelos baixos valores de ângulos e

distâncias¹¹⁹ (implicando em valores reduzidos da relação R) entre as estações a serem usadas para geração da "nuvem de pontos".

6.1.2 Processamento

O processamento inicia-se com a inserção das fotografias no PhotoModeler Scanner ou *upload* das mesmas no 123D Catch, para processamento remoto via *web*. Há grandes diferenças na forma com que os dados são especificados e processados nesses programas.

O PhotoModeler Scanner permite a especificação de diversos parâmetros, como o tipo de processo para a orientação das fotografias (se interativo ou automatizado), o espaçamento entre os pontos na "nuvem de pontos", os pares de fotos que serão usados para a associação densa de *pixeis* homólogos (*Dense Matching*), diferentemente da maioria das ferramentas para DSM (incluindo o 123D Catch), que possuem apenas ferramentas automatizadas de processamento, com poucos parâmetros determinados pelos usuários.

Essas características permitem maior controle dos produtos que são gerados no PhotoModeler Scanner. No entanto, requer que a câmera seja calibrada, exige mais conhecimento do operador para especificação dos parâmetros apropriados para cada tipo de levantamento, além de ser necessário mais tempo de processamento.

A seguir, são detalhadas as etapas de processamento no PhotoModeler Scanner e comparadas com as do 123D Catch.

6.1.2.1 Orientação interna e externa

Para determinação dos parâmetros da câmera (orientação interna) no PhotoModeler Scanner, é necessária a calibração da mesma¹²⁰. No 123D Catch, são utilizados valores aproximados de alguns parâmetros contidos no EXIF das imagens, não sendo necessário (nem possível) realizar a calibração da câmera.

¹¹⁹ Essa configuração permite obter grandes sobreposições das feições e pequenas variações entre os conjuntos de *pixeis* nas fotografias.

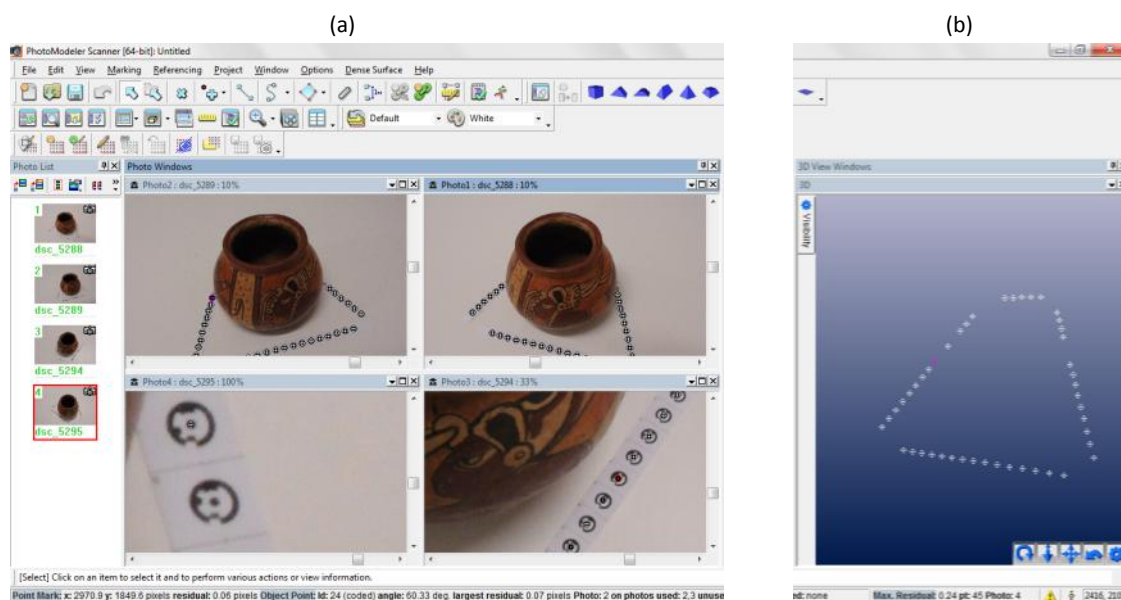
¹²⁰ Em alguns casos, é possível o processamento de fotografias no PhotoModeler sem o conhecimento dos parâmetros internos da câmera ou a partir de valores aproximados do EXIF. No entanto, é altamente recomendado que seja realizado o processo de calibração para obtenção de resultados mais precisos.

Após a determinação da orientação interna no PhotoModeler¹²¹, pode-se iniciar o processo de restituição para obtenção das "nuvens de pontos". Para tanto, deve-se escolher o tipo de projeto, se interativo (*Standard Project*) ou automatizado (*Automated Project*).

No tipo *Standard Project* devem ser marcados e associados interativamente alguns pontos homólogos nas várias fotografias. Esses pontos devem ser bem identificados e estar espalhados sobre toda a imagem, para permitir melhor precisão na orientação externa relativa. Após o processamento, é possível recuperar o posicionamento das estações e criar o modelo preliminar, baseado nos pontos traçados.

Em se tratando de objetos mais complexos e irregulares (sem quinas/vértices ou com número reduzido dos mesmos), é importante a identificação precisa de pontos comuns nas várias fotografias, o que pode ser facilitado com auxílio de alvos aplicados em algumas partes do objeto ou sobre uma base. Nesses casos, os alvos auxiliam, inclusive, na determinação da escala real do modelo, a partir da associação da medida levantada em campo com as marcações visualizadas nas fotos.

Figura 109 - Processo automatizado baseado em alvos codificados: (a) identificação e correlação dos alvos; (b) geração do modelo preliminar (base)



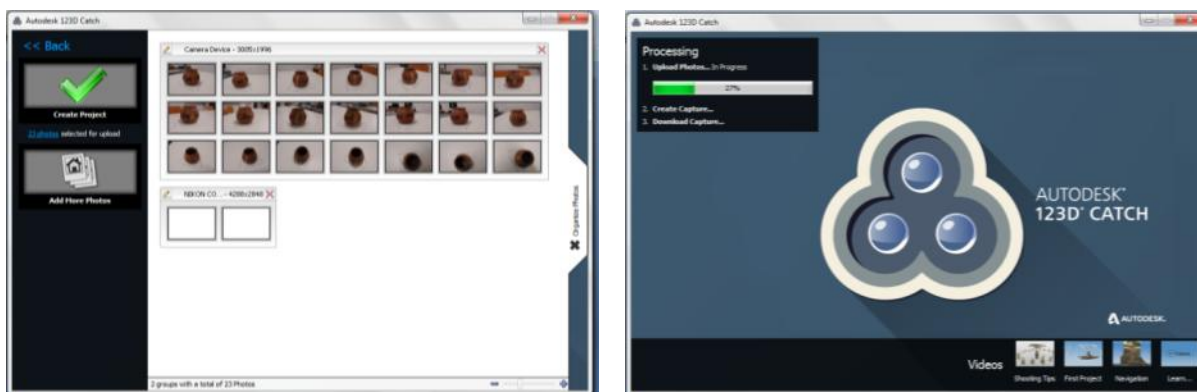
Fonte: elaboração da autora.

¹²¹ Operação que só precisa ser realizada uma vez para cada câmera utilizada em um levantamento, considerando-se que todos os parâmetros serão idênticos aos especificados no momento da calibração, como distância focal e resolução das imagens.

No tipo *Automated Project*, deve-se escolher o tipo de processo desejado (para realização da orientação relativa), se baseado na detecção e associação automática de alvos codificados (Figura 109a) ou de feições naturais. Essa etapa permite realizar a orientação externa das fotografias, gerando o modelo preliminar, nesse caso (Figura 109b), as coordenadas tridimensionais dos alvos dispostos na base.

No 123D Catch, deve-se fazer o *upload* das fotos, e toda a etapa de processamento (orientação externa, geração da malha triangular e texturização) é realizada automaticamente via *web* através dos servidores da Autodesk (Figura 110). Depois de alguns minutos, o modelo pode ser visualizado no computador do usuário.

Figura 110 - Seleção das fotos no 123DCatch para *upload* e processamento



Fonte: elaboração da autora.

As poucas possibilidades de intervenção do operador no 123D Catch estão associadas à definição da resolução da malha TIN do modelo, distribuídas em três níveis (*mobile*, *standard* e *maximum*, com valores crescentes de resolução), e a associação interativa de pontos homólogos nas fotografias, quando existirem erros e/ou quando for solicitado pelo operador.

6.1.2.2 Geração da "nuvem de pontos" densa¹²²

Depois de definidas a escala e a rotação do modelo do PhotoModeler Scanner, inicia-se a geração das "nuvens de pontos", a partir da definição de uma série de parâmetros.

Após vários testes, foram identificados os parâmetros mais adequados para a produção de "nuvens de pontos" mais densas e completas. Dentre os que tiveram maior influência para

¹²² Essa etapa não existe no 123D Catch.

além da densidade da malha (*Sampling interval*), da abrangência da "nuvem de pontos" (*Depth range*) e da inclusão de novas fotos¹²³, destacam-se:

- A extensão da foto (*Extents from*) deve ser, preferencialmente, a partir da delimitação da área de interesse (e não considerando toda a imagem), produzindo "nuvem de pontos" mais densa e com menos ruído.
- A área de busca¹²⁴ (*Matching region radius*) com valores maiores tendem a gerar "nuvens de pontos" mais densas e com menos ruído, principalmente quando as texturas apresentam um padrão com maiores dimensões. A desvantagem de valores elevados é o aumento no tempo de processamento, uma vez que os conjuntos de *pixels* a serem comparados são maiores.
- Valores mais baixos do tipo de textura (*Texture type*) também permitem gerar uma quantidade maior de pontos na "nuvem de pontos", com menos vazios, principalmente em texturas não repetitivas e de maiores dimensões.

Para facilitar a comparação de resultados em função de diferentes parâmetros é interessante a criação e utilização de *layers*, para melhor controle da visualização das "nuvens de pontos" geradas e sua associação às principais configurações utilizadas, como densidade, valores do tipo de textura e raio da área de busca.

6.1.2.3 Geração da malha triangular e operações de otimização da mesma

Depois da criação das diversas "nuvens de pontos"¹²⁵ pela escolha dos pares de fotografias já orientadas no PhotoModeler, partiu-se para a etapa de criação da malha triangular. Como a primeira malha tinha uma densidade elevada (931.676 triângulos), tornando bastante lenta a sua manipulação, decidiu-se realizar algumas operações sobre a mesma, como decimação, limpeza, suavização e preenchimento de vazios. Foi possível a criação de um modelo texturizado contemplando todos os trechos do vaso, conforme ilustrado na Figura 111.

¹²³ Informações descritas de modo detalhado no Apêndice A.

¹²⁴ Definição do conjunto de *pixels* a serem usados para comparação das feições homólogas nas várias fotografias.

¹²⁵ O PhotoModeler gera uma "nuvem de pontos" para cada par selecionado de fotografias. Geralmente, o modelo completo de um objeto é formado por várias "nuvens de pontos".

Figura 111 - Diversos ângulos do modelo do vaso em malha triangular texturizada



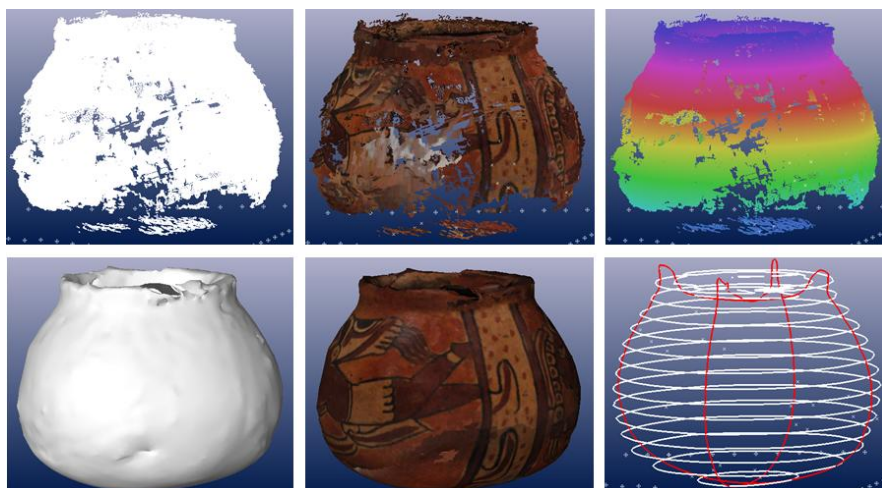
Fonte: elaboração da autora.

A obtenção da malha TIN é um processo totalmente automatizado no 123D Catch, bastando o operador realizar o *download* do arquivo. Depois, é possível realizar algumas operações, como: (1) seleção de trecho para maior refinamento¹²⁶ (maior densidade da malha); (2) limpeza da malha, apagando pontos desnecessários e, (3) determinação da escala do modelo.

6.1.3 Geração dos produtos e exportação dos arquivos

Foram verificadas as diferentes formas de representação do modelo no PhotoModeler Scanner (Figura 112): "nuvem de pontos" sem textura, com textura, com coloração em função das diferenças de altura, em malha triangular, em malha texturizada, com curvas de isovalor (em branco) ou com seções traçadas sobre o modelo (em vermelho).

Figura 112 - Diferentes possibilidades de representação do vaso cerâmico no PhotoModeler Scanner



Fonte: elaboração da autora.

No 123DCatch, é possível visualizar a malha TIN em *wireframe* ou com preenchimento das faces, não sendo possível realizar operações de otimização da malha como no PhotoModeler

¹²⁶ Esse trecho é enviado novamente aos servidores da Autodesk para novo processamento.

Scanner. Foram testados os três tipos de resolução da malha e feita uma comparação qualitativa/visual (Figura 113) e quantitativa, a partir dos tamanhos dos arquivos, da quantidade de triângulos e da resolução das texturas (Quadro 18). Verificou-se um aumento significativo na densidade da malha entre os tipos baixa e média, mas uma pequena diferença entre os tipos média e alta resolução¹²⁷, compatíveis com a variação nos tamanhos dos arquivos.

Figura 113 - Visualização em *wireframe* e com preenchimento das faces, nas resoluções baixa (imagens superiores) e média (imagens inferiores) do 123D Catch



Fonte: elaboração da autora.

Quadro 18 - Comparação de parâmetros da malha TIN do 123D Catch em três tipos de resolução

	BAIXA (Mobile)	MÉDIA (Standard)	ALTA (Maximum)
Densidade da malha (nº de triângulos)	25.969	152.950	159.585
Tamanho do arquivo da malha - OBJ (Mb)	1,81	11,1	11,6
Resolução do arquivo de textura (nº pixels)	4.096 x 4.096	4.096 x 4.096	8.192 x 8192
Tamanho do arquivo textura - JPG (Mb)	0,85	0,85	2,97

Fonte: elaboração da autora.

¹²⁷ Em experimentos realizados com outros objetos, além de não se observar melhoria significativa do modelo gerado na resolução mais alta, em alguns casos, o produto gerado apresentava erros grosseiros (com problemas na forma e/ou na textura aplicada), não presentes nas resoluções mais baixas. Nesse sentido, não se verificou vantagens em se utilizar a resolução mais alta do 123D Catch.

6.1.3.1 Testes de interoperabilidade para exportação dos arquivos

Depois de criados os modelos nas ferramentas PhotoModeler Scanner e 123D Catch, partiu-se para a exportação dos arquivos, onde foram testados os principais formatos, visando a importação dos arquivos nos programas Revit 2015, Rhinoceros 5 e Geomagic Studio 2012. A seguir, são listados os arquivos compatíveis entre os programas, partindo-se da exportação do PhotoModeler Scanner.

O PhotoModeler permite exportar o modelo geométrico para os seguintes formatos¹²⁸: DXF (2D ou 3D), 3DS, WRL, OBJ, TXT, IGS, 3DM, STL, MA, KML, KMZ, MS, CSV, LAS, FBX. Nesse experimento, o PhotoModeler apresentou problemas ao exportar para os formatos FBX e 3DS. Esses arquivos apresentaram mensagens de erro ao abrir e não puderam ser testados.

O Revit aceita os formatos LAS e OBJ¹²⁹ como "nuvem de pontos" texturizada e o DXF para a malha triangular sem textura. No entanto, só se obteve sucesso na importação direta do formato LAS, que é convertido automaticamente pelo Revit em RCP (formato do Recap). Os formatos OBJ e DXF tiveram de ser abertos nos programas Rhinoceros ou Geomagic Studio, e exportados novamente como DXF, para a importação no Revit. Não houve êxito na exportação do OBJ gerada pelo Rhino e Geomagic, pois esse formato continuou sem ser reconhecido pelo Revit.

O Geomagic Studio aceita os formatos DXF, STL, 3DS, OBJ e WRL, que permitem o registro de modelos em malha triangular. Apesar dos três últimos possibilitarem o registro de foto-textura, só foi possível visualizar o modelo texturizado com o formato WRL. Não foi identificado nenhum formato específico de "nuvem de pontos" do PhotoModeler compatível com o Geomagic Studio.

O Rhino permite abrir os formatos DXF, DWG, STL, IGS, 3DS, FBX, OBJ e WRL, sendo possível, nos quatro últimos, a inclusão da textura fotorrealística na malha triangular. Nos testes, foi

¹²⁸ Para cada formato, existem especificidades nos elementos que podem ser exportados. Por exemplo, o formato LAS, comum para "nuvem de pontos", só permite exportar pontos e "nuvens de pontos"; o OBJ e 3DM são um dos mais completos, permitindo exportar tudo, com exceção dos posicionamentos da câmera. O DXF permite exportar quase tudo, tendo a grande limitação de não permitir exportar as texturas.

¹²⁹ Apesar do formato OBJ não ser específico de "nuvem de pontos", essa opção está disponível na inserção de modelos do tipo "nuvem de pontos" no Revit (*link point cloud*). São criados pontos nos vértices dos triângulos da malha TIN. No entanto, em vários testes realizados, houve mensagem de erro ao se tentar importar arquivos no formato OBJ no Revit.

possível a importação de diversos arquivos com sucesso, com exceção¹³⁰ dos formatos STL, FBX e 3DS. Os formatos específicos de "nuvens de pontos" compatíveis entre o PhotoModeler e o Rhino são CSV e TXT, que foram importados no Rhino, sem a informação relativa à cor dos pontos.

Depois, foram testados os formatos para importação do modelo produzido no 123D Catch. A nova versão do 123D Catch (disponível a partir de julho de 2014) permite exportar o modelo em malha TIN apenas para os formatos DWG, FBX e OBJ, não sendo possível a exportação para um formato específico de "nuvens de pontos" (LAS), como acontecia nas versões anteriores.

Foram testados os três formatos de exportação do 123D Catch, não se obtendo êxito com o DWG, que não foi exportado pelo programa. Não foi possível a importação direta do formato OBJ no Revit. Foi necessário abrir o arquivo OBJ no Geomagic ou no Rhino e exportá-lo como DXF, tal como foi realizado com o PhotoModeler. O FBX além de ter quase o dobro do tamanho do OBJ, foi importado de modo adequado somente no Rhinoceros. Neste sentido, verificou-se que o formato OBJ é mais adequado, pois gera arquivos mais compactos e compatíveis com um maior número de programas.

Figura 114 - Resumo dos processos de conversão de formatos, para importação adequada de "nuvens de pontos" e malha TIN no Revit



Fonte: elaboração da autora.

A Figura 114 sumariza os formatos que apresentaram êxito na importação no Revit. Verifica-se que, na maioria dos casos, foi necessária a etapa intermediária de utilização do

¹³⁰ Os formatos FBX e 3DS não foram exportados corretamente pelo Photomodeler Scanner. O Rhino apresentou erro ao importar o format STL.

Rhinoceros ou Geomagic Studio para a conversão de formatos e leitura adequada no Revit. O único formato específico de "nuvem de pontos" compatível com o Revit e com texturização foi o LAS, produzido pelo PhotoModeler Scanner. Todos os outros formatos só permitem a importação no Revit da malha TIN sem textura. É interessante observar a incompatibilidade entre formatos de programas da própria Autodesk (123D Catch e Revit), tendo-se mais opções de interoperabilidade quando utilizado o PhotoModeler Scanner.

Pode-se verificar também a incompatibilidade entre o 123D Catch e o Autodesk Recap. Este último é mais adequado para "nuvens de pontos" geradas pela varredura a laser, incluindo formatos de diversos modelos de *laser scanners*, como da Leica, Faro, TopCon e Riegl. Além disso, o Recap permite importar os formatos LAS e TXT, gerados pelo PhotoModeler Scanner, mas não os da versão atual do 123D Catch.

6.1.4 Discussão

A partir dos experimentos, foi possível testar processos, verificar produtos e formatos de arquivos compatíveis com as aplicações desejadas.

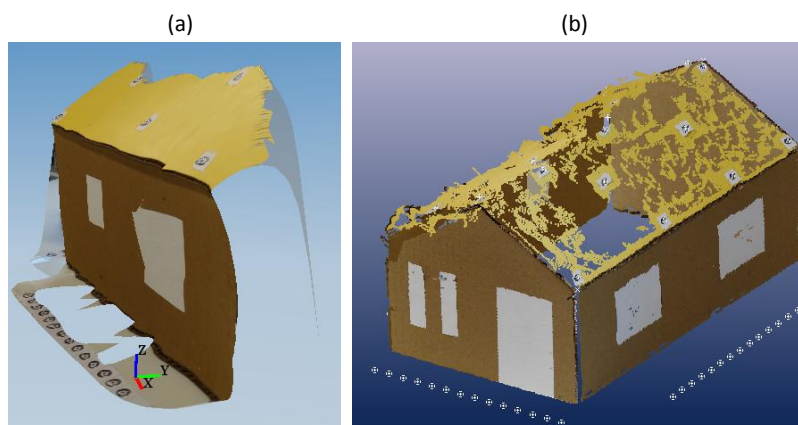
No experimento do vaso cerâmico, a malha triangular texturizada gerada nos programas PhotoModeler Scanner e 123D Catch apresentaram uma padrão semelhante de qualidade.

Verificou-se grandes diferenças de resultado quando há maior afastamento das estações na tomada fotográfica e maiores ângulos entre as mesmas. Isto se deve à possibilidade, no PhotoModeler Scanner, da intervenção do operador tanto na orientação das fotografias (selecionando e associando os pontos homólogos), como na etapa de geração de "nuvens de pontos", a partir da definição dos pares. O 123D Catch, ao contrário, realiza todo o processo de orientação de modo automatizado e faz a correlação das fotografias de modo contínuo, sem desconsiderar (ou seja, incluindo) as situações de maiores ângulos, que possuem grande diferenciação das feições registradas. Isso ocasiona erros que impedem a associação adequada das fotografias, gerando resultados insatisfatórios.

No experimento da maquete de papelão, houve diferença significativa dos produtos gerados nos dois programas (Figura 115). O 123D Catch só conseguiu orientar três fotografias das 12 inseridas, gerando um modelo parcial. Obteve-se sucesso no processamento semiautomático do PhotoModeler Scanner, com uso de alvos codificados para auxiliar a

etapa de orientação entre as fotografias. A cobertura foi o trecho com mais problemas na "nuvem de pontos", com menos densidade e mais ruído devido a maior homogeneidade da superfície. As regiões próximas aos alvos da cobertura permitiram registrar uma quantidade maior de pontos do que nas outras áreas da mesma.

Figura 115 - Maquete de papelão: (a) modelo parcial gerado no 123D Catch; (b) "nuvem de pontos" gerada no PhotoModeler Scanner no modo semiautomático



Fonte: elaboração da autora.

Com as mesmas 12 fotos da maquete de papelão, tentou-se também o processamento no modo mais automatizado (*Smart Project*) do PhotoModeler Scanner. Somente três fotografias foram orientadas, havendo muitos problemas nos pontos identificados¹³¹ (*smart points*).

Nesse último caso, não foi identificada vantagem do modo mais automático do PhotoModeler Scanner (*Smart Project*) em relação ao Autodesk 123D Catch. A automatização só se dá na etapa de identificação e associação das feições (*smart points*) para orientar as fotografias, demandando ainda bastante interação do usuário nas fases seguintes, de seleção dos pares de fotografias e determinação de vários parâmetros para geração das "nuvens de pontos" densas, para triangulação e para a realização de operações de otimização da malha.

Quando utilizadas fotos com pequena angulação entre as tomadas, com grandes áreas de sobreposição e boa cobertura do objeto, pode-se obter resultados satisfatórios em ambas as

¹³¹ Uma pequena quantidade dos pontos identificados foram usados na associação de feições entre as fotografias, para a obtenção da "nuvem de pontos" esparsa inicial.

ferramentas, com a vantagem de ser extremamente mais rápido e simples o processo no 123D Catch, além de já incluir a geração da malha TIN texturizada.

6.2 OBTENÇÃO DE PRODUTOS DERIVADOS DA "NUVEM DE PONTOS"

É descrito a seguir, o fluxo de trabalho adotado no *software* Geomagic Studio para a obtenção de um modelo NURBS de uma estátua (forma complexa) a partir de "nuvens de pontos" geradas por DSM.

Surgiu a necessidade do estudo e uso de um *software* específico para processamento de "nuvem de pontos", dadas as limitações da modelagem de formas irregulares no Revit. O Geomagic Studio é um dos programas para engenharia reversa mais difundidos e dotado de maiores recursos de processamento, incluindo a geração de superfícies NURBS e modelos paramétricos.

O fluxo de trabalho completo do Geomagic Studio pode ser resumido na Figura 116. Inicia-se com o modelo de "nuvem de pontos", que pode ser transformado em malha poligonal, em "superfície exata"¹³² (superfície NURBS), em "superfície paramétrica"¹³³, até a exportação para modelo CAD¹³⁴. Esse fluxo de trabalho pode ser interrompido em qualquer etapa, dependendo do tipo de modelo desejado.

Figura 116 - Síntese do fluxo de trabalho completo do Geomagic Studio



Fonte: elaboração da autora.

¹³² "Superfície exata" é o termo usado pelo Geomagic Studio para se referir a um grupo de operações envolvendo a geração de superfícies NURBS, tais como: detecção de contornos, criação dos retalhos (*patches*) e aplicação de malha entre os *patches*.

¹³³ "Superfícies paramétricas" se referem a um grupo de operações envolvendo a criação de um modelo composto por diversas regiões, onde cada uma está associada à geometria correspondente, por exemplo: plano, cilindro, esfera, objeto de extrusão, de revolução, etc.

¹³⁴ O termo "modelo CAD" é tratado pelo Geomagic Studio como o produto do processo de exportação (chamado de "troca paramétrica") da superfície paramétrica para uma ferramenta CAD escolhida na lista do programa. Durante a exportação, cada parte do objeto deve ser associada a um tipo de representação do modelo (sólido ou superfície) e a uma operação (criação, subtração, união, etc.). Esse modo, permite registrar o histórico de operações necessárias para geração do objeto, importantes para diversas áreas da Engenharia.

Apesar de cada etapa ilustrada na Figura 116 estar representada por um tipo de produto, (como "nuvem de pontos" ou malha poligonal), cada uma está relacionada a um conjunto de operações (processos) que podem ser realizadas para a transformação do modelo. A medida em que o modelo sofre transformações, aparecem novos grupos de operações que podem ser realizados a partir daquela fase (ver Apêndice B).

O processamento começa com as operações sobre a "nuvem de pontos", como limpeza, redução de ruído, ajuste e redução do número de pontos (*point sampling*). Depois disso, gera-se a malha poligonal (do tipo triangular irregular) e realiza-se outras operações como correção de erros, preenchimento de vazios, suavização, redução de ruídos, decimação da malha, visando preparar o modelo para as fases seguintes. Nessa etapa, pode-se iniciar o processo automático de criação de "superfície exata". Para isso, é necessário especificar o tipo de objeto, se é uma forma prismática ou orgânica. Pode-se utilizar os recursos de detecção de contorno, de edição e correção da segmentação das áreas realizadas pelo programa. Depois disso, são criados os *patches* (retalhos) que compõem o modelo, criadas as malhas em cada *patch* e finalmente gerada a superfície NURBS.

No caso de criação de modelos paramétricos, é necessário, ainda, classificar as regiões segmentadas de acordo com sua forma (como plano, cilindro, cone, esfera, forma extrudada, forma orgânica, dentre outros), sendo cada uma, representada por uma cor. Depois, é necessário classificar as conexões entre as superfícies, se são arestas vivas, abauladas ou formas livres. Ao final, é possível exportar o modelo paramétrico para o programa CAD desejado.

Utilizou-se o modelo de uma estátua (Figura 117), de geometria complexa, como objeto de testes de processamento no Geomagic Studio. Os experimentos visaram analisar os processos de trabalho e os produtos que podem ser obtidos no programa. A seguir, são descritas as etapas de geração da malha triangular no 123D Catch e de processamento no Geomagic Studio.

6.2.1 Geração da malha triangular

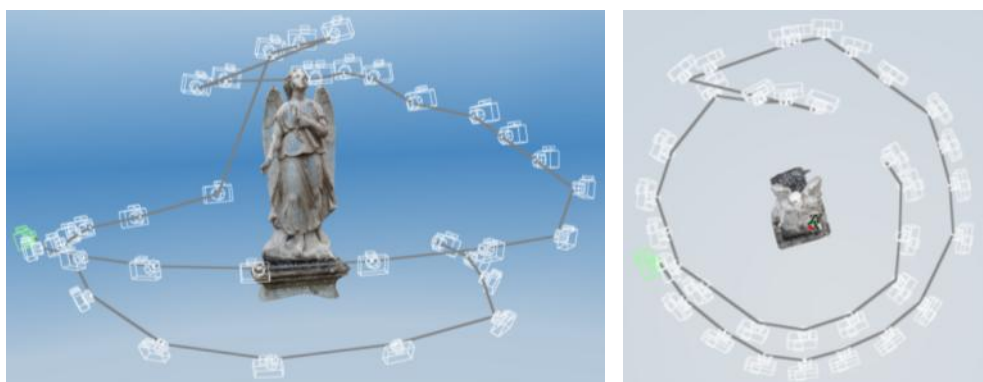
A escolha da ferramenta 123D Catch para geração da malha triangular da estátua se deu por alguns motivos:

- utilização de fotos com pequena angulação, grandes áreas de sobreposição e elevada diferenciação das feições (devido à complexidade da forma), que geralmente permitem bons resultados através de processos automatizados;
- grande rapidez para obtenção da malha triangular (superior ao PhotoModeler Scanner);
- compatibilidade do modelo gerado no 123D Catch (OBJ)¹³⁵ com o Geomagic Studio.

Nesse experimento, foram utilizadas 35 fotos (total de 139 MB) tomadas pela câmera Sony DSC-HX7V, resolução de 16,2 *megapixels* (4.608 x 3.456 *pixels*), distância focal de 4 mm, equivalente a 25 mm (grande angular) de uma câmera convencional de 35 mm.

O posicionamento das estações seguiu a regra descrita na seção 3.2.4, tendo o valor de R (B/L) de aproximadamente 0,2 e a angulação de 12 graus, permitindo a cobertura completa da estátua de diversos ângulos e grandes áreas de sobreposição (Figura 117).

Figura 117 - Posicionamento das estações em elevação e em vista superior



Fonte: elaboração da autora.

Após 14 minutos de *upload* e processamento no 123D Catch, foi gerado a primeira malha triangular, com a configuração de resolução mais baixa. Foi selecionado o trecho para o refinamento da malha que, após novo processamento, gerou um modelo completo e de elevada qualidade, como pode ser visto na Figura 118.

¹³⁵ Conforme tratado na seção 6.1.3.1, não há formato no PhotoModeler Scanner para exportação da "nuvem de pontos", compatível com o Geomagic Studio. Seria obrigatória a geração da malha TIN dentro do próprio PhotoModeler para exportação no formato OBJ, uma etapa que demanda tempo de processamento bem superior à produção somente de "nuvens de pontos".

Figura 118 - Malha triangular texturizada de uma estátua gerada no 123D Catch: (a) em diferentes ângulos com a visualização das faces; (b) em *wireframe*

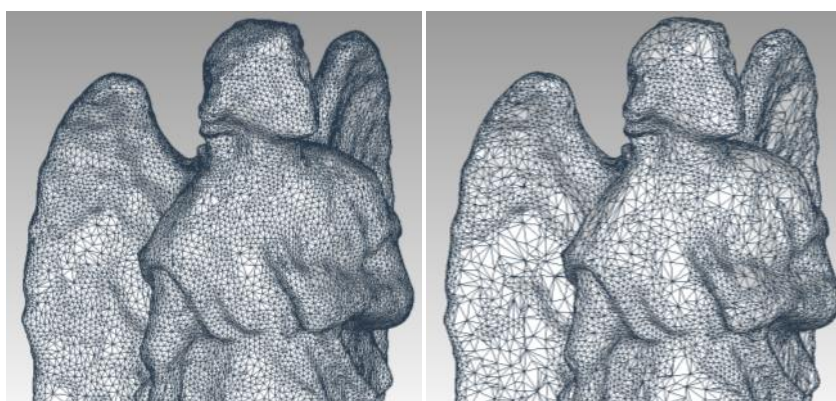


Fonte: elaboração da autora.

6.2.2 Processamento dos dados no Geomagic Studio

Exportou-se o modelo do 123D Catch para o formato OBJ¹³⁶. Assim que o arquivo foi aberto no Geomagic Studio, o programa apresentou o modelo junto a quantidade total de pontos (184.728 pontos, correspondentes aos vértices da malha triangular) e solicitou que fosse realizada a análise e reparação da malha através do *Mesh Doctor* (doutor da malha), processo automatizado para correção de erros, limpeza e preenchimento de vazios do modelo.

Figura 119 - Malha TIN antes e após o processo de decimação



Fonte: elaboração da autora.

Como o modelo gerado no 123D Catch já vem com malha triangular, a etapa de operações sobre a "nuvem de pontos" não foi realizada. Foi feita a decimação da malha (Figura 119)

¹³⁶ 13,5 Mb de arquivo OBJ mais 2,5 Mb de arquivo JPG contendo a textura.

para redução em 50% do número de triângulos, mas preservando as áreas de maior curvatura. Como o modelo não apresentava "buracos", não foi necessário o preenchimento de vazios.

Deu-se início ao processo de criação da superfície NURBS. Para isso, foram utilizados diversos comandos presentes na aba "Superfícies exatas" (Figura 120).

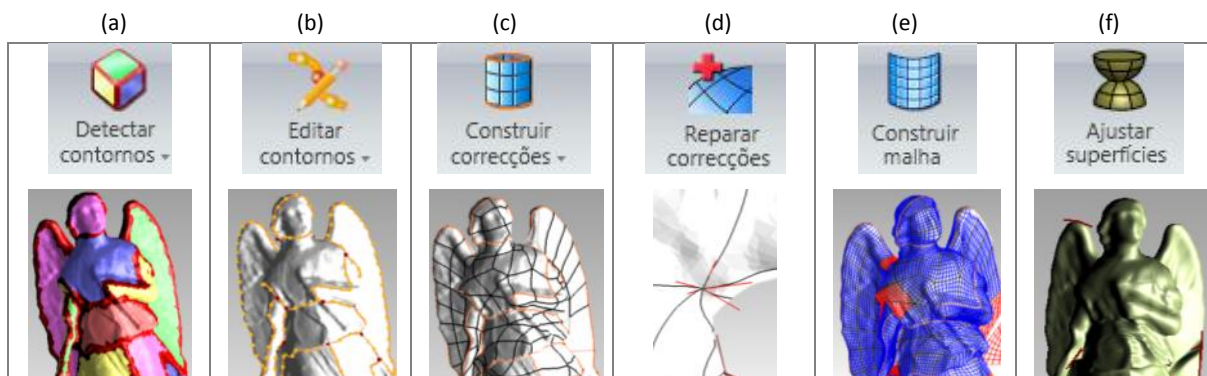
Figura 120 - Aba "Superfícies exatas" para criação de NURBS



Fonte: capturado da interface do Geomagic Studio 12.

Não foi utilizado o comando AutoSuperfície, que permite gerar o modelo NURBS com menor interação do usuário. As etapas foram realizadas separadamente, conforme a Figura 121.

Figura 121 - Sequência de comandos para a geração do modelo NURBS



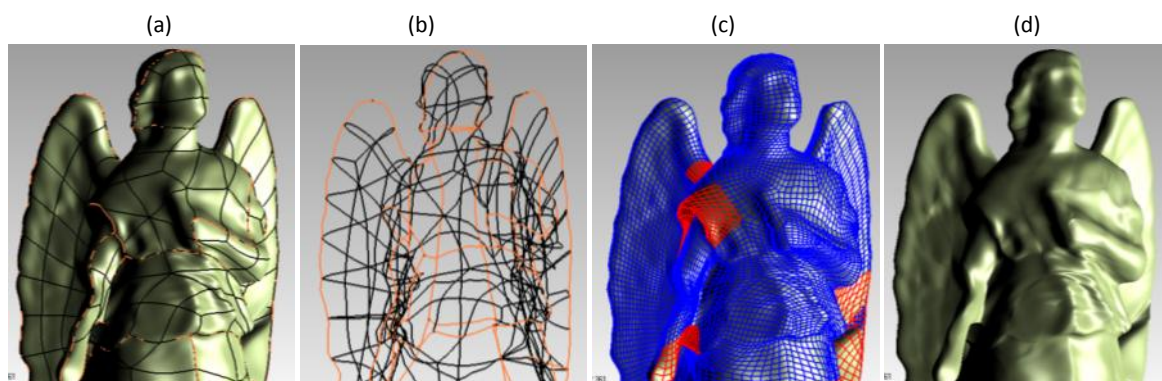
Fonte: elaboração da autora.

Depois de iniciar o processo de "Superfícies exatas", realizou-se a fase de detecção de contornos (comando "Detectar contornos", Figura 121a), para a divisão do modelo (em áreas) baseada nas diferenças de curvatura da superfície. As divisões (separadores na cor vermelha) podem ser modificadas a partir da alteração dos parâmetros ou, interativamente, a partir da seleção e edição das mesmas, criando ou eliminando áreas desejadas para melhor representação do objeto. Essas áreas foram usadas para a criação posterior dos contornos.

Depois de extraídos os contornos, realizou-se a edição ("Editar contornos", Figura 121b), para melhor ajuste no modelo. A etapa seguinte foi a criação dos retalhos ou *patches* ("Construir correções") sobre as linhas de contorno já definidas.

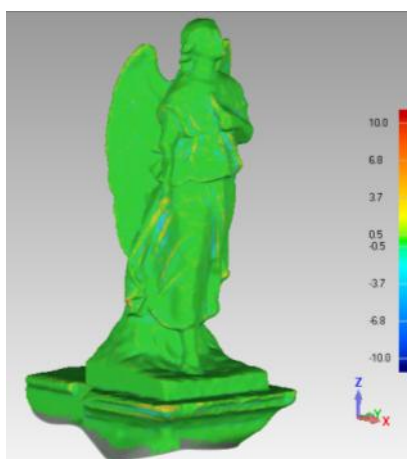
Quando são detectados problemas, há um alerta do programa solicitando reparar os retalhos ("Reparar correções", Figura 121d). A etapa seguinte consistiu na geração da malha entre os *patches*, para depois gerar finalmente o modelo NURBS ("Ajustar superfícies", Figura 121f). A Figura 122 ilustra o modelo NURBS visualizado de diferentes maneiras.

Figura 122 - Diferentes formas de visualizar o modelo NURBS: (a) faces, contornos e *patches*; (b) contornos e *patches*; (c) malha; (d) faces



Fonte: elaboração da autora.

Figura 123 - Análise da precisão do modelo NURBS gerado



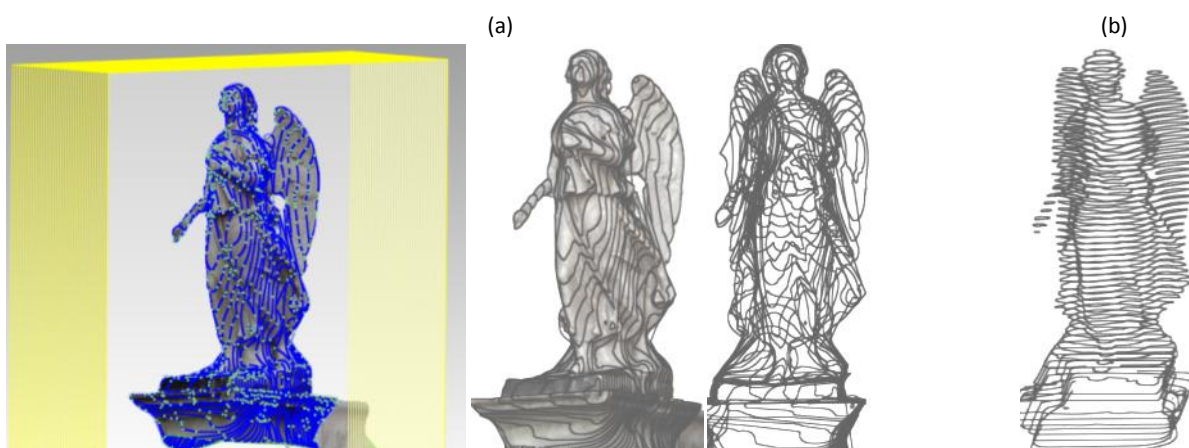
Fonte: elaboração da autora.

Após a criação do modelo NURBS foi realizada a análise de precisão, a partir da comparação do modelo NURBS e da malha TIN original (produzida no 123D Catch), com uso de diferentes cores e legenda para mostrar os desvios em milímetros (Figura 123). Verificou-se que o modelo gerado estava bem próximo da malha original, uma vez que a cor verde era predominante. Essa cor indicava as áreas da superfície NURBS que estavam dentro dos

valores de desvios aceitáveis, nesse caso, com valores de tolerância de $\pm 0,5$ mm. Somente pequenos trechos estavam representados com as cores amarelo e azul, indicando desvios de aproximadamente 3 mm.

Além do modelo NURBS, foram realizados testes para geração de outros produtos, como seções transversais e longitudinais. Essas seções foram geradas a partir do fatiamento do objeto¹³⁷ realizado por diferentes planos (horizontais e verticais) definidos pelo operador (Figura 124). Essa operação é realizada de modo rápido e automatizado pelo Geomagic, permitindo gerar um produto interessante, que pode ser utilizado para representação bidimensional de objetos complexos (através de curvas de isovalor), ou como base para a modelagem geométrica em outros programas.

Figura 124 - Fatiamento do modelo para geração de curvas de isovalor (a) seções verticais; (b) seções horizontais



Fonte: elaboração da autora.

6.2.3 Discussão

Os experimentos realizados permitiram sistematizar operações para processamento de "nuvens de pontos", analisar processos adotados e resultados obtidos. Dentre os aspectos observados, destacam-se as questões relacionadas a: (1) quantidade de pontos necessária para representação da forma; (2) tempo de processamento; (3) interoperabilidade de formatos; (4) tamanhos de arquivos; (4) custo e aprendizagem da tecnologia.

A quantidade de pontos necessária está relacionada diretamente à forma/dimensões do objeto e à finalidade do modelo. A decimação é necessária em muitos casos, visando reduzir

¹³⁷ Essa operação pode ser realizada diretamente sobre a malha triangular ou sobre o modelo NURBS.

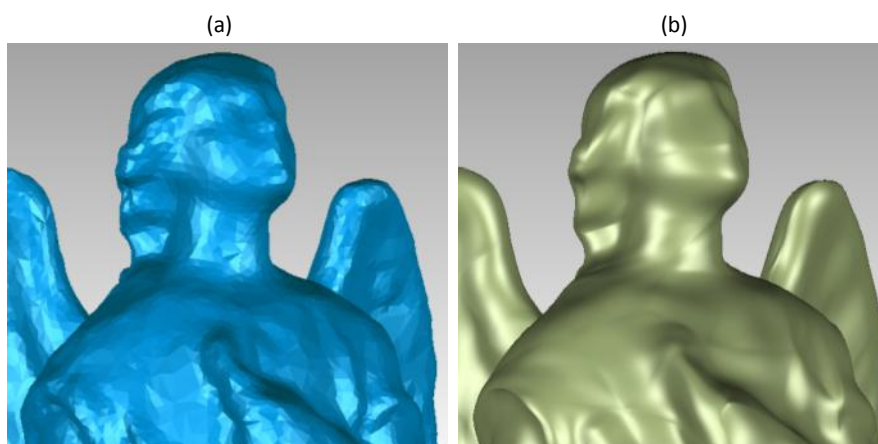
o tamanho dos arquivos e facilitar sua manipulação. Entretanto, deve ser realizada com cuidado, de modo a evitar perda excessiva de informações nos trechos de maior curvatura.

Um método que permite facilitar a comparação dos produtos gerados (em termos de qualidade/precisão e tamanhos dos arquivos) é criação de várias versões dos arquivos, identificando nos nomes dos mesmos, as operações realizadas ou os parâmetros utilizados.

As operações de decimação da malha e geração das seções foram realizadas com pouco tempo de interação humana e de processamento. Isso foi possível dada a elevada qualidade da malha TIN original, sem vazios e sem ruídos. Assim, várias etapas de edição da malha não foram necessárias.

A criação da superfície NURBS demandou um tempo de processamento (com grande interação humana) significativamente superior às operações descritas anteriormente sobre a malha TIN, mas permitiu uma maior suavização da forma, como pode ser visto na Figura 125.

Figura 125 - Detalhe da estátua processada no Geomagic Studio: (a) malha TIN; (b) superfície NURBS



Fonte: elaboração da autora.

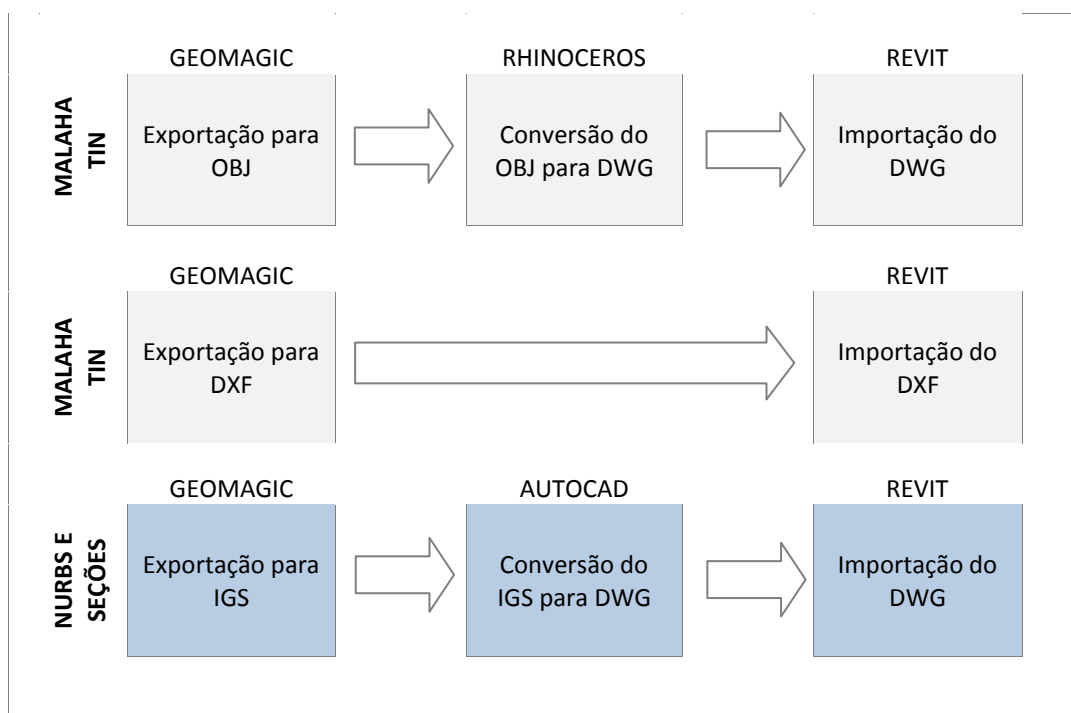
Foram testados diversos formatos de exportação dos modelos gerados no Geomagic Studio, visando a importação no Revit. Dois formatos tiveram destaque, pela maior compatibilidade entre programas, evitando-se perda de informações e tamanhos elevados de arquivos.

O formato mais adequado para exportação do modelo NURBS e das seções foi o IGS¹³⁸. Os arquivos IGS tinham de ser importados no AutoCAD para conversão para o DWG e posterior

¹³⁸ Apesar de ser possível a exportação do modelo NURBS para os formatos DXF e SAT, que poderiam ser importados diretamente pelo Revit, foram verificados alguns inconvenientes. O tamanho do arquivo DXF do modelo NURBS é aproximadamente 100 vezes superior ao IGS. Com relação ao SAT, houve erro na exportação e nenhum arquivo foi criado.

importação no Revit. Com relação à malha TIN, o processo de conversão mais adequado foi a exportação do Geomagic Studio para o formato OBJ, depois a importação no Rhino para gerar o DWG. Outro formato testado foi o DXF para exportação da malha TIN. Apesar do aumento significativo no tamanho do arquivo, esse formato permitiu a importação direta no Revit, sem uso de programa intermediário. Uma síntese dos processos de conversão de formatos está ilustrada na Figura 126.

Figura 126 - Processos para conversão de formatos visando a importação de malha TIN (em cinza), superfície NURBS e seções (em azul) no Revit



Fonte: elaboração da autora.

A comparação entre os diferentes formatos e tamanhos de arquivos é apresentada no Quadro 19. Verifica-se que houve uma redução significativa e gradativa nos tamanhos arquivos, comparando a malha TIN original (em OBJ, gerada no 123D Catch), a malha TIN (em OBJ) após a decimação no Geomagic Studio e a superfície NURBS (em IGS).

Quadro 19 - Diferentes formatos e tamanhos dos arquivos

Malha TIN original (OBJ)	Malha TIN (OBJ)	Malha TIN (DXF)	Superfície NURBS (IGS)
13,5 Mb	6,08 Mb	21,1Mb	2,81 Mb

Fonte: elaboração da autora.

Apesar das vantagens encontradas no modelo NURBS (redução no tamanho arquivo e o aspecto contínuo e suave da superfície), é importante destacar que, além do maior tempo de processamento, foi necessária a utilização de um programa para engenharia reversa, de custo elevado, e com muito mais recursos do que os programas livres para manipulação de malhas poligonais (como o Meshlab). Além do custo, o aprendizado do Geomagic Studio requer mais tempo, em função da grande quantidade de operações existentes no programa.

O estudo apresentado nessa seção será aplicado no capítulo 7, na representação de formas complexas da Capela de Nossa Senhora da Escada no Revit. A seguir, são apresentados alguns estudos realizados sobre modelagem BIM, com base em modelos gerados por fotografias.

6.3 MODELAGEM BIM ATRAVÉS DE DIFERENTES MODELOS DE REFERÊNCIA

Nesse experimento, foram realizados testes de modelagem BIM no prédio da antiga Diretoria da FAUFBA ("Casa Rosa") tomando-se como referência dois tipos de modelos: "nuvem de pontos" gerada por fotografias (DSM) e modelo de superfície obtido por Fotogrametria Digital - *stricto sensu* (GUIMARÃES; GROETELAARS; AMORIM, 2012; BRITO; GROETELAARS; AMORIM, 2012).

São descritas a seguir, as etapas de geração dos modelos de referência e de modelagem BIM, com cada um dos modelos.

6.3.1 Geração dos modelos de referência para modelagem BIM

Foi feita a tomada fotográfica do exterior da edificação visando sua utilização para os dois tipos de modelos a serem produzidos: o de "nuvem de pontos" (no 123D Catch¹³⁹) e o de superfícies (no PhotoModeler), sendo necessário, no segundo caso, um número muito menor de fotografias.

As fotos foram tiradas com a câmera Nikon D300¹⁴⁰ em curto intervalo de tempo (cerca de 10 minutos), para evitar diferenças de iluminação e de sombreamento dos objetos fotografados nas várias imagens. Ao total, foram capturadas 189 fotos. A distância entre as estações (B)

¹³⁹ A ferramenta 123D Catch foi escolhida devido à rapidez e automatização no processo de geração da malha TIN, muito superiores ao do PhotoModeler, conforme já discutido anteriormente.

¹⁴⁰ Câmera com resolução máxima de 4.288 x 2.848 *pixels*, e objetiva de distância focal nominal de 12 mm.

foi de aproximadamente um metro, enquanto que a distância até a edificação (L), ficou em torno dos quatro metros, obtendo-se o valor médio de $R (B/L)$ da ordem de 0,25.

Foram medidos alguns comprimentos na fachada para permitir, posteriormente, a determinação da escala do modelo, bem como avaliar a sua precisão.

6.3.1.1 Geração da "nuvem de pontos" por DSM

Para o processamento no 123D Catch (versão utilizada em 2012¹⁴¹), as fotos foram separadas em quatro conjuntos (com sobreposições entre eles), para a criação de modelos parciais de "nuvem de pontos" (Figura 127), uma vez que a versão usada só permitia o *upload* de no máximo 70 fotos por vez.

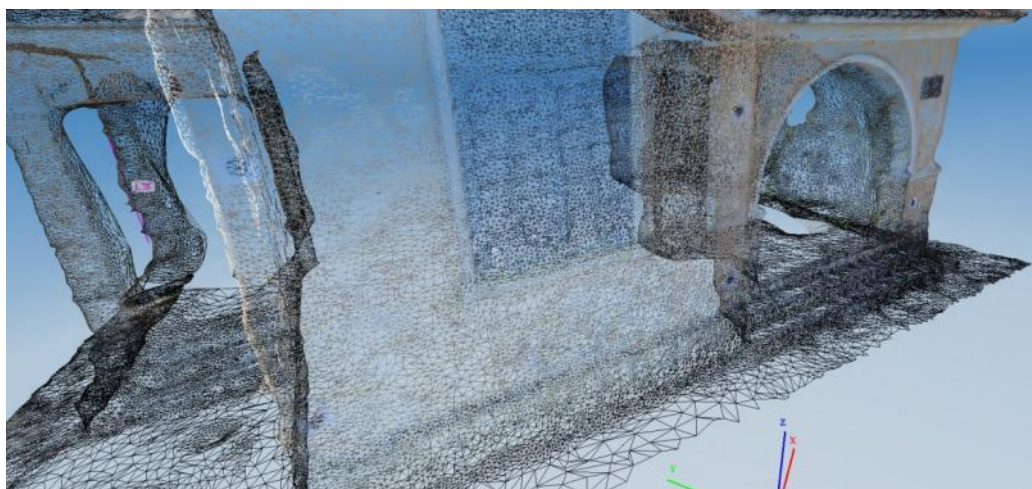
Figura 127 - Modelos parciais da "Casa Rosa" gerados no 123D Catch



Fonte: Brito, Groetelaars e Amorim (2012).

¹⁴¹ A versão utilizada em 2012 permitia a exportação da "nuvem de pontos" no formato LAS. Dessa forma, foi possível importar no Revit o modelo do tipo "nuvem de pontos" (e não malha TIN), junto ao atributo "cor do ponto", facilitando a identificação das feições. Em 2014, houve uma atualização do 123D Catch, que passou a não permitir mais a exportação para o formato LAS.

Figura 128 - Detalhe da malha triangular gerada no 123D Catch



Fonte: Brito, Groetelaars e Amorim (2012).

Posteriormente, houve a necessidade de retorno ao campo para se obter mais medidas, visando a atribuição da escala real (1:1) para cada um dos quatro modelos, separadamente. Em seguida, os modelos foram exportados para o formato LAS e importados no Revit Architecture, no qual foram registrados¹⁴². A união desses modelos foi realizada manualmente, tomando como base feições naturais da edificação (como arestas de paredes, janelas e portas), formando o modelo de "nuvem de pontos" final da "Casa Rosa" (Figura 129).

Figura 129 - Modelo de "nuvem de pontos" da "Casa Rosa" registrado no Revit Architecture



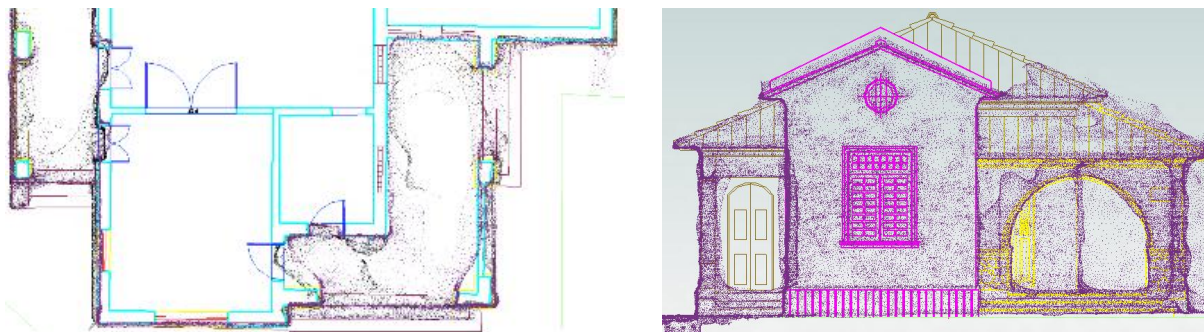
Fonte: Brito, Groetelaars e Amorim (2012).

Verificou-se no Revit que a distância média entre os pontos era de aproximadamente 2 cm, em locais mais fotografados (paredes externas), porém esse valor aumentava em locais com

¹⁴² Ou seja, os modelos parciais das "nuvens de pontos" foram alinhados para um mesmo sistema de coordenadas.

poucas informações para a geração do modelo (em torno de 5 cm). Para analisar a precisão do modelo, o mesmo foi comparado com um levantamento cadastral realizado anteriormente (Figura 130).

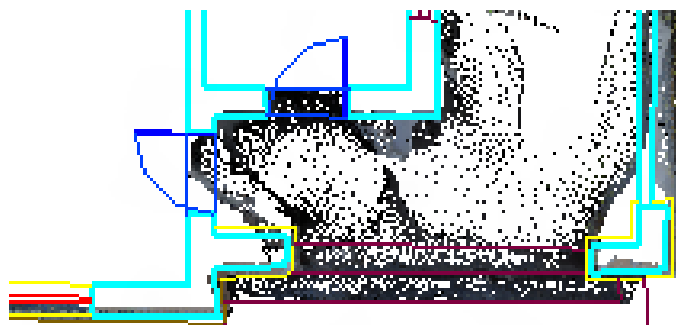
Figura 130 - Comparação da planta baixa e fachada (medição direta) com a "nuvem de pontos"



Fonte: Brito, Groetelaars e Amorim (2012).

Foi possível perceber que a diferença entre a "nuvem de pontos" e os desenhos produzidos por medição direta foi menor nas regiões mais fotografadas (paredes externas e janelas), em média, 4 a 5 cm. Nas regiões com texturas mais uniformes (janelas abertas ou paredes com pintura mais homogênea) ou com menor quantidade de fotos (como nas paredes voltadas para as varandas, Figura 131), a diferença entre os métodos de levantamento foi significativamente maior. Devido à dificuldade de se fotografar as partes elevadas da edificação, a cobertura não pôde ser devidamente registrada, o que provocou, conseqüentemente, a falta de informação do telhado no modelo de "nuvem de pontos".

Figura 131 - Trecho com maior diferença entre "nuvem de pontos" e cadastro por medição direta



Fonte: Brito, Groetelaars e Amorim (2012).

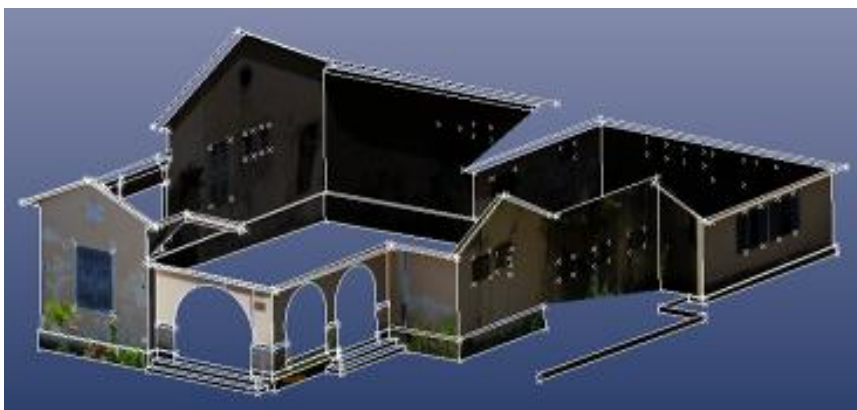
6.3.1.2 Geração do modelo de superfícies fotorrealístico por Fotogrametria Digital

Para a obtenção do modelo de superfícies texturizado, foi utilizado o programa PhotoModeler Scanner 2012 e adotado o método de restituição fotogramétrica digital a partir de fotografias convergentes.

Foram inseridas no PhotoModeler as fotografias mais ortogonais a cada plano de fachada bem como as fotos oblíquas com angulações próximas a 45 graus, de modo a permitir uma maior precisão dos resultados, conforme descrito em Groetelaars (2004).

Após inserção das fotos, foi utilizado um arquivo de calibração já existente da câmera Nikon D300. O processamento iniciou-se com a identificação de pontos homólogos entre as fotografias para reconstrução do posicionamento das estações, etapa denominada de orientação externa relativa. Depois foi determinada a rotação (eixos x, y e z) e a escala do modelo, com base em dimensão obtida em campo, concluindo a etapa de orientação externa absoluta. Depois das fotografias devidamente orientadas, pôde-se visualizar o modelo geométrico 3D em *wireframe* gerado pelo programa. A partir da determinação das superfícies que formam o modelo e a aplicação das texturas extraídas das fotos, foi possível obter o modelo fotorrealístico parcial da edificação (Figura 132).

Figura 132 - Modelo de superfície parcial da "Casa Rosa" criado no PhotoModeler



Fonte: Guimarães, Groetelaars e Amorim (2012).

6.3.2 Modelagem BIM

Em seguida, foram realizados os testes de modelagem BIM no Revit Architecture 2012, tomando-se, como referência, primeiramente a "nuvem de pontos", e depois o modelo de superfícies.

6.3.2.1 Uso da "nuvem de pontos" como referência

Nos primeiros testes, utilizou-se a "nuvem de pontos" apenas como referência para a modelagem (sem o *plugin*). Dada à maior dificuldade e morosidade desse processo¹⁴³, foi

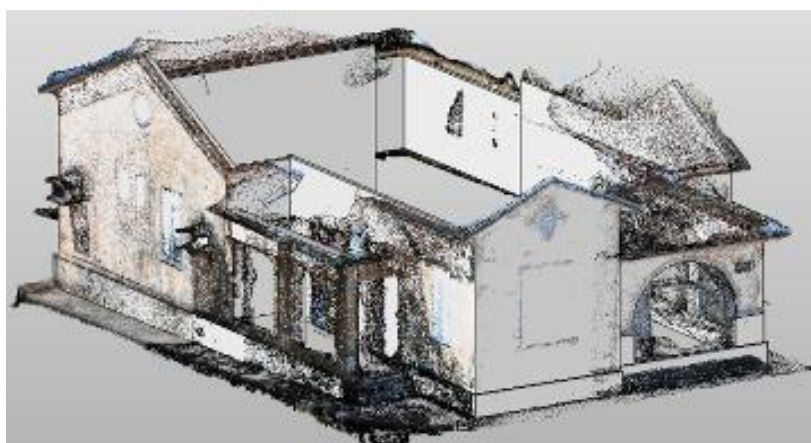
¹⁴³ No processo sem o uso do *plugin*, a "nuvem de pontos" deve ser visualizada em vistas ortogonais, como plantas baixas e cortes, para permitir a identificação dos contornos a serem usados como referência para modelagem interativa.

utilizado o *plugin* Scan to BIM 2012 (Imaginit Technologies) visando automatizar diversas etapas da modelagem a partir da "nuvem de pontos".

O Scan to BIM permitiu selecionar trechos da "nuvem de pontos" (da parte externa da edificação, visualizada em perspectiva) e associá-los a elementos construtivos da biblioteca de famílias do Revit, automatizando o processo da modelagem paramétrica. Para a criação do elemento parede por exemplo, foi necessário selecionar três pontos no modelo de "nuvem de pontos" (pertencentes a um plano) para a obtenção de uma superfície a ser associada ao elemento "parede" do Revit. Posteriormente, foi necessário realizar alguns ajustes (interativos) para correção dos limites das paredes.

A Figura 133 ilustra o modelo BIM gerado a partir da "nuvem de pontos", com uso do *plugin* Scan to BIM. Dentre as principais dificuldades encontradas nesse experimento, destacam-se a grande quantidade de ruídos e de vazios (trechos sem informações) e a baixa densidade da "nuvem de pontos", o que impossibilitou a modelagem dos detalhes da edificação. Esses problemas foram decorrentes, principalmente, da presença de obstáculos e de trechos pouco (ou não) fotografados. Além disso, não foi possível modelar os pisos, as paredes internas, nem a cobertura, já que as fotografias foram tomadas apenas do exterior da edificação, na altura de aproximadamente 1,70 m.

Figura 133 - Modelo parcial da "Casa Rosa" criado no Revit a partir da "nuvem de pontos"



Fonte: Guimarães, Groetelaars e Amorim (2012).

6.3.2.2 Uso do modelo de superfícies como referência

Posteriormente, foi realizada a modelagem BIM a partir do modelo geométrico de superfícies. Este processo foi mais demorado, já que não foi possível a associação direta das

superfícies a um elemento construtivo do Revit¹⁴⁴, como no método anterior. Foi feita a modelagem de cada parede, utilizando os limites definidos pelo modelo de superfícies. Assim como no modelo a partir de "nuvem de pontos", não foi possível realizar a modelagem do telhado da edificação.

Apesar desse processo ter requerido mais tempo do usuário, o modelo de superfícies gerado pela Fotogrametria Digital (*stricto sensu*) permitiu uma modelagem mais precisa (mais próxima da realidade), possibilitando melhor definição dos limites da edificação e dos detalhes. Foi possível a modelagem paramétrica dos detalhes (Figura 134b), tomando-se como base as superfícies geradas pela restituição fotogramétrica.

Figura 134 - Modelo parcial da edificação gerado no Revit, a partir do modelo de superfícies do PhotoModeler:
(a) sobreposição do modelo BIM com o de superfícies; (b) detalhe de um ornamento modelado



Fonte: Guimarães, Groetelaars e Amorim (2012).

Figura 135 - Aplicação de textura no elemento "parede" do Revit, utilizando a ortofoto correspondente



Fonte: Guimarães, Groetelaars e Amorim (2012).

A modelagem a partir de superfícies permitiu ainda a aplicação de textura fotorrealística como material de acabamento externo de um elemento "parede" do Revit, utilizando a ortofoto da fachada principal gerada pela Fotogrametria Digital (Figura 135).

¹⁴⁴ Quando utilizado o modo de criação de paredes por faces, geravam-se diversas paredes no formato triangular, uma vez que o processo de geração das superfícies no PhotoModeler é através da triangulação das faces (Figura 134a).

6.3.3 Discussão

Ao final dos experimentos foi possível comparar as duas técnicas aqui apresentadas. A criação de modelos BIM a partir de "nuvem de pontos", utilizando a técnica *Dense Stereo Matching* (DSM), apresentou grandes vantagens com relação à etapa de levantamento dos dados geométricos, devido à rapidez na aquisição da malha TIN no 123D Catch.

Apesar do *plugin* do Revit permitir acelerar o processo de modelagem dos elementos construtivos paramétricos, foram identificadas algumas limitações do modelo de "nuvens de pontos" utilizado. O principal problema refere-se à dificuldade de identificação das feições e contornos (arestas) dos objetos, principalmente devido à baixa densidade dos pontos do modelo gerado por DSM.

Vale destacar que a baixa densidade da "nuvem de pontos" gerada foi decorrente tanto das limitações do programa utilizado (123D Catch), que não permitiu definir com precisão o nível de detalhamento do modelo gerado (ou seja, o valor exato de afastamento entre os pontos), quanto da não utilização de fotos tomadas mais próximas (maior resolução) de determinados detalhes.

Com relação à criação do modelo BIM a partir do modelo de superfícies, as maiores desvantagens referem-se à fase de aquisição dos dados (geração do modelo de superfícies). A restituição fotogramétrica no PhotoModeler é lenta, requerendo bastante tempo do usuário para identificação (interativa) dos pontos homólogos das feições de interesse nas diversas fotos, e para a criação das superfícies dos objetos.

A grande vantagem desta técnica foi na etapa da modelagem BIM. O modelo de superfícies permitiu maior precisão do modelo BIM gerado, uma vez que a modelagem se baseou nos contornos dos objetos definidos na etapa de restituição digital no PhotoModeler. No entanto, foi necessário realizar nova modelagem sobre o produto fotogramétrico importado, já que o Revit não permitiu a associação (direta) das superfícies a componentes construtivos de sua biblioteca. Esta técnica ofereceu, ainda, a possibilidade de utilização de textura fotorrealística, aplicando-se as ortofotos (geradas no PhotoModeler) sobre o modelo BIM.

Comparando-se os modelos de superfície e "nuvem de pontos", o primeiro apresentou maior precisão, com definição clara das arestas dos objetos. A partir da análise dos

processos e produtos, verifica-se que a utilização da Fotogrametria Digital (*stricto sensu*) é mais adequada para levantamentos do exterior de edificações em escalas maiores e com formas mais poliédricas (como a "Casa Rosa"), independentemente do tipo de textura existente. A utilização do DSM "nuvem de pontos" é mais adequada para cadastros do exterior de edifícios em escalas menores, com menor rigor da precisão dos resultados, em situações em que a rapidez¹⁴⁵ para obtenção dos dados é mais relevante.

Vale ressaltar que essa situação inverte-se em casos de grande complexidade ou irregularidade dos elementos construtivos, em que a utilização da técnica DSM apresenta grandes vantagens, não só pela rapidez na aquisição dos dados, como na precisão dos resultados obtidos, considerando-se a utilização de fotografias tomadas próximas aos objetos, em alta resolução e com grandes áreas de sobreposição.

6.4 AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA MODELAGEM DE FORMAS MAIS COMPLEXAS NO REVIT

Foram realizados diversos testes no Revit, visando a análise das ferramentas de modelagem para formas mais complexas e irregulares. Essa é uma questão que tem sido objeto de críticas de uma série de autores, que tratam das limitações das ferramentas BIM para a modelagem de formas mais complexas, como paredes irregulares.

Para avaliação inicial dos recursos de modelagem do Revit, adotou-se o elemento "parede". Foram experimentados diferentes métodos de modelagem visando a avaliação das potencialidades, limitações e adequação à representação de diversos tipos de paredes, sendo divididos em quatro grupos:

- inserção de paredes de famílias de sistema e verificação de suas possibilidades de edição;
- comandos presentes na opção "*Model In-Place*" (modelagem no local) para criação de componentes da categoria *wall*;
- comandos do modo "*Conceptual Massing*" para a criação de modelos de massa conceitual e posterior associação ao elemento parede (*Wall by Face*);

¹⁴⁵ É importante ressaltar que a rapidez na obtenção dos resultados está intimamente relacionada com a ferramenta utilizada. Nesse caso, em que foi utilizado o 123D Catch, o processo de obtenção da "nuvem de pontos" foi totalmente automatizado.

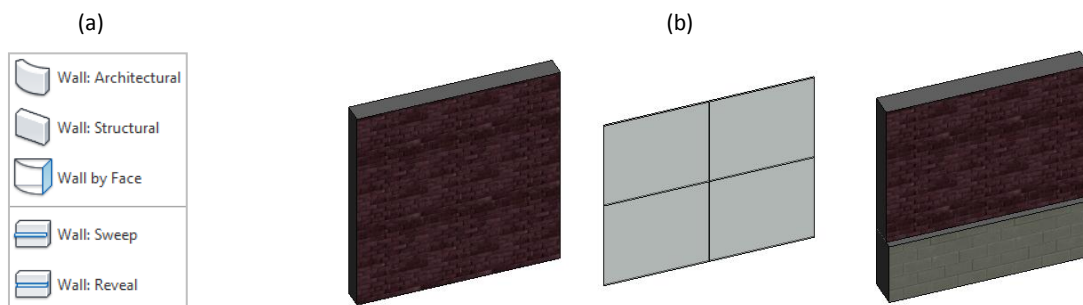
- importação de modelos geométricos criados em outros programas.

Apesar do foco da abordagem estar relacionada às paredes, vários métodos de modelagem experimentados e relatados podem ser usados para diversos tipos de elementos construtivos, principalmente relacionados aos três últimos tópicos listados anteriormente.

6.4.1 Comandos típicos para criação de paredes

Os comandos para inserção de paredes de famílias de sistema estão disponíveis no painel *Architecture*, no comando *Wall* (Figura 136a). Após a seleção dos tipos *Wall Architectural* ou *Structural*, deve-se escolher uma família pré-definida no Revit ou já editada pelo usuário. Existem três tipos de sistemas de famílias de paredes (Figura 136b): *Basic wall* (paredes básicas), *Curtain wall* (cortinas de vidro ou divisórias) e *Stacked Wall* (paredes compostas, que permitem incluir mais de um tipo de parede).

Figura 136 - (a) Comandos típicos para criação de paredes; (b) tipos de paredes: básicas, cortinas de vidro e compostas

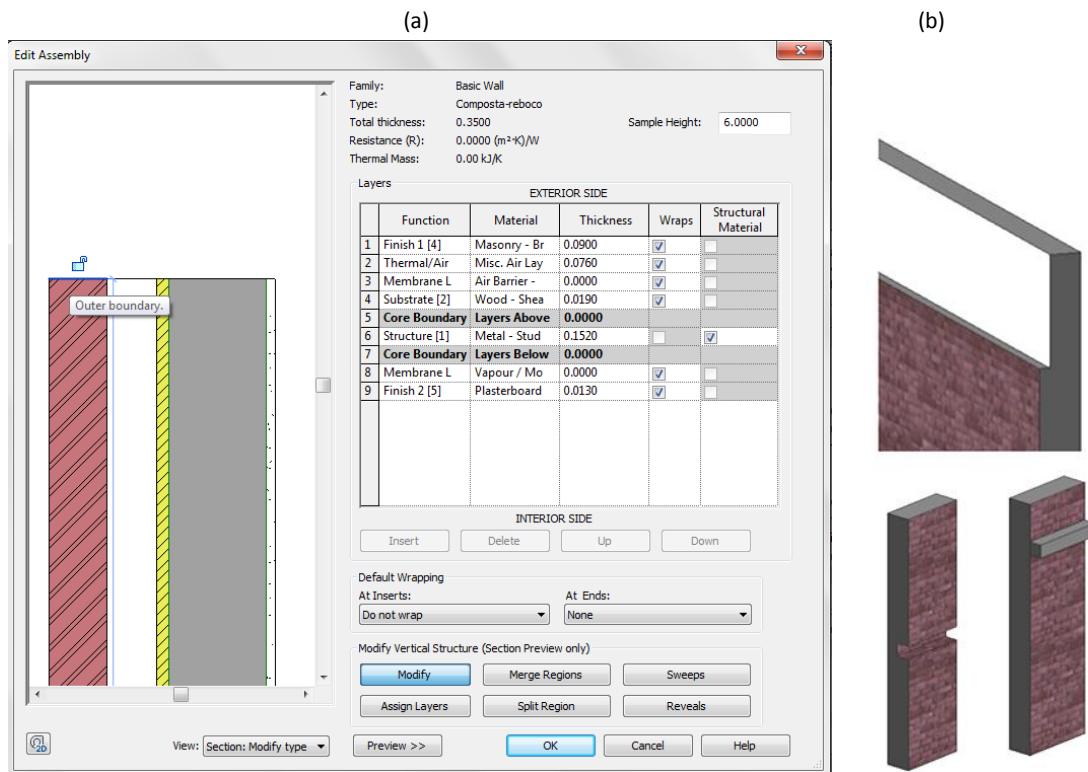


Fonte: elaboração da autora.

O usuário pode editar uma família de parede pré-definida pelo programa e especificar suas camadas, tanto os materiais como suas espessuras. Existem algumas possibilidades de edição, como desbloquear uma ou mais camadas para ter o controle individual da altura de cada camada ou adicionar ressaltos e/ou rebaixos na parede através dos botões *Sweeps* ou *Reveals*, conforme pode ser visto na janela *Edit Assembly* (Figura 137).

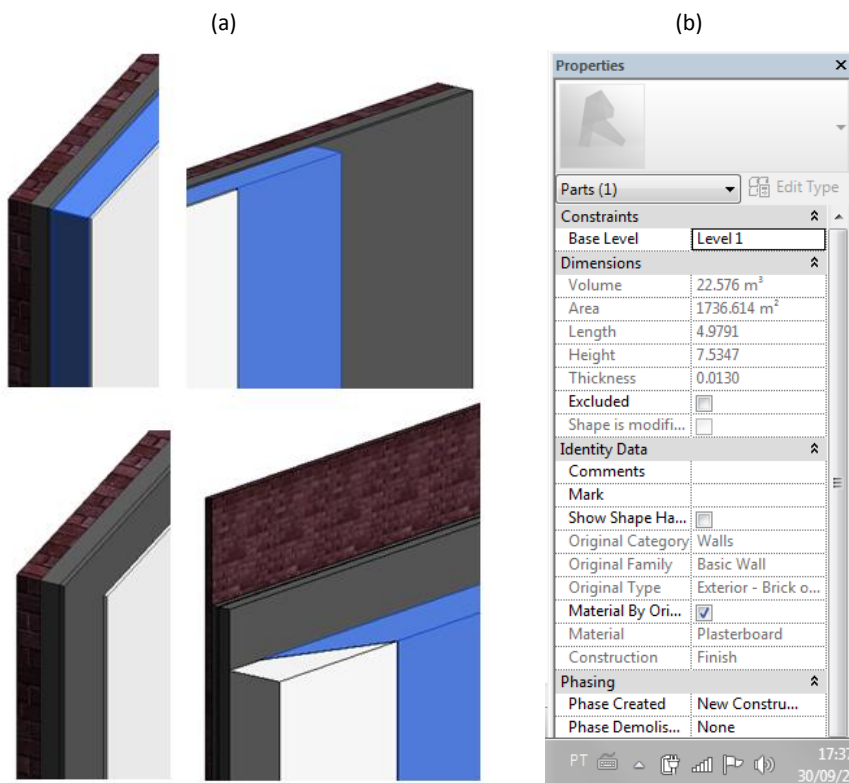
A possibilidade de inclusão de ressaltos ou rebaixos na parede pode ser feita, também, através dos comandos *Wall Sweep* e *Wall Reveal* (Figura 136a).

Figura 137 - (a) Janela de edição das camadas da parede; (b) alteração na altura da camada de tijolinho (imagem superior) e inclusão de rebaxos e ressaltos na parede (imagens inferiores)



Fonte: elaboração da autora.

Figura 138 - (a) Diferentes possibilidades de alteração das camadas de uma parede desmembrada; (b) caixa de propriedades de cada camada (part) da parede

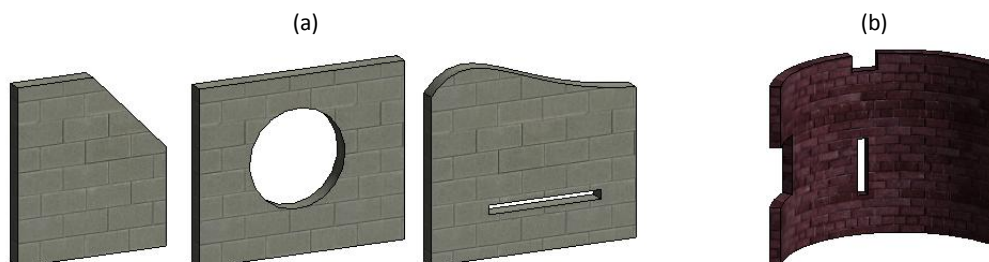


Fonte: elaboração da autora.

Outra forma de se ter controle separado das camadas é através do comando *Create Parts*, que permite desmembrar as diversas partes constituintes das paredes (Figura 138). Ampliam-se as possibilidades de edição em relação à forma anterior, de edição da seção. Depois do desmembramento, pode-se editar a altura, a espessura e o comprimento de cada camada, pode-se apagar ou dividir cada uma, ou ainda, restaurar a forma original. Na "caixa de propriedades" da parede é possível verificar os dados relativos a cada camada (como área, volume, comprimento, altura, espessura), associar diferentes fases construtivas para cada uma, realizar anotações e mudar o material original.

É possível editar o perfil da parede através do *Edit Profile*, quando selecionada uma parede gerada por segmentos de retas (Figura 139a). Para paredes geradas por curvas, deve-se utilizar outros recursos, como a subtração de vazios (*void form*) a partir de famílias de componentes ou a partir da criação de aberturas (*Wall Opening*); nesse último caso, limitando-se às aberturas nos formatos retangulares (Figura 139b).

Figura 139 - (a) Paredes que tiveram o perfil editado; (b) parede curva com rasgos criados com o "wall opening"



Fonte: elaboração da autora.

Todas as opções de criação e edição das paredes, apresentadas até aqui, restringem-se à representação de paredes no prumo e com espessuras uniformes em toda a sua extensão. Apesar dos recursos de edição das camadas no tipo "paredes desmembradas", o controle e a visualização das alterações geométricas só podem ser vistas em perspectiva. Diante dessas limitações, verifica-se a importância de se estudar outras formas de criação de paredes.

A opção *Wall by Face* representa um recurso interessante para a criação de paredes mais complexas, irregulares e fora do prumo. Para isso, é necessário que exista um modelo (ou face de referência), que pode ser um objeto de "massa conceitual", um modelo do tipo genérico (categoria "*Generic Models*") gerado no modo *In-Place* ou um modelo geométrico importado de outros programas.

Antes de detalhar esse modo de criação de paredes (*by Face*), é necessário abordar o modo *Conceptual massing*.

6.4.2 Conceptual massing

As ferramentas de “massa conceitual” do Revit foram criadas visando, principalmente, auxiliar as etapas iniciais de projeto. Esse recurso dá suporte não somente à concepção, visualização e manipulação de diferentes configurações da forma, como também permite transformá-la em elementos construtivos do Revit, a serem usados em outras fases do ciclo de vida da edificação. Os comandos da aba "*Model by Face*", permitem criar coberturas, paredes, pisos ou sistemas em cortina, a partir da seleção de faces do modelo, seja a partir de modelos de “massa conceitual”, criados no próprio Revit ou importados de outros programas.

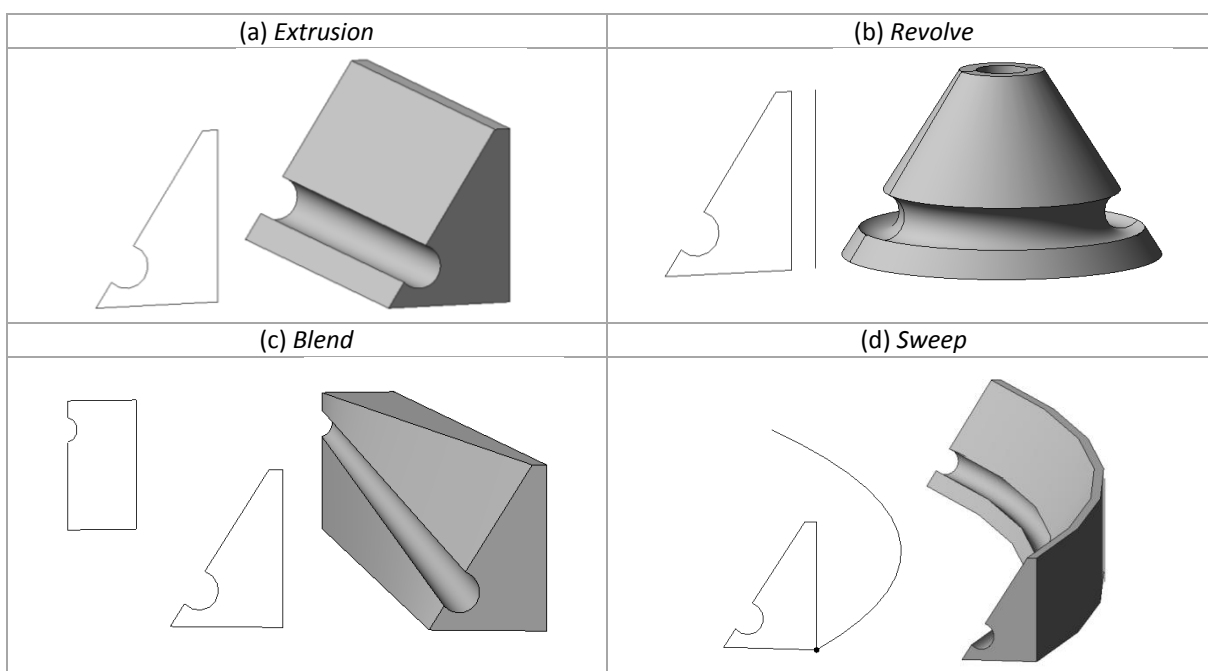
Há duas maneiras de se trabalhar com as ferramentas de modelagem conceitual no Revit: como massas geradas no local (*in-place masses*), dentro do arquivo de projeto, ou famílias carregáveis (*loadable families*) criadas a partir do *template* de famílias de massas (*mass family*), sendo esta última a forma mais adequada quando se deseja inserir diversas vezes a massa, aplicando-se alguma variação nos parâmetros.

Os recursos de modelagem conceitual de massa são um pouco diferentes do *Model In-Place*. Enquanto neste, os comandos são explícitos (*Extrusion, Blend, Revolve, Sweep, Swept Blend*), na modelagem conceitual os comandos são implícitos, baseados na disposição das linhas selecionadas para criação da forma (*Create Form*). É possível criar diversos tipos de objetos no modo de massa conceitual, semelhantes aos gerados no modo *Model In-Place*, mas incluindo o *loft* e outras formas (sólidas ou de superfícies) mais complexas. O modo de criação e as possibilidades de edição da forma são diferentes em relação ao *Model In-Place*.

No ambiente de massa conceitual, há mais recursos de modelagem e edição, no entanto o processo exige mais conhecimento do operador com relação à modelagem geométrica, uma vez que a forma a ser gerada depende e é sensível aos objetos selecionados. Por exemplo, a seleção de um perfil (seja aberto ou fechado) gera extrusão (Figura 140a); de perfil e linha coplanar cria determinada forma pela revolução (Figura 140b). A seleção de dois perfis

dispostos em diferentes planos paralelos é entendida como um *blend*¹⁴⁶ (Figura 140c), e de um caminho e um perfil gera um *sweep* (Figura 140d). A seleção de dois perfis e um caminho gera um objeto através do recurso do comando *Swept Blend* (Figura 141a). Até aqui todas essas formas poderiam ser obtidas através dos comandos de modelagem do *Model In-Place*.

Figura 140 - Comandos (implícitos) da modelagem conceitual: (a) *Extrusion*; (b) *Revolve*; (c) *Blend* e (d) *Sweep*



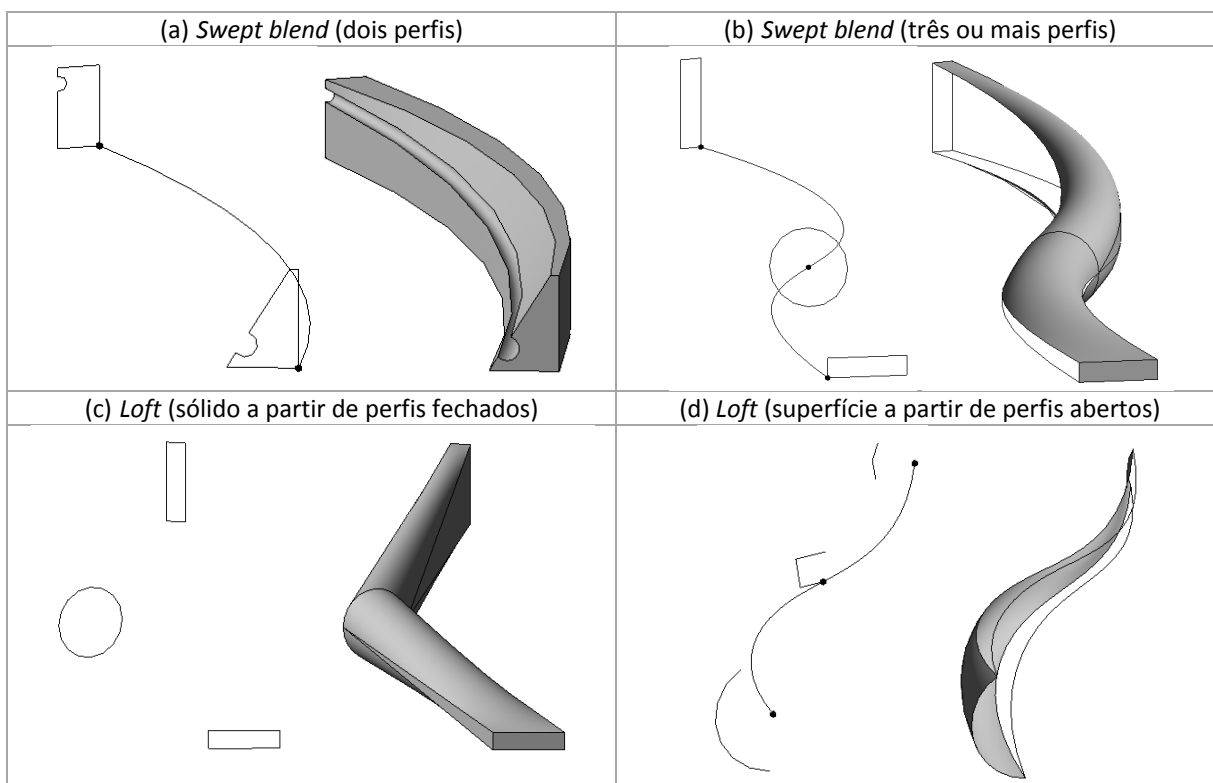
Fonte: elaboração da autora.

Os recursos de "massa conceitual" incluem a possibilidade de modelar um objeto através da seleção de três ou mais perfis e um caminho (*Swept blend*) ou através do *Loft*, pela seleção de dois ou mais perfis (fechados ou abertos) dispostos em diferentes planos, paralelos ou não, gerando um sólido ou uma superfície (Figura 141).

Após a obtenção da forma, pode-se realizar uma série de edições sobre os perfis originais (2D), ou diretamente sobre o modelo gerado (modo não possível no *Model In-Place*). Nesse último caso, pode-se (Figura 142): (1) selecionar pontos, arestas ou faces, para a aplicação de comandos de edição (como *move*, *scale*, *rotate*); (2) editar o perfil de cada face ou, (3) incluir novas arestas (do tipo *edges* ou *profiles*) para manipulação da forma.

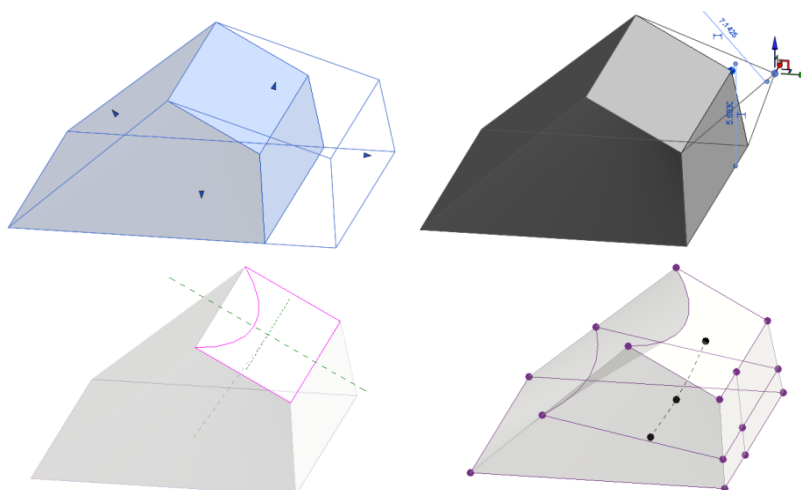
¹⁴⁶ Na versão português do Revit, *blend* é traduzido como "mesclar", ou seja, um comando para geração de modelos a partir de duas seções, posicionadas nas extremidades do objeto.

Figura 141 - Comandos (implícitos) da "modelagem conceitual": (a) *Swept blend*, gerado através de dois perfis; (b) *Swept blend*, através de três perfis; (c) *Loft* a partir de perfis fechados; (d) *Loft* a partir de perfis abertos



Fonte: elaboração da autora.

Figura 142 - Exemplos de possibilidades de edição do objeto de massa conceitual

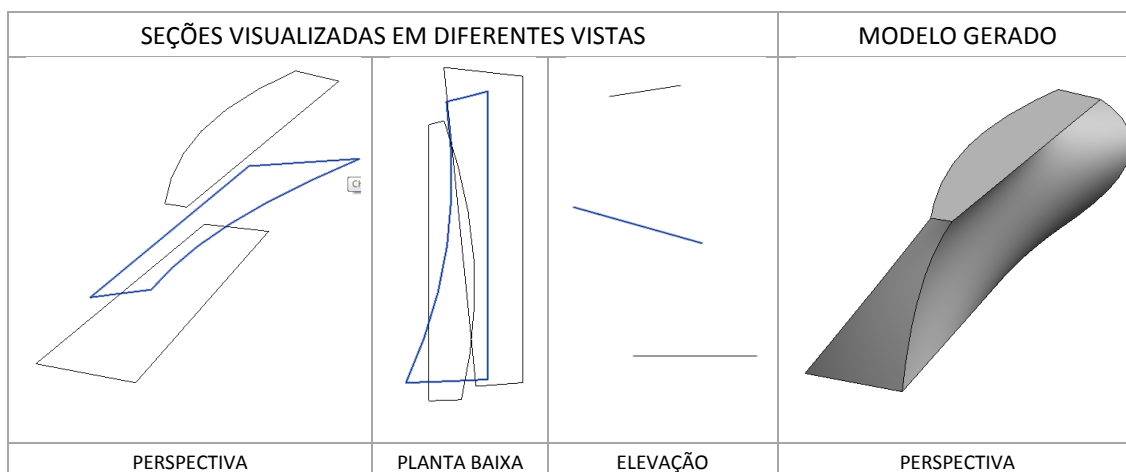


Fonte: elaboração da autora.

6.4.2.1 Paredes criadas através de massa conceitual

Foi criada uma forma com os recursos de "massa conceitual" a partir da seleção de três diferentes seções, dispostas em planos não paralelos, simulando a necessidade de modelagem de uma parede complexa e maciça, como por ser visto na Figura 143.

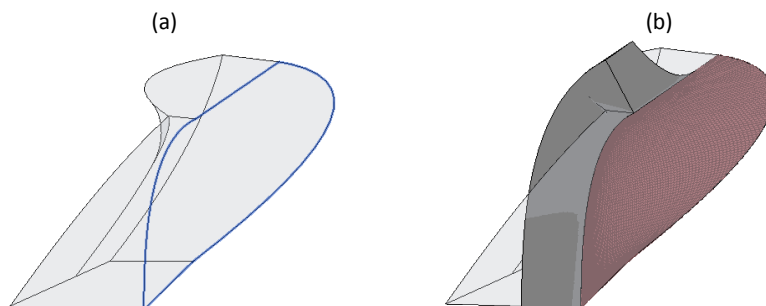
Figura 143 - Simulação da modelagem de uma parede complexa



Fonte: elaboração da autora.

Utilizou-se o comando *Wall by Face* para gerar o elemento parede, a partir da seleção de uma face do modelo de massa conceitual (Figura 144a). Criou-se uma parede com as propriedades especificadas na família escolhida (espessura, camadas, materiais, etc.), mas que acompanhava a curvatura e a inclinação da superfície selecionada (Figura 144b).

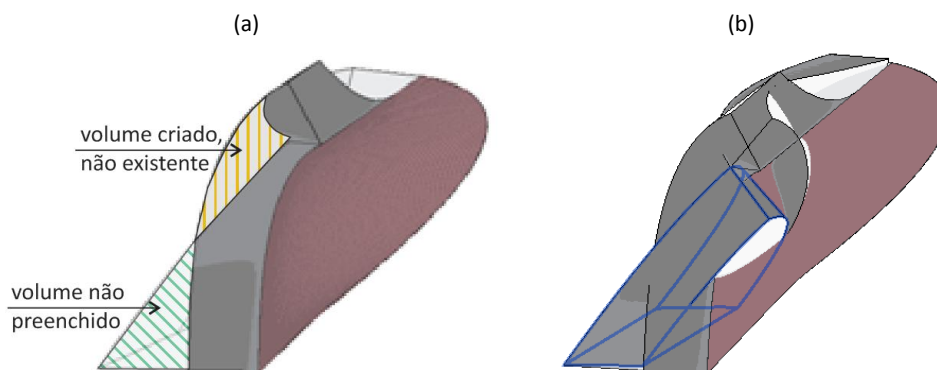
Figura 144 - (a) Seleção de uma face do objeto de massa conceitual;
(b) criação do elemento parede (em cinza)



Fonte: elaboração da autora.

O modelo gerado mostrou-se inadequado para a representação desse tipo de parede. A parede inserida tem espessura uniforme, gerando trechos "não preenchidos" do modelo de massa e criando trechos novos, que não faziam parte da forma original. Testou-se também a inclusão de outra parede no lado esquerdo, para preenchimento do volume, mas o que se vê é uma sobreposição de paredes, com vários problemas de conexão entre elas, gerando um volume que não corresponde à realidade (Figura 145).

Figura 145 - Problemas na associação de: (a) uma parede; (b) duas paredes



Fonte: elaboração da autora.

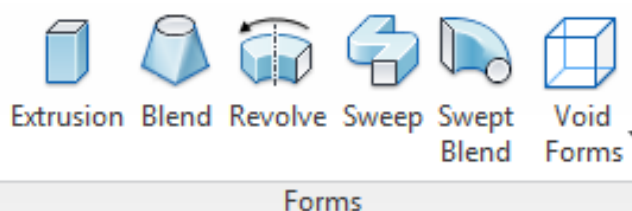
Outro teste realizado, foi verificar se era possível alterar a categoria do objeto, de *Mass* para *Wall*. Foi constatado que objetos criados em *Mass* não permitem alteração de categoria, como é possível realizar em outras situações. Ou seja, se o objeto permanecer como massa, ele estará representando só a forma, sem ser identificado como um elemento construtivo, com suas propriedades específicas.

Após esses testes, verificou-se que o ambiente de massa conceitual permite gerar formas complexas, paredes curvas, inclinadas, fora do prumo, mas não é adequado para representar paredes com espessuras variáveis. Na verdade, seu objetivo principal está associado à criação de volumes correspondentes a edificações inteiras, e não como forma de representar um único componente, como no *Model In-Place*.

6.4.3 *Model In-Place*

A modelagem no modo "*Model In-Place*" é mais fácil e intuitiva do que no ambiente de massa conceitual, pois todos os comandos existentes estão disponíveis na aba "*Forms*" (Figura 146), podendo criar tanto sólidos como vazios (*void forms*). Antes de iniciar a criação dos modelos *In-Place*, deve-se escolher a categoria do objeto (como *ceiling*, *doors*, *furniture*, *generic models*, *wall*, *window*, etc.), e, em seguida, o comando para a modelagem.

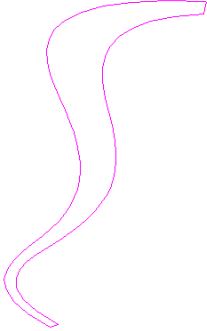
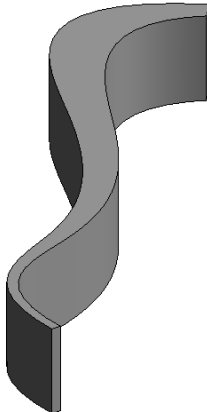

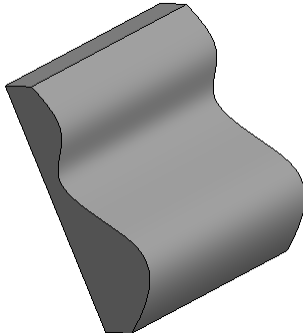
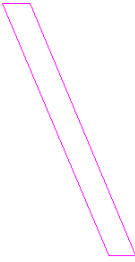
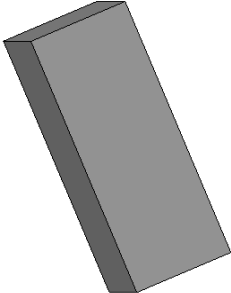
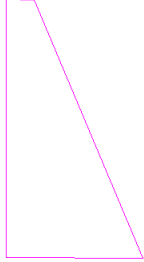
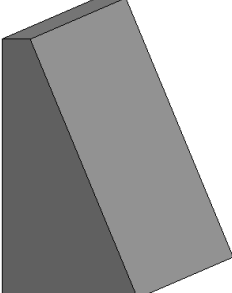
Figura 146 - Comandos do modo *Model In-Place*



Fonte: capturado da interface do Revit 2014.

Foram realizados vários testes para explorar diferentes tipos de modelos. Iniciou-se com o comando *Extrusion* (Figura 147). A parede é modelada a partir do desenho de uma seção (em planta baixa, elevação ou outro plano predefinido) e da determinação do valor da extrusão (*depth*), que corresponderá à altura da parede ou sua extensão, a depender do posicionamento da seção.

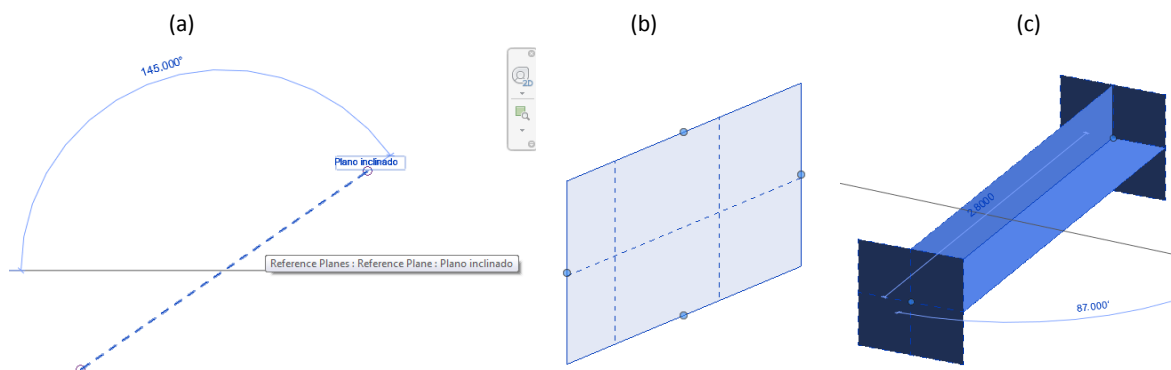
Figura 147 - Diferentes formas de paredes geradas pela extrusão do perfil em planta baixa ou elevação

PAREDE IRREGULAR A PARTIR DE PERFIL CURVO NO PLANO HORIZONTAL		PAREDE IRREGULAR A PARTIR DE PERFIL CURVO NO PLANO VERTICAL	
			
PERFIL DESENHADO EM PLANTA BAIXA	MODELO GERADO	PERFIL DESENHADO EM ELEVAÇÃO	MODELO GERADO
PAREDE FORA DO PRUMO		PAREDE COM DIFERENTES ESPESSURAS	
			
PERFIL DESENHADO EM ELEVAÇÃO	MODELO GERADO	PERFIL DESENHADO EM ELEVAÇÃO	MODELO GERADO

Fonte: elaboração da autora.

No caso da seção do objeto ser traçado em planos não correspondentes aos níveis de projeto, é importante que os planos de referência (*Reference Planes*) sejam criados e nomeados preliminarmente (Figura 148a), para facilitar sua seleção na determinação do plano de trabalho (*Work Plane*). A outra forma de se ter planos de referência para selecionar os *Work Planes* é através do traçado das linhas de referência (*Reference Lines*) dentro da modelagem *In-Place* (Figura 148c).

Figura 148 - (a) Plano de referência criado e nomeado "plano inclinado" na planta baixa; (b) visualizado em perspectiva como plano ativo, de trabalho (*Work Plane*); (c) linhas de referência dentro da modelagem *In-Place* com quatro planos associados

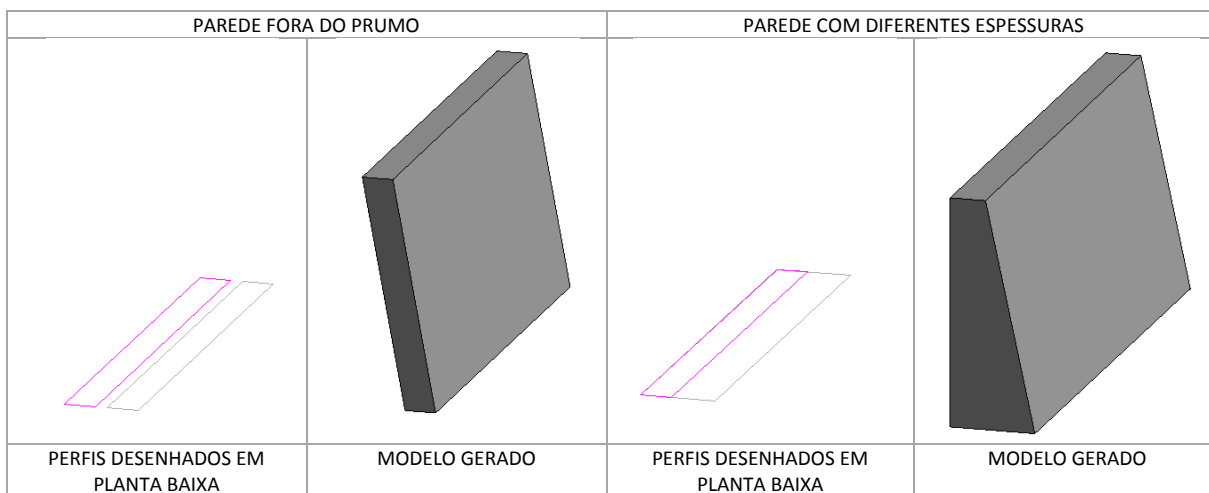


Fonte: elaboração da autora.

A escolha do plano de trabalho para o traçado da seção dependerá da forma da parede a ser modelada, podendo apresentar feições características e/ou mais complexas em planos horizontais, verticais ou inclinados.

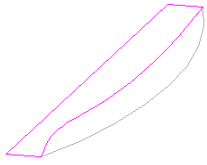
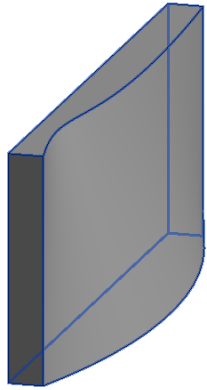
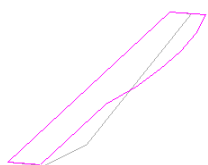
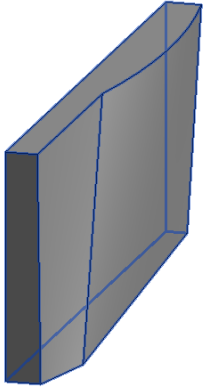
Experimentou-se também o comando *Blend* para criação de alguns tipos de paredes. O *Blend* do *Model In-Place* permite criar um objeto a partir da conexão (através de caminho linear) de dois perfis fechados (*Blend Base* e *Blend Top*) desenhados no mesmo *Work Plane*, mas afastados no modelo pelo valor definido pelo *Depth*. Quando os dois perfis são idênticos, o resultado é o mesmo que poderia ser obtido com o *Extrusion* ou *Sweep* (através de uma diretriz reta), conforme modelos ilustrados da Figura 149. Se forem usados perfis diferentes, pode-se obter formas mais complexas, incluindo perfis formados por linhas curvas (Figura 150).

Figura 149 - Diferentes formas de paredes geradas pelo *Blend* a partir de perfis da base (em cinza) e da parte superior (em magenta)



Fonte: elaboração da autora.

Figura 150 - Paredes mais complexas geradas com o *Blend* a partir dos perfis da base (em cinza) e da parte superior (em magenta)

PAREDE IRREGULAR A PARTIR DE DIFERENTES PERFIS CURVOS		PAREDE IRREGULAR A PARTIR DE PERFIS POLIGONAIS E CURVOS	
			
PERFIS DESENHADOS EM PLANTA BAIXA	MODELO GERADO	PERFIS DESENHADOS EM PLANTA BAIXA	MODELO GERADO

Fonte: elaboração da autora.

O funcionamento dos comandos *Sweep* e *Swept Blend* do *Model In-Place* é parecido com o do ambiente de massa conceitual, por isso não são apresentados exemplos gerados com esses comandos. As maiores diferenças referem-se à criação dos elementos associados a sua função no modelo (se perfil, se caminho, se eixo, etc.) e as menores possibilidades de edição da forma.

A partir desses exemplos apresentados, verifica-se o potencial de utilização da modelagem *In-Place* para representar formas mais complexas de paredes, com propriedades específicas de paredes, como: são hospedeiras (*host*) de janelas, são apresentadas nas tabelas de quantitativos, sendo possível associá-las a materiais. No entanto, apresentam limitações se comparadas com as paredes de famílias de sistema. Não permitem a especificação das camadas que as compõem, não possibilitam o uso comando *Edit Profile*, nem o *Attach Top/Base* para associar sua geometria a pisos ou telhados.

Em relação à modelagem em massa, o *Model In-Place* apresenta a vantagem de não requerer a transformação das faces em elemento construtivo parede, pois o modelo já representa o objeto maciço de parede¹⁴⁷.

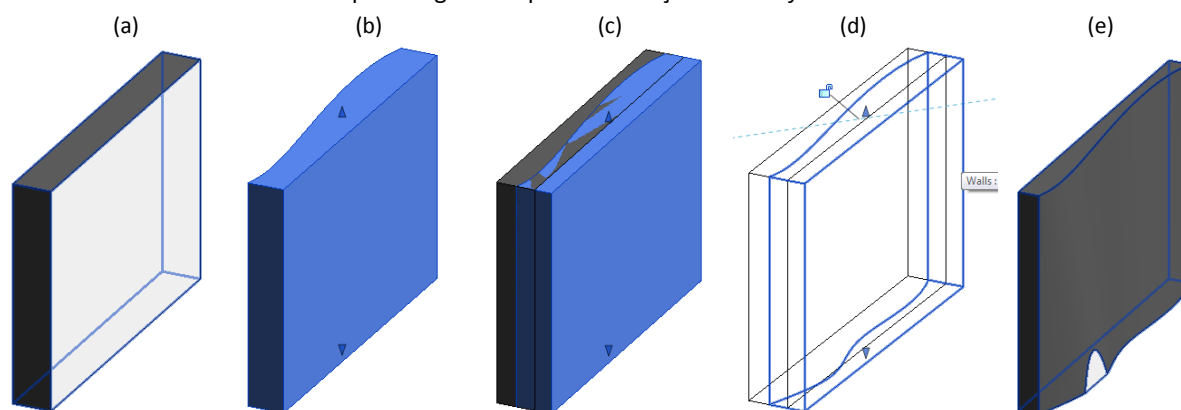
A desvantagem em relação à massa conceitual está relacionada às maiores limitações da modelagem em si e das possibilidades de edição da forma. Não é possível, por exemplo, criar

¹⁴⁷ Esse tipo de modelo pode ser aplicado em paredes “homogêneas”, constituídas de um só material, como concreto simples ou armado, alvenaria de pedras ou tijolos.

uma forma a partir de mais de dois perfis ou de perfis dispostos em planos não paralelos. Os comandos do *Model In-Place* só permitem a seleção de perfis fechados, gerando sempre objetos sólidos, não sendo possível a criação de superfícies.

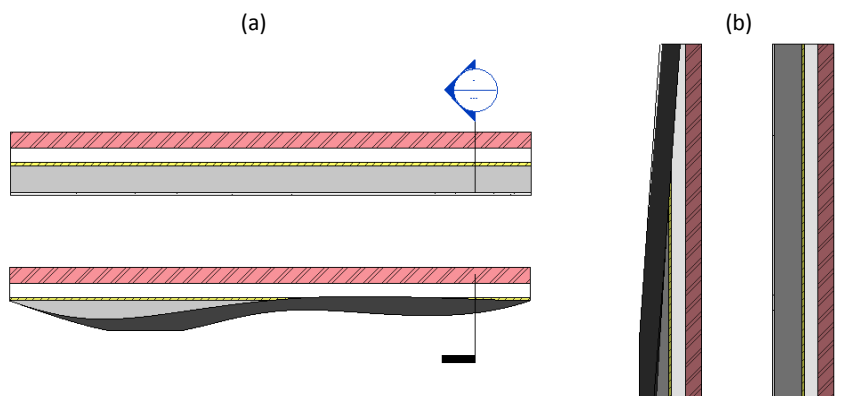
Visando suprir essas limitações, partiu-se para novos experimentos, visando reunir as vantagens de utilização das famílias de paredes com a maior complexidade geométrica possibilitada pelo *Model In-Place*. Esse método "misto" testado requer a criação em *Model In-Place* do volume a ser retirado da parede (*Void Form*), de modo a permitir a geração de uma parede mais complexa, com seções irregulares, pela subtração do volume vazio da parede de sistema (Figura 151).

Figura 151 - Processo de criação de uma parede mais complexa, a partir de uma parede de sistema: (a) parede original; (b) criação da forma "vazia" (*void form*); (c) e (d) sobreposição da parede com a forma "vazia"; (e) parede gerada após a subtração do *void form*



Fonte: elaboração da autora.

Figura 152 - Parede mais complexa gerada pelo método "misto", vista em: (a) planta baixa; (b) corte



Fonte: elaboração da autora.

Para esse teste, foi utilizada uma parede formada por várias camadas, visando verificar seu comportamento após a subtração. A Figura 152 ilustra essa parede representada em planta baixa e em corte, onde é possível visualizar o recorte nas camadas que sofreram a subtração.

Essa situação dificilmente acontece na realidade, sendo mais comum a variação de espessura de determinadas camadas e não sua eliminação por completo, onde há barrigas ou irregularidades.

6.4.4 Importação de modelos geométricos

A última possibilidade de criação de paredes a ser abordada, mas que serve para outros elementos construtivos, é através da importação de modelos geométricos (componentes, partes) criados em outros programas. Esse método é interessante quando o operador tem maior familiaridade de modelagem em outros programas CAD, ou quando é necessária maior quantidade de recursos para modelagem complexa.

Foram realizados alguns testes de importação, sejam de seções (bidimensionais), sejam de modelos geométricos (tridimensionais).

Elementos bidimensionais, como linhas e polilinhas (contidas no mesmo plano), podem ser inseridos tanto no ambiente de projeto, como nos modos *In-Place* ou *In-Mass*, que poderão ser selecionados no Revit para a criação de diversos objetos.

As curvas *splines* (contidas no mesmo plano) devem ser importadas no contexto da modelagem *In-Place* ou diretamente no projeto. Esses dois modos permitem “explodi-las” para serem entendidas como objetos de desenho do Revit (Figura 153a), podendo ser utilizadas para criação de famílias *In-Place* ou *In-Mass*. Se as *splines* forem explodidas após a importação no modo de massa conceitual, elas desaparecem, não podendo ser modificadas, mas voltam a aparecer quando finalizado o modo de edição.

Figura 153 - Objetos antes e após o comando *Explode*: (a) *spline*; (b) objeto sólido



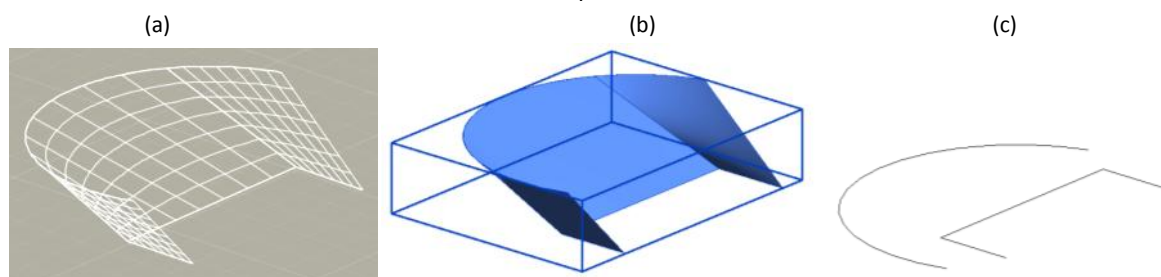
Fonte: elaboração da autora.

Objetos sólidos (tridimensionais) devem ser inseridos apenas nos modos *In-Place* ou *In-Mass* e explodidos (Figura 153b) para permitir sua edição e seleção. Se importado no *Model In-Place*, o objeto já estará associado à categoria escolhida. Se inserido no ambiente de massa

conceitual, ele poderá ser selecionado para associação de elementos construtivos. Se for importado diretamente no ambiente de projeto, o objeto não pode ser editado, nem selecionado para criação de elementos construtivos (*by face*).

Modelos de superfície devem ser inseridos preferencialmente no modo *In-Mass*, para posteriormente serem associados a elementos construtivos (e se tornarem objetos sólidos). Não devem ser explodidos, pois se isso acontecer, os modelos geométricos desaparecem, sendo geradas linhas projetadas para o plano de trabalho corrente (Figura 154).

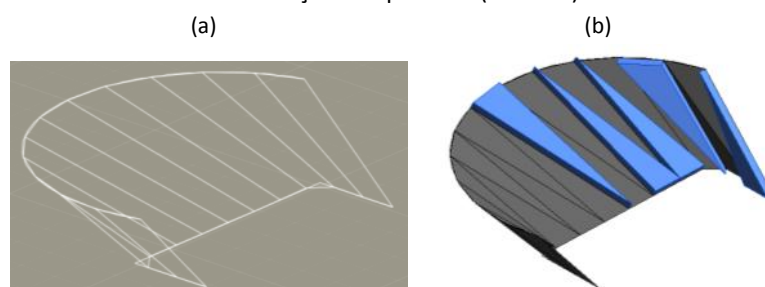
Figura 154 - (a) Superfície NURBS criada no AutoCAD; (b) importada no modo *In-Mass* do Revit; (c) após o *Explode*



Fonte: elaboração da autora.

Objetos do tipo *mesh*, quando importados no Revit, não permitem a associação adequada dos elementos construtivos, uma vez que as superfícies são decompostas em faces triangulares, como pode ser visto na Figura 155.

Figura 155 - (a) Malha poligonal (*mesh*) criada no AutoCAD; (b) importada no modo *In-Mass* do Revit para associação das paredes (em azul)



Fonte: elaboração da autora.

Foram realizados também testes de importação de seções dispostas em diferentes planos, para verificar se as mesmas poderiam ser utilizadas como base para a modelagem no Revit. Após a inserção das seções no modo *Model In-Place*, utilizou-se o *explode*, visando transformá-las em elementos próprios do Revit. O problema é que todas as seções são projetadas para o plano de trabalho corrente, tal como acontece com as superfícies importadas e explodidas.

Dessa forma, verificou-se que não é vantajosa a importação desse tipo de objeto (seções em diferentes planos), pois seria necessário criar planos de trabalho para cada seção, selecionar cada uma para transformá-la em elemento do Revit. Além do retrabalho, é importante considerar as limitações específicas desse programa para a modelagem de formas mais complexas, seja no *Model In-Place*, onde seria necessário modelar cada trecho separadamente com o *blend*, ou no *In-Mass*, onde o objeto permaneceria como objeto do tipo "massa".

Nesse sentido, observou-se que o modo mais interessante de importação de objetos é através de modelos sólidos no *Model In-Place* que, após o *explode*, são entendidos como objetos próprios do Revit (na categoria escolhida), permitindo associar materiais e constar nas planilhas geradas pelo programa.

Esse estudo será aplicado no capítulo 7, durante a modelagem de formas mais complexas da Capela de Nossa Senhora da Escada.

6.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os experimentos realizados visaram a sistematização de processos e a análise de resultados, de modo a dar suporte à realização do estudo de caso apresentado no capítulo 7, a seguir, principalmente em casos de maior complexidade dos objetos e necessidade de modelagem mais precisa e detalhada dos elementos construtivos na ferramenta BIM.

No próximo capítulo são testados e discutidos diversos aspectos, dentre os quais destacam-se: nível de detalhe/finalidade, precisão, rapidez para geração dos produtos, integração de tecnologias e métodos de trabalho com uso da "nuvem de pontos" em programa BIM.

Capítulo 7

Modelagem BIM de uma edificação histórica

7 MODELAGEM BIM DE UMA EDIFICAÇÃO HISTÓRICA

Esse capítulo apresenta e discute o estudo de caso realizado, que consiste na modelagem BIM¹⁴⁸ de edificação histórica no Revit a partir de "nuvem de pontos", visando a proposição de processos e métodos de trabalho adequados a diferentes situações, como características/dimensões do objeto, usos potenciais do modelo e diferentes níveis de detalhamento. Inicia-se com o histórico da Capela de Nossa Senhora da Escada e a descrição dos métodos de levantamento utilizados. Depois, apresenta-se a modelagem BIM com base em modelo de superfícies gerado por Fotogrametria Digital e depois por "nuvem de pontos". Ao final, é feita uma análise e discussão sobre todo o experimento realizado.

7.1 BREVE HISTÓRICO DA CAPELA DE NOSSA SENHORA DA ESCADA

A Capela de Nossa Senhora da Escada (Figura 156) é um monumento tombado pelo IPHAN - Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (desde 1962), de grande relevância, por se tratar de uma das primeiras capelas construídas no Brasil, em meados do século XVI.

Figura 156 - Fotografia da fachada principal da Capela de Nossa Senhora da Escada

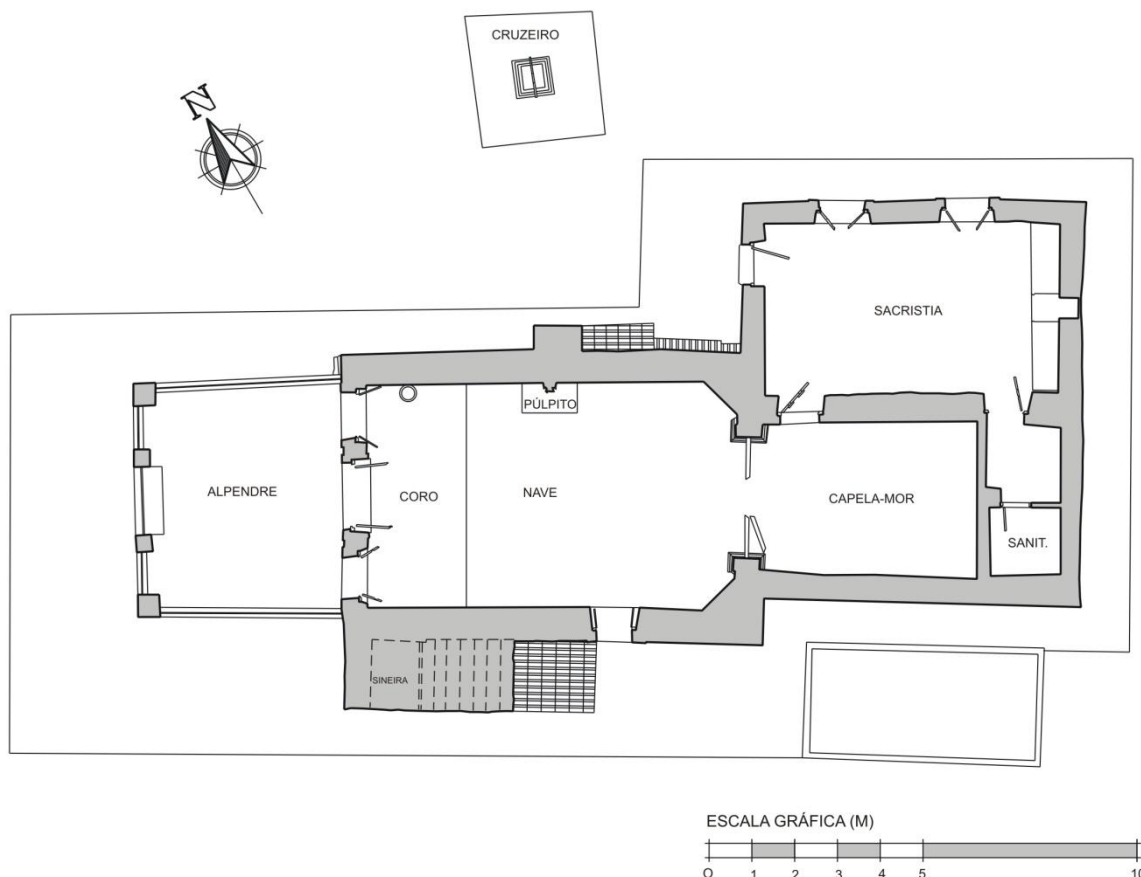


Fonte: Groetelaars (2004).

A capela está localizada na Rua São Jorge, transversal à avenida Suburbana, no bairro da Escada - subdistrito de Plataforma, em um platô de colina, com vista para a Bahia de Todos os Santos. É composta de alpendre, nave, capela-mor, sacristia, sanitário, coro, sineira e púlpito, sendo os três últimos acessados por escadarias externas (Figura 157).

¹⁴⁸ Conforme já tratado no capítulo 1, o foco da pesquisa está relacionado à modelagem geométrica dos elementos construtivos de edificações existentes, não contemplando a associação de informações semânticas aos objetos.

Figura 157 - Planta baixa da capela



Fonte: Groetelaars (2004).

Esta capela faz parte da história da Bahia, pois foi cenário de fatos relevantes e serviu de abrigo para muitos personagens importantes. A primeira menção da capela é de 1619, em documento escrito pelo padre Baltasar Fernandes. Ele diz que, em 1576, o Padre José de Anchieta ficou muito doente e retirou-se na Capela de Nossa Senhora da Escada para rezar por sua cura. Poucos dias depois, ele voltou curado para Salvador. Esta carta sobre a cura milagrosa do Padre Anchieta foi encontrada nos arquivos do Vaticano, em 1960, pelo Padre Hélio Viotti, traduzida para o português e enviada ao IPHAN de Salvador. Este documento (carta) foi uma das peças básicas para o pedido de tombamento (LIMA; AULBACH; BETREUERIN, 2004).

Outro registro que ilustra a importância histórica dessa edificação pode ser observado na lápide afixada na parte externa da lateral esquerda da capela, um marco da tentativa frustrada da Invasão Holandesa a Salvador, em 1638.

As primeiras fotografias encontradas dessa capela são de 1940 (Figura 158), que revelam grandes transformações, provavelmente no período compreendido entre o fim do século XVIII e início do século XIX, período barroco no Brasil. A modificação foi realizada sobretudo na fachada principal (voltada ao mar), que foi reconstruída em estilo barroco. Isto pode ser verificado através das volutas, janelas mais altas e curvas, e uma série de outros elementos típicos daquela época (LIMA; AULBACH; BETREUERIN, 2004).

Figura 158 - Fotografias antigas da Capela de Nossa Senhora da Escada: tiradas em 1940 e 1959, respectivamente



Fonte: Lima, Aulbach e Betreuerin (2004).

7.2 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE LEVANTAMENTO UTILIZADOS

Foram utilizados diferentes métodos para o levantamento cadastral da Capela de Nossa Senhora da Escada: medição direta, Fotogrametria Digital, varredura a laser e DSM.

A medição direta foi realizada em 2004 por uma equipe de estudantes da *Technische Universität Berlin* (LIMA; AULBACH; BETREUERIN, 2004). Esse levantamento contou com o apoio de métodos topográficos através do uso de teodolito e nível a laser, onde foram produzidos desenhos (plantas baixas, cortes e fachadas), que foram vetorizados posteriormente pelo IPHAN-BA. Os outros três métodos são descritos brevemente a seguir.

7.2.1 Fotogrametria Digital (*stricto sensu*)

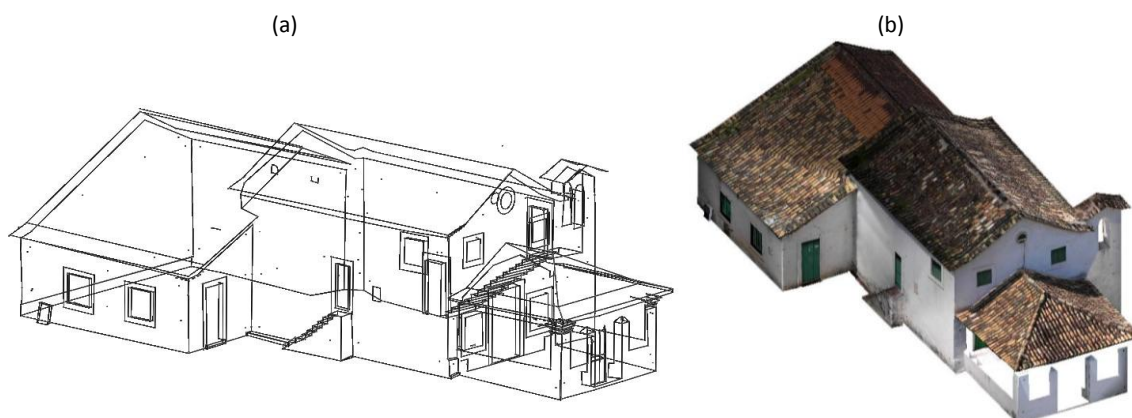
O levantamento fotogramétrico da capela foi realizado em 2004, durante a pesquisa de mestrado da autora, visando a avaliação das potencialidades da técnica para documentação arquitetônica, bem como a análise da precisão dos resultados obtidos. A análise da precisão foi possível através do levantamento topográfico de pontos de controle (naturais e sinalizados com alvos) realizado paralelamente à tomada fotográfica.

Para a tomada fotográfica, foi utilizada a câmera digital Nikon Coolpix 5400 de 5 *megapixéis*. Foram tomadas fotos de diversos ângulos, preferencialmente perpendiculares e a 45° ao plano de cada uma das fachadas, de modo a permitir maior precisão na localização dos pontos restituídos pelo método utilizado (restituição de fotos convergentes). Foram tiradas fotos inclusive de pontos elevados, a partir da utilização de "caminhão concha" a aproximadamente 9 m de altura, que permitiu uma melhoria significativa da precisão do modelo e da qualidade das texturas (principalmente as relacionadas à fachada principal e aos telhados).

A restituição fotogramétrica foi realizada no programa PhotoModeler¹⁴⁹ (versão 4.0), e foi constituída das seguintes fases:

- determinação dos parâmetros de orientação interna através da calibração da câmera;
- orientação externa das fotografias a partir do traçado interativo de pontos homólogos visando a determinação do posicionamento relativo das fotografias e a obtenção do modelo geométrico tridimensional;
- determinação da escala do modelo baseada nos valores de coordenadas de alguns pontos da edificação levantados por topografia;
- aplicação das texturas;
- verificação da precisão dos resultados.

Figura 159 - Modelo geométrico da capela gerado no PhotoModeler: (a) em estrutura de arame; (b) com aplicação de foto-texturas



Fonte: Groetelaars (2004).

¹⁴⁹ Em 2004, não existia a versão desse programa (PhotoModeler Scanner) com a possibilidade de geração de "nuvens de pontos" por fotografias.

A Fotogrametria Digital permitiu a geração do modelo de superfícies fotorrealístico do exterior da capela (Figura 159). A avaliação da precisão do produto gerado pelo PhotoModeler foi feita de duas formas, a partir da: (1) análise visual da sobreposição de desenhos; (2) comparação dos valores das coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos sinalizados (GROETELAARS, 2004).

A sobreposição do desenho da planta baixa gerada por este programa e da planta baixa obtida através da medição direta mostrou que as maiores diferenças coincidiam, justamente, com os pontos de difícil identificação nas fotografias, registrados a partir de ângulos muito fechados (com pequena angulação entre as tomadas).

Na comparação dos valores numéricos dos pontos selecionados para análise, verificou-se que as médias das diferenças das coordenadas x, y e z de pontos levantados por Fotogrametria Digital e topografia foram de 2.3, 1.2 e 0.1 cm respectivamente.

A técnica utilizada nesse experimento estava restrita à restituição de pontos facilmente identificáveis, sejam feições naturais (como vértices de paredes e molduras de janelas) ou artificiais (sinalização com alvos). Para a restituição de feições curvas, era necessária a utilização criteriosa da sinalização, uma vez que a precisão dos resultados estava intimamente ligada à densidade e à localização dessas marcas.

7.2.2 Varredura a laser

A varredura a laser foi realizada pela empresa GeoPointer¹⁵⁰ em 2014. Foi utilizado o Leica ScanStation C10 (Figura 160 e Quadro 20), que inclui em um único equipamento: *scanner*, duplo compensador, prumo a laser, bateria, unidade de controle, unidade de armazenamento¹⁵¹, câmera fotográfica e de vídeo.

¹⁵⁰ O serviço de varredura a laser foi financiado pela FINEP, através do projeto de pesquisa TIC-HIS, elaborado em resposta à CHAMADA PÚBLICA MCT / FINEP / Ação Transversal 7 / 2009. Todo o levantamento foi acompanhado pela autora desta pesquisa.

¹⁵¹ O disco rígido interno elimina a necessidade de ligação com um *notebook* em campo.

Figura 160 - (a) Laser scanner Leica ScanStation C10 sobre tripé; (b) detalhe da unidade de controle com a "nuvem de pontos" gerada



Fonte: elaboração da autora.

Quadro 20 - Características principais do laser scanner Leica ScanStation C10

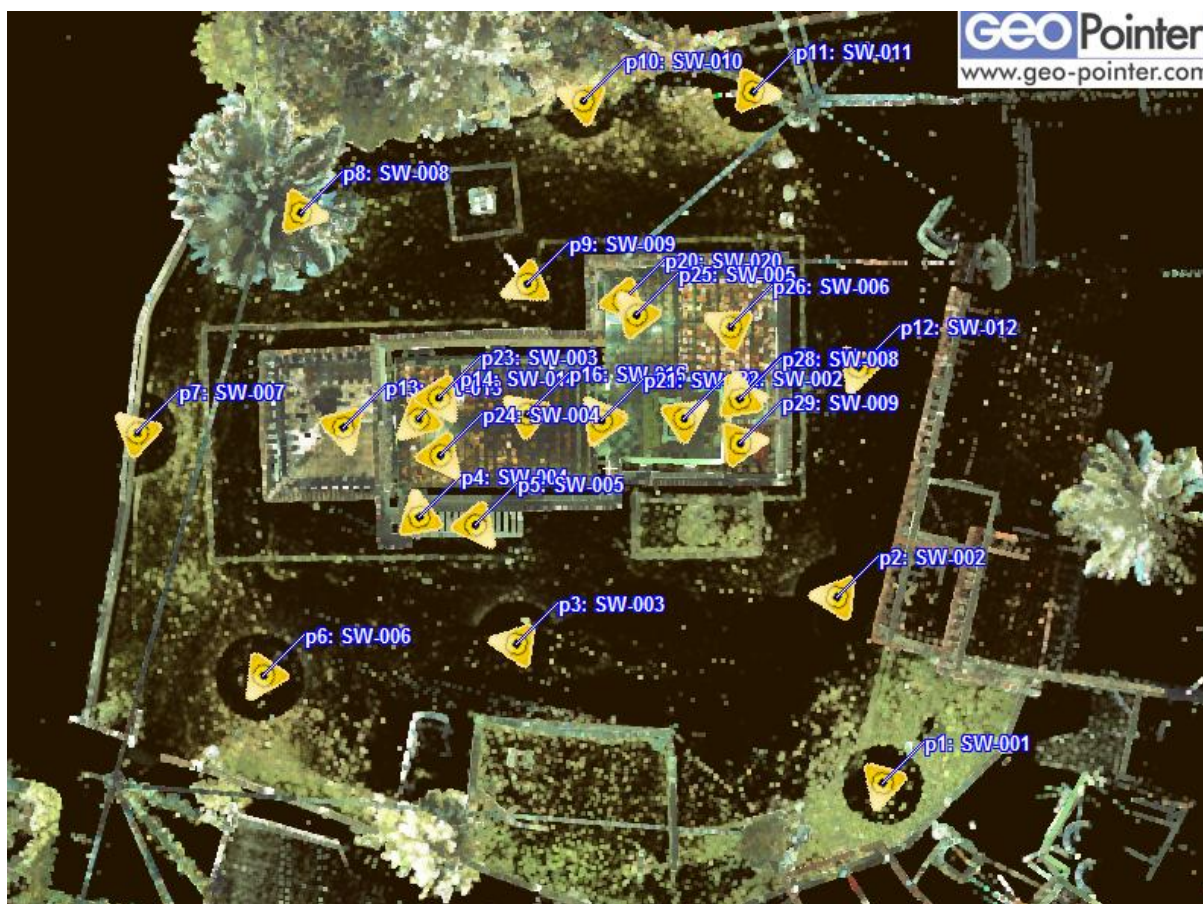
LEICA SCANSTATION C10	
Tipo	Tempo de voo (<i>pulsed</i>)
Alcance	0,1 a 300 m
Espaçamento mínimo dos pontos	Menor que 1 mm
Campo de visão	Horizontal: 360° Vertical: 270°
Fotografias (câmera digital integrada)	Resolução: 1.920 x 1.920 <i>pixels</i> Paranoramas de 360° x 270°, a partir de 260 imagens

Fonte: elaboração da autora, baseada em informações disponíveis no site: <www.leica-geosystems.com>, acessado em 1 out. de 2014.

O levantamento a laser foi realizado por duas pessoas, durante dois dias (três turnos), perfazendo 13 horas de trabalho em campo. Ao todo, foram escaneadas 26 cenas (sendo duas só com os alvos¹⁵²), obtidas de diversas estações (interior e exterior) posicionadas estrategicamente para uma melhor cobertura da edificação, bem como para possibilitar o registro entre as diversas cenas, em especial, a conexão através das aberturas entre interior/exterior e entre os diferentes cômodos da edificação. O posicionamento de todas as estações pode ser visto na Figura 161.

¹⁵² Das 26 cenas escaneadas, duas apresentaram apenas a "nuvem de pontos" de alvos. Essas cenas visaram a amarração de alvos internos e externos (registro de cenas), para a continuação da varredura a laser no dia seguinte, uma vez que os alvos externos deveriam ser retirados. Nas outras 24 cenas, o escaneamento foi completo, contemplando os objetos de interesse (trechos da edificação) e os alvos vistos de cada estação.

Figura 161 - Posicionamento das estações para varredura das diversas cenas



Fonte: capturado do visualizador TruView, do arquivo gerado pela empresa GeoPointer, 2014.

Logo após a varredura de cada cena, realizava-se a cobertura fotográfica pela câmera integrada ao *laser scanner*, para permitir a produção dos panoramas fotográficos a serem mapeados sobre as "nuvens de pontos".

Nas varreduras, foram utilizadas duas resoluções para as "nuvens de pontos": 5-7 mm para a edificação como um todo e 3 mm para os detalhes.

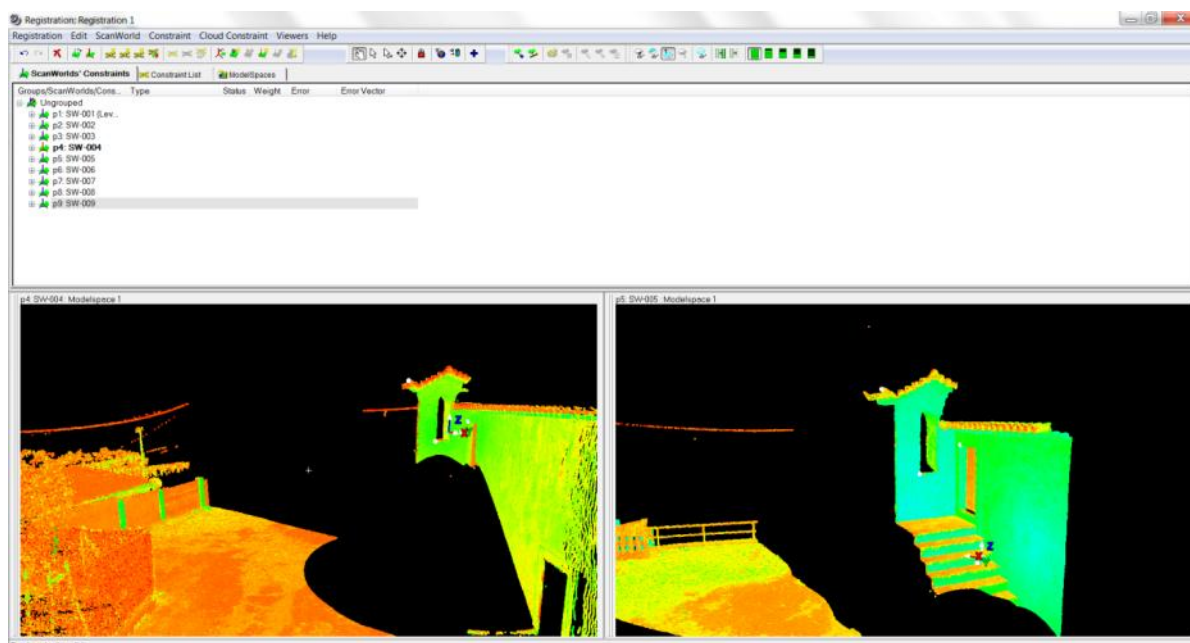
A maioria das cenas foram registradas a partir da identificação de alvos comuns entre elas (ao menos quatro alvos). Ao todo, foram utilizados 32 alvos distribuídos no exterior e interior da edificação (Figura 162). Somente em duas situações foi utilizado o registro através da associação entre "nuvens de pontos" (estações 4 e 5, e 27 e 28). Nesses casos, foram registradas cenas não muito extensas, que apresentavam grandes áreas de sobreposição, sendo obtidas a partir de estações próximas. Um exemplo desse tipo de registro é ilustrado na Figura 163.

Figura 162 - Três tipos de alvos utilizados



Fonte: elaboração da autora.

Figura 163 - Registro entre "nuvens de pontos" geradas nas estações 4 e 5



Fonte: capturado do *software* Cyclone pela Geopointer, 2014.

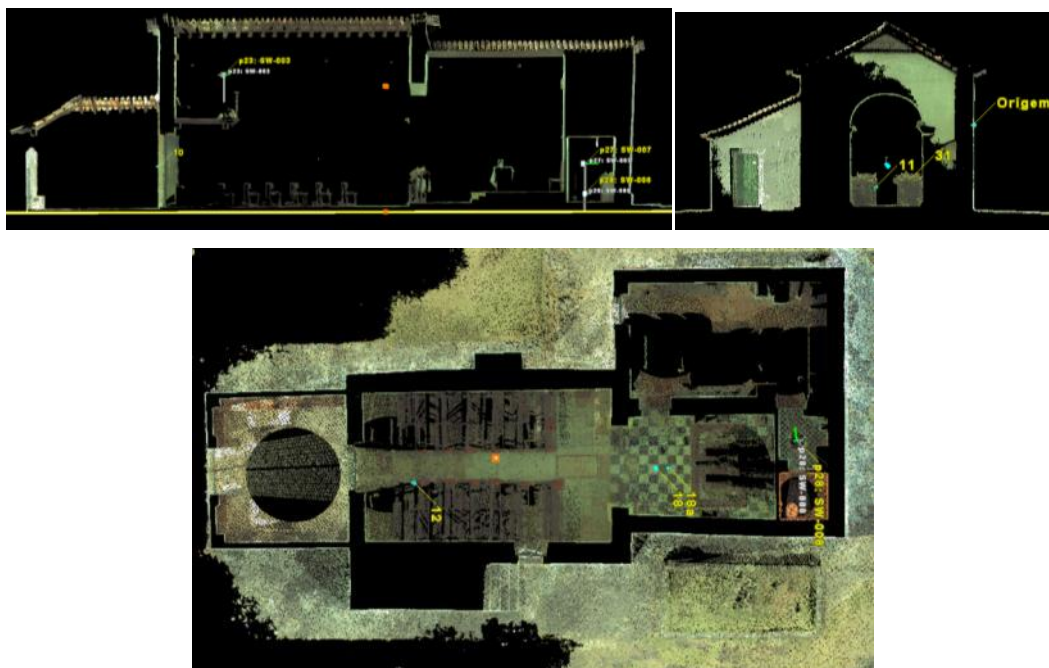
Após o registro de todas as cenas no *software* Cyclone 8.0, obteve-se o modelo de "nuvem de pontos" com 100.038.992 de pontos (Figura 164), com tamanho de arquivo de 1,86 GB (formato PCG). Foram realizados alguns seccionamentos na "nuvem de pontos" registrada, para facilitar a inspeção visual e análise do alinhamento das diversas cenas (Figura 165).

Figura 164 - Visualização da "nuvem de pontos" texturizada do interior e do exterior da capela



Fonte: capturado do *software* Cyclone pela Geopointer, 2014.

Figura 165 - Seccionamentos na "nuvem de pontos" para inspeção visual do registro das cenas



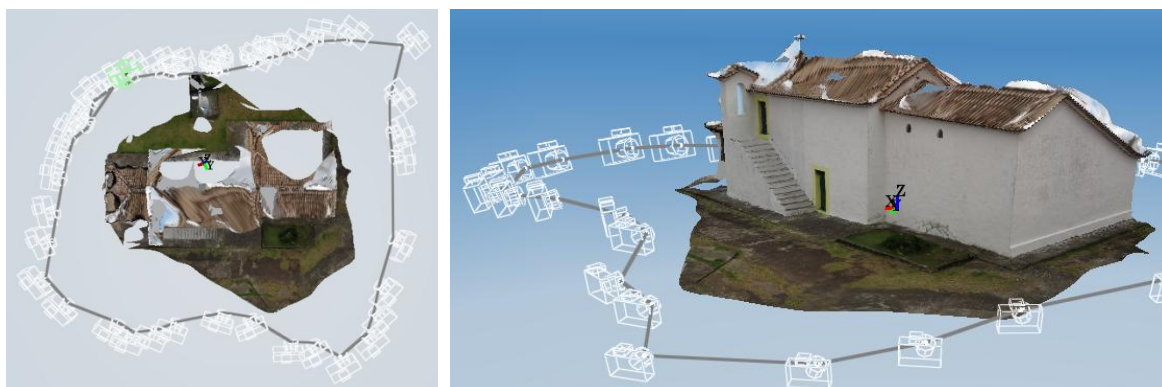
Fonte: capturado do *software* Cyclone pela Geopointer, 2014.

7.2.3 Dense Stereo Matching (DSM)

Para a geração da "nuvem de pontos" pela técnica DSM, com o 123D Catch, foi feito o levantamento fotográfico do exterior da capela em curto intervalo de tempo¹⁵³ (cerca de 10 minutos), no mesmo dia da varredura a laser. Nesse experimento, foram utilizadas 43 fotos (total de 131 MB) tomadas pela câmera Sony DSC-HX7V, resolução de 16 megapixels (4.608 x 3.456 pixels).

O posicionamento das estações seguiu a regra descrita na seção 3.2.4, tendo o valor médio de R (B/L) de aproximadamente 0,3 e a angulação em torno de 13 graus, permitindo a cobertura da edificação de diversos ângulos (Figura 166) e com grandes áreas de sobreposição. Nesse experimento, a tomada fotográfica de pontos elevados não foi possível por falta de recursos técnicos, o que impediu o registro adequado do telhado.

Figura 166 - Posicionamento das estações em vista superior e em perspectiva no 123D Catch



Fonte: elaboração da autora.

O modelo gerado no 123D Catch foi exportado para o formato OBJ, aberto no Geomagic Studio para conversão em DXF, para depois ser importado no Revit (processo de conversão tratado na seção 6.1.3.1).

Diversos ângulos do modelo gerado no 123D Catch podem ser vistos na Figura 167. Percebe-se que as áreas com cobertura deficiente e com aplicação inadequada da textura são justamente os trechos com maior limitação da tomada fotográfica, como a fachada principal com o alpendre (fachada noroeste) e os telhados. A fachada lateral direta (sudoeste)

¹⁵³ O curto intervalo de tempo é necessário na técnica DSM (conforme já abordado), de modo a evitar variações de iluminação e sombreamento das superfícies fotografadas, o que dificultaria ou impediria a correlação automática das feições.

apresentou o melhor resultado, visto ser o trecho com melhor posicionamento das estações para a captura fotográfica.

Figura 167 - Diversos ângulos da malha TIN da capela gerada no 123D Catch



Fonte: elaboração da autora.

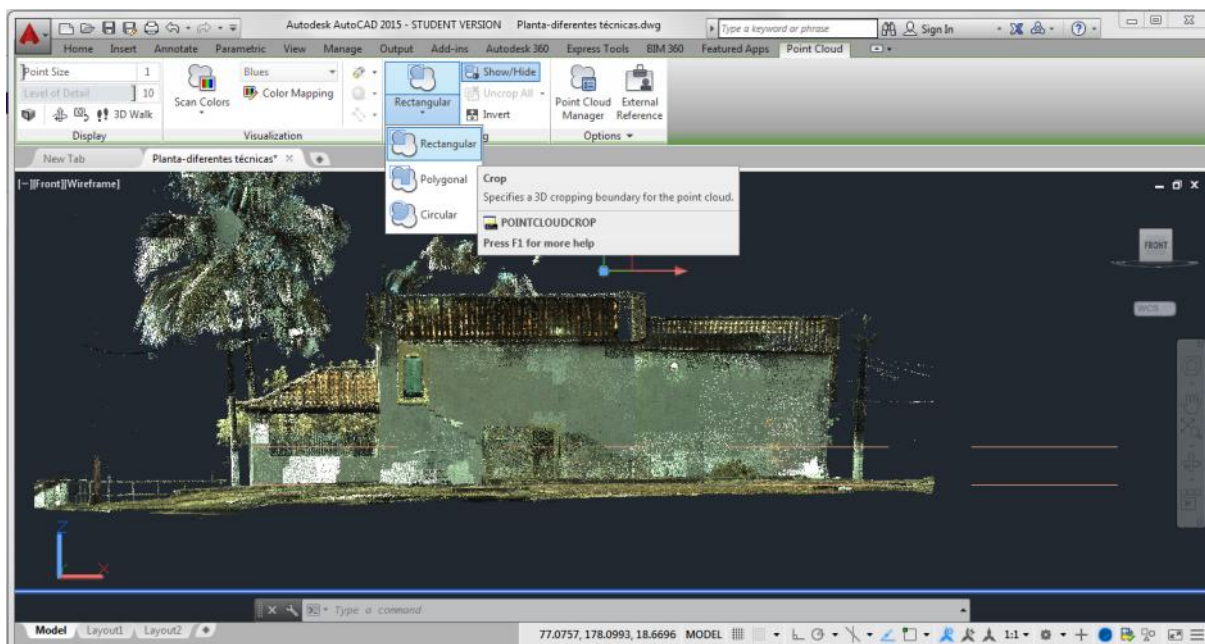
7.3 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE LEVANTAMENTO

Foram realizadas no AutoCAD 2015 algumas sobreposições de produtos obtidos por três técnicas de levantamento: medição direta¹⁵⁴ (plantas baixas e fachadas), fotogrametria digital - *stricto sensu* (modelo de superfícies) e varredura a laser ("nuvem de pontos"). A análise mais detalhada do modelo gerado por DSM será tratada na seção 7.6.4, com a sobreposição com o modelo BIM gerado pela varredura a laser, devido à dificuldade de visualização junto aos outros levantamentos.

A versão 2015 do AutoCAD foi escolhida por apresentar novos recursos para manipulação da "nuvem de pontos", como alteração do "tamanho do ponto", do nível de detalhe (quantidade de pontos a ser visualizada), mas, principalmente, pelo recurso de criar recortes (*crop*) sobre o modelo, conforme ilustrado na Figura 168.

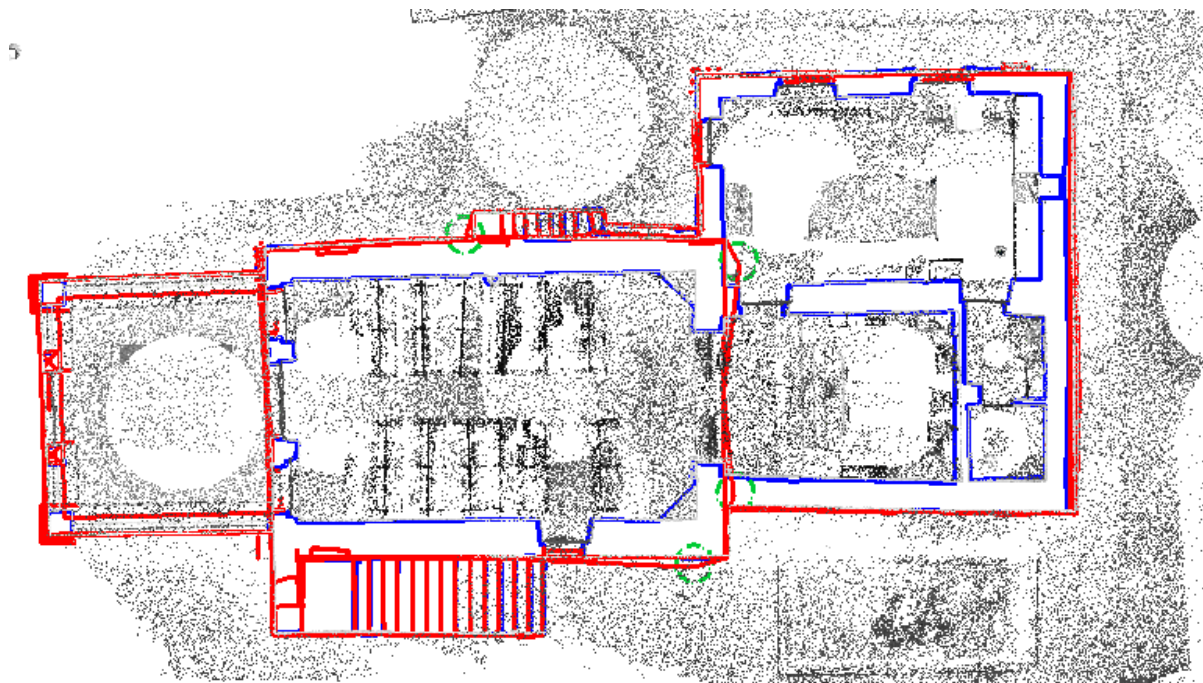
¹⁵⁴ Realizado por LIMA; AULBACH; BETREUERIN (2004) e vetorizado pelo IPHAN-BA, conforme mencionado anteriormente.

Figura 168 - Comandos específicos para manipulação da "nuvem de pontos" no AutoCAD 2015



Fonte: elaboração da autora.

Figura 169 - Sobreposição da planta baixa (medição direta, em azul) com os modelos de superfícies (Fotogrametria Digital, em vermelho) com a "nuvem de pontos" (varredura a laser, em preto)



Fonte: elaboração da autora.

Inicialmente, foi feita a sobreposição dos seguintes produtos: desenho da planta baixa (pavimento térreo) obtida por medição direta, "estrutura de arame" do modelo de superfícies (só arestas externas) e "nuvem de pontos" obtida pela varredura a laser (Figura 169). De modo geral, verifica-se que os contornos dos três modelos estão bem próximos. As

maiores diferenças (destacadas em verde) coincidem com os pontos de difícil identificação nas fotos, que levaram a erros no modelo de superfície gerado no PhotoModeler (Fotogrametria Digital).

Foram feitas sobreposições também das elevações. Como a visualização da junção dos três modelos ficou confusa, decidiu-se fazer a comparação do modelo de "nuvem de pontos" separadamente, primeiro com as fachadas produzidas por medição direta e depois com o modelo de superfícies.

Na comparação da fachada lateral direita (Figura 170), produzida por medição direta, com a "nuvem de pontos", visualizada do mesmo ângulo, foram verificadas algumas diferenças destacadas em azul, como o deslocamento da porta lateral de acesso à nave e do telhado, e diferença da parede externa da sacristia e sanitário (lado direito), que foi desenhada com se estivesse no prumo¹⁵⁵, o que não se confirma no modelo de "nuvem de pontos", considerado o modelo mais preciso (representando a forma real da edificação), pelo rigor da técnica utilizada.

Figura 170 - Fachada lateral direita: sobreposição da "nuvem de pontos" com o desenho por medição direta



Fonte: elaboração da autora.

Na comparação da "nuvem de pontos" com o desenho da fachada frontal (por medição direta), as maiores diferenças referem-se ao posicionamento do cruzeiro (Figura 171).

¹⁵⁵ Como a fachada foi redesenhada (vetorizada posteriormente ao levantamento), não se sabe se o "erro" foi gerado no levantamento ou na vetorização.

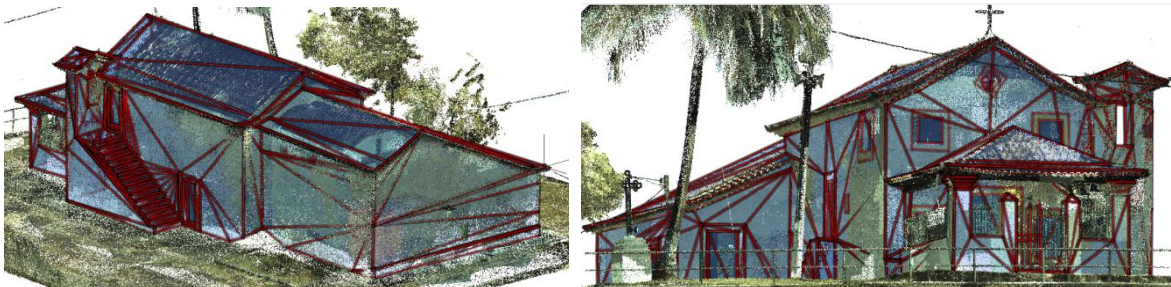
Figura 171 - Fachada lateral direita: sobreposição da "nuvem de pontos" com o desenho por medição direta



Fonte: elaboração da autora.

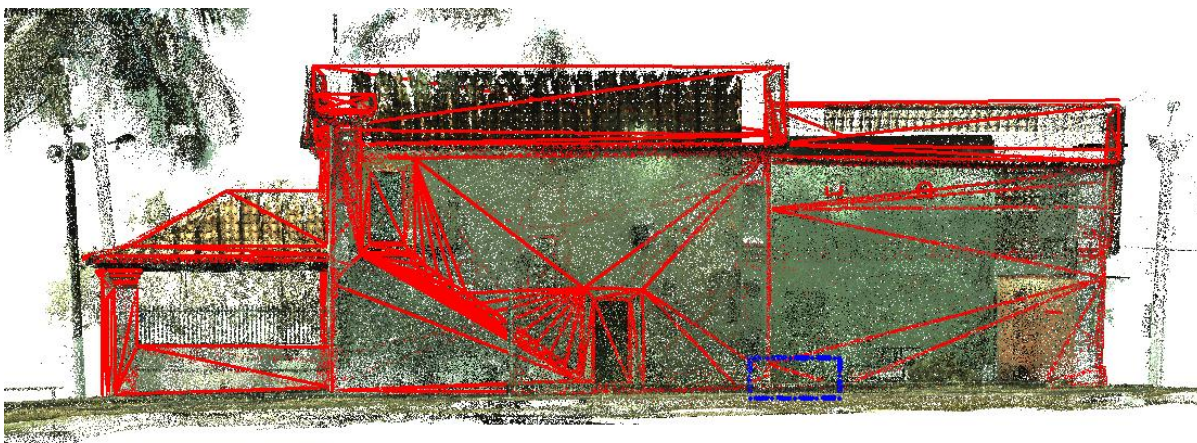
As Figuras 172, 173 e 174 ilustram as sobreposições dos modelos de superfície e de "nuvem de pontos", visualizados em perspectiva e em vistas ortogonais, mostrando grande coincidência entre os dois, com exceção de um trecho sinalizado em azul (Figura 173), que não pôde ser registrado corretamente pela fotogrametria digital, devido à presença de vegetação na época do levantamento.

Figura 172 - Sobreposição dos modelos de "nuvem de pontos" (texturizada) e de superfícies (em *wireframe*, cor vermelha)



Fonte: elaboração da autora.

Figura 173 - Fachada lateral direita: sobreposição dos modelos de "nuvem de pontos" e de superfícies (em *wireframe*, cor vermelha)



Fonte: elaboração da autora.

Figura 174 - Fachada principal: sobreposição dos modelos de "nuvem de pontos" e de superfícies (em *wireframe*, cor vermelha)



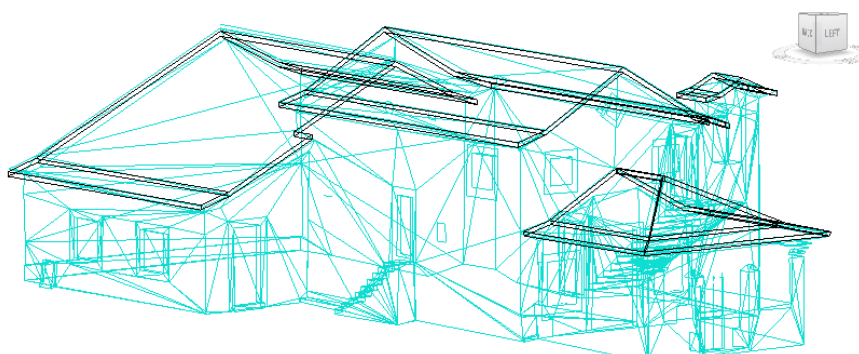
Fonte: elaboração da autora.

Apesar de algumas diferenças encontradas entre os modelos, a grande semelhança entre os mesmos e o registro das irregularidades dos elementos nos produtos obtidos pela Fotogrametria Digital, varredura a laser e medição direta, confirmam o rigor adotado nos três métodos de levantamento.

7.4 MODELAGEM BIM A PARTIR DE MODELOS DE SUPERFÍCIE

A primeira modelagem realizada no Revit utilizou como referência o modelo de superfícies produzido por Fotogrametria Digital. Decidiu-se gerar, inicialmente, um modelo simplificado, com baixo nível de detalhe, mas que pudesse incorporar as texturas fotorrealísticas produzidas no PhotoModeler, em 2004.

Figura 175 - Modelagem das coberturas (visualização em *wireframe*)



Fonte: elaboração da autora.

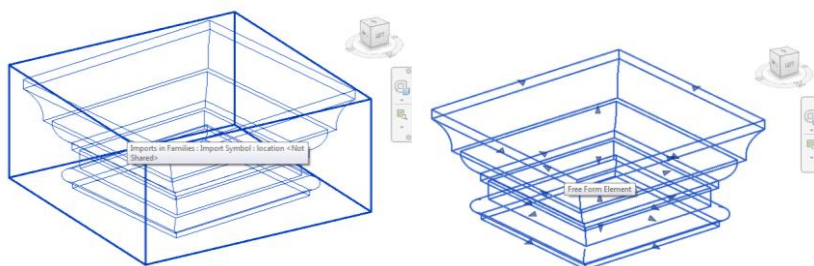
A modelagem começou pela cobertura, pois os limites seriam usados para a delimitação das paredes. Antes disso, foi necessária a criação dos planos de referência, passando pelos eixos

dos telhados. Foram modeladas as quatro coberturas (Figura 175), a partir de duas técnicas: *Roof by extrusion* (maior parte) e *sweep do model In-Place* (cobertura do alpendre).

Depois, iniciou-se a modelagem das paredes e escadas. O posicionamento das paredes foi feito em função do alinhamento médio das linhas do modelo de superfícies.

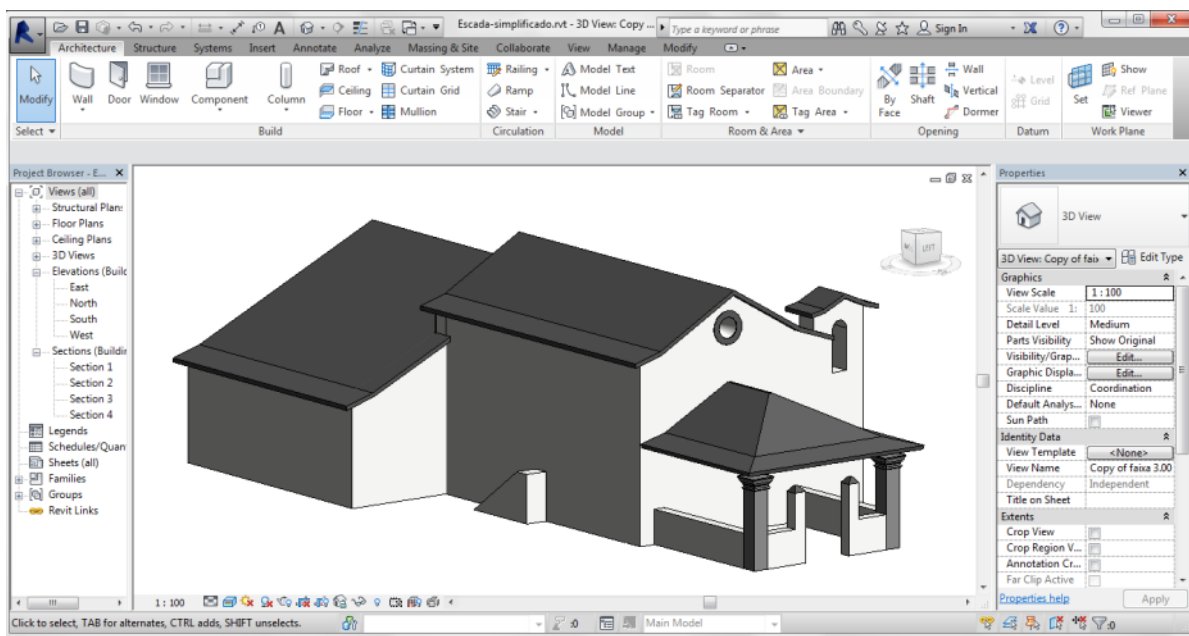
Em seguida, foram incorporados os detalhes principais. Os detalhes das pilastras foram modelados no AutoCAD e importados no Revit no modo "*Model In Place*", a partir da escolha da categoria "coluna". Depois da importação, foi necessário explodir o objeto para transformá-lo em um elemento "editável" do Revit, e permitir a atribuição de materiais. A Figura 176 ilustra as diferenças entre os objetos, antes (denominado "*Imports in Families*") e após usar o comando *explode* (chamado "*Free Form*").

Figura 176 - Detalhe do capitel da pilastra antes e após o comando *explode*



Fonte: elaboração da autora.

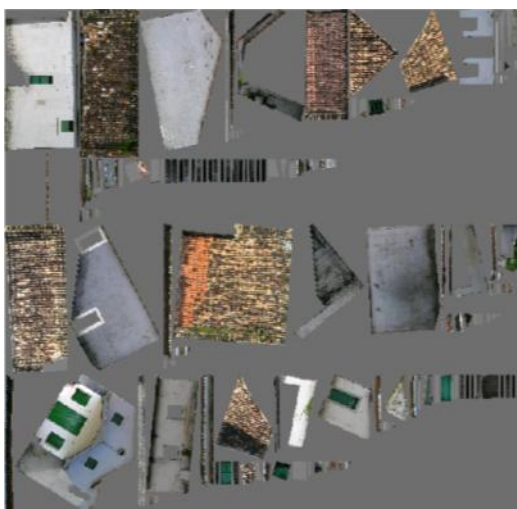
Figura 177 - Modelo simplificado gerado no Revit



Fonte: elaboração da autora.

Para aumentar o realismo do modelo gerado (Figura 177), decidiu-se aplicar os materiais específicos a cada elemento. Foi utilizado o arquivo de texturas gerado pelo PhotoModeler quando selecionado o formato VRML (bem como 3DS) para exportação, permitindo incluir o arquivo de imagem além do modelo geométrico. O arquivo JPG gerado tinha a resolução de 2.500 x 2.500 *pixels*, e continha as ortofotos de todas as superfícies (do exterior da capela) geradas no PhotoModeler (Figura 178).

Figura 178 - Arquivo JPG contendo as ortofotos de todas as superfícies do modelo do PhotoModeler



Fonte: elaboração da autora.

Foram recortadas e rotacionadas todas as texturas que seriam utilizadas no Revit. Em alguns casos, foi necessária a edição para melhorar a variação radiométrica existente entre as diferentes partes da ortofoto (Figura 179).

Figura 179 - (a) Seleção da textura da fachada principal; (b) rotação e edição da ortofoto



Fonte: elaboração da autora.

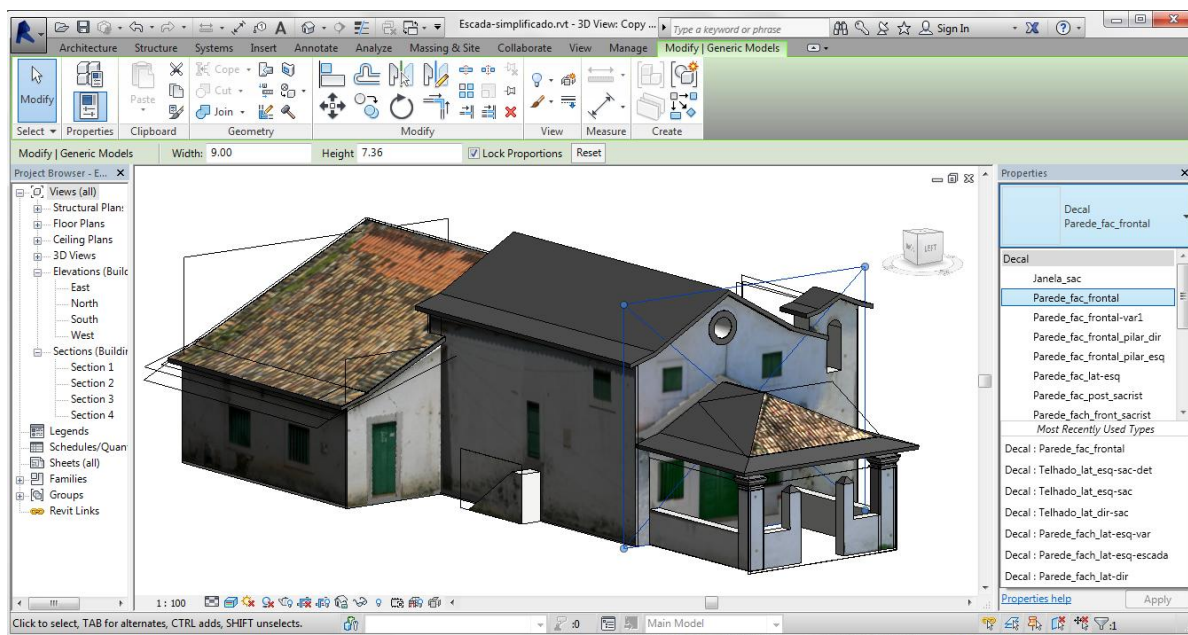
Foram testadas as diferentes formas de associar texturas aos elementos do Revit:

- *Decal* (ou decalque);

- criação de material e sua associação na caixa de propriedades para cada tipo de família;
- *Paint* (ou pintura).

O comando *Decal* é o método mais rápido e flexível de aplicação de texturas, dadas as facilidades de manipulação da imagem sobre a face do objeto. No entanto, essa forma só permite aplicar texturas em superfícies planas ou cilíndricas, visualizadas nos modos *Realistic* ou *Ray Trace* ou quando há "renderização" da cena. Na visualização "*Realistic*" tem-se o inconveniente de mostrar os contornos de todas as imagens, como pode ser visto na Figura 180.

Figura 180 - Texturas aplicadas com o *Decal*



Fonte: elaboração da autora.

Figura 181 - Associação da mesma textura em paredes do mesmo tipo



Fonte: elaboração da autora.

O segundo método aplica a textura a todos os elementos associados àquele material. É mais adequado quando se trata de uma textura composta por um padrão que se repete uniformemente. A Figura 181 ilustra um material (textura de uma fachada) aplicado a todas as paredes do mesmo tipo, gerando uma representação inadequada.

A terceira opção (*Paint*) é a mais adequada a esse caso, pois a aplicação da textura nos objetos é feita escolhendo-se o material e associando à face selecionada do objeto (Figura 182). Assim, não é necessário criar diversos tipos de paredes, só para alterar o material a ser aplicado. Entretanto, esse método exige mais tempo e cuidado do usuário no momento da “criação do material”, que deve atribuir as dimensões da imagem da textura (*width* e *height*) correspondentes às dimensões reais do objeto modelado, além de ajustes para o posicionamento correto no objeto.

Figura 182 - Uso do *Paint* para aplicação de materiais em paredes externas da capela



Fonte: elaboração da autora.

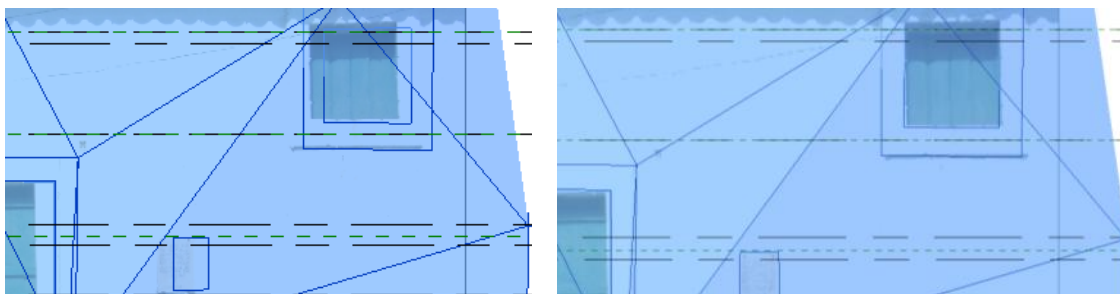
Apesar do material definido no *Paint*¹⁵⁶ não alterar a constituição do objeto, é possível distinguí-lo nas planilhas do Revit em determinados tipos de objetos (como paredes), através do parâmetro "*As Paint*". No entanto, o valor apresentado do volume é nulo, prevalecendo os valores definidos pelo material do tipo. Se utilizado em uma família de componente, o material aplicado com o *Paint* não aparece nas planilhas do Revit.

Para verificação do posicionamento da textura é importante que o modelo de superfícies (de referência) contenha o traçado das principais feições contidas nos planos das fachadas,

¹⁵⁶ O material aplicado pelo *Paint* aparece na listagem de quantitativo de material, como um material a mais constituinte da camada da parede. O valor da área dos materiais aplicados com o comando *Paint*, corresponde à área da superfície selecionada, e o valor do volume é nulo, uma vez que só é aplicado à superfície (espessura igual a zero) selecionada do objeto.

como os contornos das aberturas (Figura 183). Essas informações auxiliam a correta aplicação da textura, bem como se tornam uma base (ou referência) para a modelagem desses elementos, posteriormente.

Figura 183 - Sobreposição da textura com o modelo de superfície para correção de seu posicionamento



Fonte: elaboração da autora.

A aplicação de texturas permitiu transformar o modelo simplificado em uma representação fotorrealística com maior riqueza de detalhes, possibilitando a visualização das cores e texturas dos objetos, a identificação do estado de conservação e o mapeamento de dados. Além disso, esse modelo pode servir de base para a criação de modelos mais detalhados.

7.5 MODELAGEM BIM A PARTIR DE "NUVEM DE PONTOS"

Utilizou-se a "nuvem de pontos" gerada pela varredura a laser, como referência principal para a modelagem BIM da Capela de Nossa Senhora da Escada. Em algumas situações, foram usadas outras técnicas complementares, como a Fotogrametria Digital (*stricto sensu*) e o *Dense Stereo Matching* (DSM), visando a geração de outros produtos, como ortofotos de esquadrias e "nuvens de pontos" de alguns detalhes, respectivamente.

Durante toda a modelagem BIM realizada com o Revit 2015, foram utilizados, em paralelo, os seguintes programas¹⁵⁷:

- Autodesk ReCap (versão 1.31.39) - para manipulação, segmentação e exportação de trechos da "nuvem de pontos";
- Autodesk AutoCAD 2015 - para modelagem de sólidos e elaboração de desenhos auxiliares à criação de famílias de esquadrias e mobiliário;

¹⁵⁷ Programas instalados no Windows 7 de Notebook Intel Core i7 (segunda geração), CPU 2.00 GHZ, 6 GB de RAM, placa de vídeo NVIDIA GeForce GT 540M.

- Geomagic Studio 2012 - para manipulação, tratamento, processamento e exportação da "nuvem de pontos", visando a geração de outros produtos, como malhas TIN, superfícies NURBS e seções.

No primeiro momento, procurou-se realizar a segmentação da "nuvem de pontos" no Recap a partir da associação de trechos desse modelo a diferentes regiões (semelhantes ao conceito de *layers*) definidas e nomeadas interativamente pelo usuário. Imaginou-se que esse recurso permitiria facilitar a visualização dos diferentes tipos de objetos (paredes, terreno, cobertura, etc.) durante a modelagem no Revit.

Entretanto, verificou-se que além de ser extremamente lenta a tarefa de selecionar precisamente regiões específicas da "nuvem de pontos" (seguindo a delimitação irregular dos objetos), essa segmentação não podia ser visualizada no Revit, mas somente no AutoCAD. Desse modo, interrompeu-se o processo de segmentação (interativa) e partiu-se para a inserção no Revit da "nuvem de pontos" completa (exterior e interior) gerada por varredura a laser.

Foi utilizada a versão 2015 do Revit por permitir recursos de visualização da "nuvem de pontos" melhores do que na versão 2014, como a representação do modelo selecionado em tons mais claros da coloração dos pontos (e não em cor uniforme, como na versão 2014) e a visualização do recorte da "nuvem de pontos" realizado no Recap com o comando *Crop* (o que não acontecia na versão anterior, aumentando o tempo de processamento).

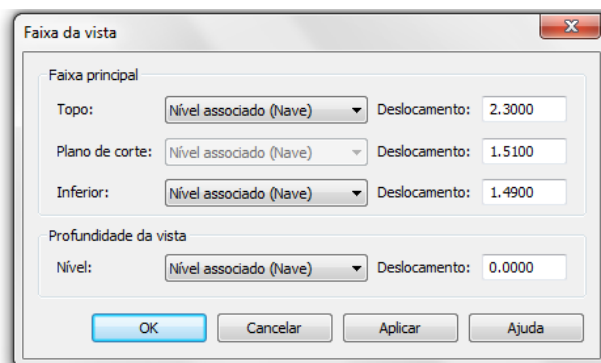
A seguir, são descritos os procedimentos gerais adotados para a modelagem BIM a partir da "nuvem de pontos".

7.5.1 Procedimentos gerais adotados

A modelagem foi iniciada com a importação da "nuvem de pontos" no Revit no mesmo sistema de coordenadas definido arbitrariamente no levantamento a laser. Realizou-se o bloqueio (*Fixar/Pin*) do modelo de "nuvem de pontos" para evitar seu deslocamento acidental.

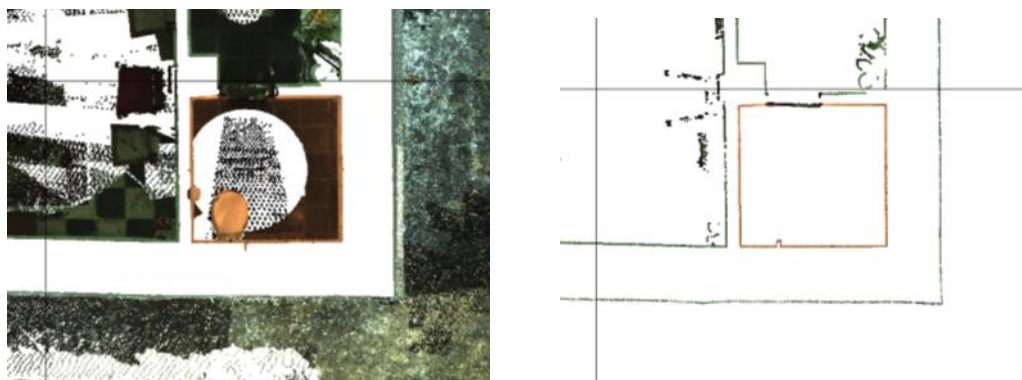
Foram criados diferentes níveis¹⁵⁸ que serviriam como referência para a modelagem dos diversos elementos construtivos (pisos, paredes, coberturas). Para visualizar as alturas dos objetos e permitir sua associação aos níveis correspondentes, foram criados alguns cortes passando por eixos de ambientes e escadas, cumeeiras e beirais dos telhados etc.

Figura 184 - Janela de definição dos valores de deslocamento dos planos que definem a faixa de vista, nesse caso, com profundidade de 2 cm (1.51 - 1.49 m)



Fonte: elaboração da autora.

Figura 185 - Mesmo trecho da "nuvem de pontos" visualizada com diferentes profundidades: 1,50 e 0,02 m, respectivamente



Fonte: elaboração da autora.

Os cortes foram criados com uma profundidade de vista de 2 cm, de modo a permitir a visualização de uma pequena faixa da "nuvem de pontos", com seção mais bem definida. O mesmo valor de 2 cm foi utilizado para a visualização das diferentes plantas baixas (associadas aos níveis). Para tanto, os valores da "faixa da vista"¹⁵⁹ (*View Range*) das plantas

¹⁵⁸ Os níveis são utilizados no Revit para diferentes funções. A função básica é a criação de pavimentos (associados a vistas: plantas de piso e de forro). No entanto, também podem ser utilizados para registro de diferentes alturas, ou como forma de associar objetos a um nível de referência.

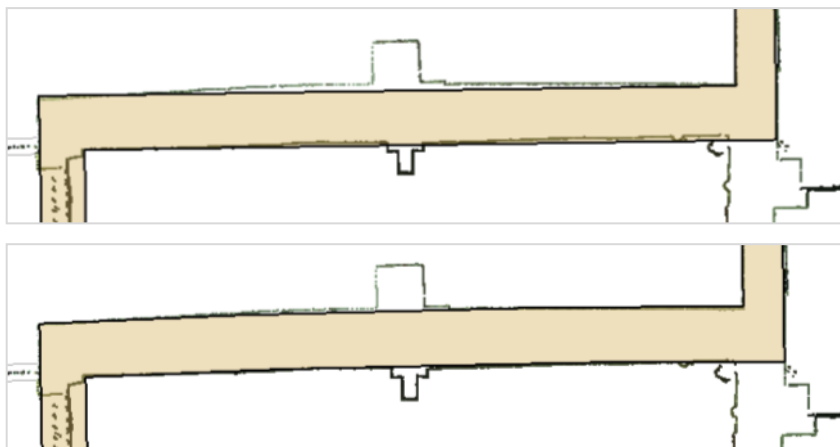
¹⁵⁹ A faixa da vista (ou faixa visível) está relacionada a visibilidade e exibição de objetos em cada vista em planta. A faixa principal é determinada por um conjunto de planos horizontais: "Topo", "Plano de corte" e "Inferior". Desses planos, somente o "Plano de corte" e o "Inferior" têm influência com o modelo de nuvem de pontos, definindo a faixa de visualização da "nuvem de pontos". A profundidade de vista, trecho definido abaixo da faixa de vista principal, que

baixas foram alterados para 1,51 m do "Plano de corte" e 1,49 m do "Inferior" (Figura 184). A Figura 185 ilustra a diferença na visualização do mesmo trecho da "nuvem de pontos", a partir de diferentes valores de profundidade definidas na faixa de vista.

Durante a modelagem das paredes, realizou-se a medição das espessuras das mesmas em três pontos (centro e extremidades), sendo adotada a medida correspondente à média dos valores. Em alguns casos, foi necessário observar a "nuvem de pontos" em diferentes níveis para que fosse possível visualizar e medir a espessura da parede, devido aos obstáculos existentes.

Para facilitar a visualização da sobreposição das paredes modeladas e da "nuvem de pontos", foi aplicada uma cor de preenchimento para as mesmas (Figura 186), configurado o estilo de visualização com um percentual alto de transparência e sem a representação das arestas de contorno. Em diversas situações, foi necessário desabilitar os *snaps*¹⁶⁰ para conseguir a edição de determinados ângulos.

Figura 186 - Parede da nave (fachada nordeste) modelada inicialmente com linha (acima), mas substituída por arco (abaixo) para melhor ajuste da forma visualizada na faixa da "nuvem de pontos"



Fonte: elaboração da autora.

Foram definidos tipos de paredes (do tipo genérica), associados às diferentes espessuras. Inicialmente, as paredes eram modeladas a partir de linhas (segmento de reta), tomando-se com referência o alinhamento da face externa da parede com a "nuvem de pontos". Quando

geralmente é usada para representação com linhas tracejadas (invisibilidade) de elementos de fundação, também não tem influência com o modelo de "nuvem de pontos".

¹⁶⁰ Ferramentas que permitem selecionar precisamente pontos específicos no objeto, como extremidades e pontos médios de linhas e arcos, pontos na "nuvem de pontos". Dentro dessas ferramentas, estão incluídos recursos para determinação de incremento de distâncias e ângulos, que podem limitar a criação de elementos em inclinações não estipuladas previamente.

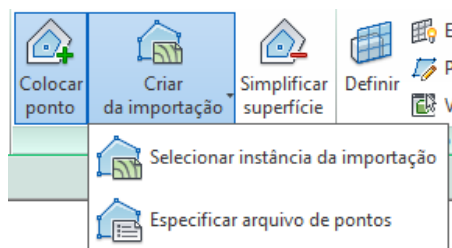
havia grandes discrepâncias, substituía-se as linhas por arcos (Figura 186) e, em outros casos, fazia-se o ajuste na espessura ou posicionamento da parede em relação à "nuvem de pontos".

A seguir, são descritos os experimentos realizados para a geração da superfície do terreno onde está implantada a capela. Na sequência, são abordados os processos de modelagem dos elementos construtivos em diferentes níveis de detalhe.

7.5.2 Modelagem do terreno

Foram experimentados diferentes processos para a geração da superfície do terreno no Revit: tanto a partir da colocação de pontos no próprio programa, como pela importação de curvas de nível ou arquivos de pontos (Figura 187).

Figura 187 - Comandos para modelagem de terreno no Revit



Fonte: Interface do Revit 2015.

A primeira tentativa, realizada sem sucesso, correspondeu ao traçado de curvas de nível diretamente no Revit, a partir do controle da "faixa da vista" para a obtenção de trechos de "nuvens de pontos" com 2 cm de espessura na horizontal. Realizava-se a mudança da faixa de vista associada ao valor da cota de cada curva. Os resultados parciais não foram satisfatórios, devido a áreas sem informação, a informações ambíguas e elementos que não correspondiam ao terreno, que confundiam o traçado. Esse teste foi interrompido, e partiu-se para experimentação de novos métodos, descritos a seguir:

1. inserção interativa de pontos cotados dentro do próprio Revit;
2. importação de arquivo de pontos produzido no AutoCAD;
3. importação de curvas de nível produzidas em outros programas (Geomagic Studio e AutoCAD);
4. importação de pontos inseridos sobre curvas de nível com uso de outros programas (Geomagic Studio e AutoCAD).

No primeiro experimento, para inserção interativa de pontos no próprio Revit, foi necessário obter as coordenadas tridimensionais de alguns pontos sobre a "nuvem de pontos". Como o Revit só permite identificar os valores de x, y e z de elementos próprios do programa, foi preciso utilizar o Recap¹⁶¹ para a leitura dos valores de z (cota) dos pontos, que iam sendo introduzidos no momento da colocação dos pontos. Para facilitar a correlação das cotas junto aos pontos colocados, selecionava-se pontos de fácil identificação sobre a "nuvem de pontos", como próximos a vértices ou com texturas específicas.

À medida em que os pontos eram introduzidos, a superfície do terreno era automaticamente produzida. Depois de analisada a sobreposição do modelo de terreno produzido junto à "nuvem de pontos", verificou-se a necessidade de inclusão de mais alguns pontos, em lugares específicos. Observou-se que a forma do terreno estava adequada e próxima ao modelo de "nuvem de pontos", sendo verificada uma diferença de 10 cm em alguns pontos.

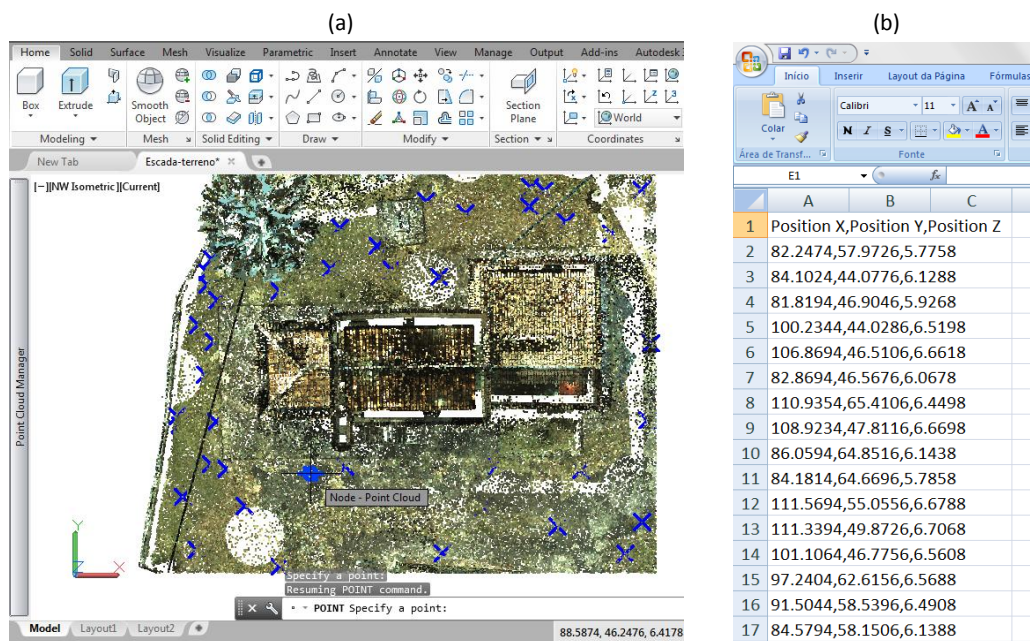
No segundo teste, utilizou-se o AutoCAD para a criação de novos pontos com uso do *snap "node point cloud"*. Dessa maneira, as coordenadas dos pontos gerados (elementos próprios do programa), coincidem com os valores x, y e z dos pontos correspondentes, selecionando precisamente sobre a "nuvem de pontos" (Figura 188a). As coordenadas desses pontos foram exportadas do AutoCAD para o formato CSV¹⁶² (Figura 188b), e depois inseridas no Revit, para a geração automática da superfície do terreno.

Apesar do segundo método permitir um resultado melhor (desvio máximo de 8 cm) e mais rápido do que o anterior, sentiu-se a necessidade de realização de outros testes visando a obtenção de modelo de terreno mais preciso e com maior "controle" da forma gerada. Para isso, era necessário realizar o processamento considerando toda a "nuvem de pontos" do terreno (e não somente pontos selecionados aleatoriamente), tal como realizado nos métodos 3 e 4.

¹⁶¹ Essa operação pode ser realizada também no Geomagic Studio e no AutoCAD.

¹⁶² Os pontos foram exportados do AutoCAD com o comando DATAEXTRACTION, não disponível na opção de exportação normal do programa.

Figura 188 - (a) Inserção de alguns pontos (em azul) sobre a "nuvem de pontos"; (b) valores das coordenadas tridimensionais dos pontos gerados no AutoCAD

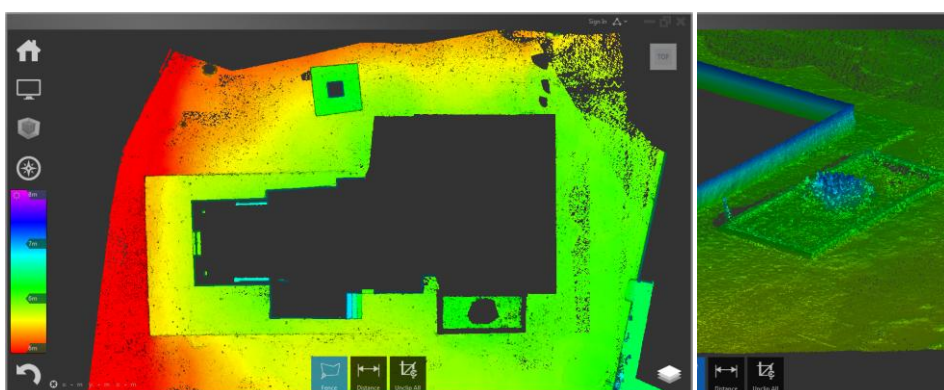


Fonte: elaboração da autora.

Para a realização dos **métodos 3 e 4**, foram utilizados três programas: Recap, Geomagic Studio e AutoCAD, antes da importação, no Revit, dos arquivos para a geração do modelo do terreno.

O Recap foi usado para a limpeza de pontos e conversão de formatos de dados, de modo a obter um modelo contendo somente a representação do terreno, e compatível com o Geomagic Studio. O processo de eliminação de pontos desnecessários foi lento, mas auxiliado com o recurso de visualização da "nuvem de pontos" no modo de cores do tipo "elevation" que permitia mostrar a variação da elevação dos pontos e destacar elementos não desejados, como vegetação, muretas e paredes (Figura 189).

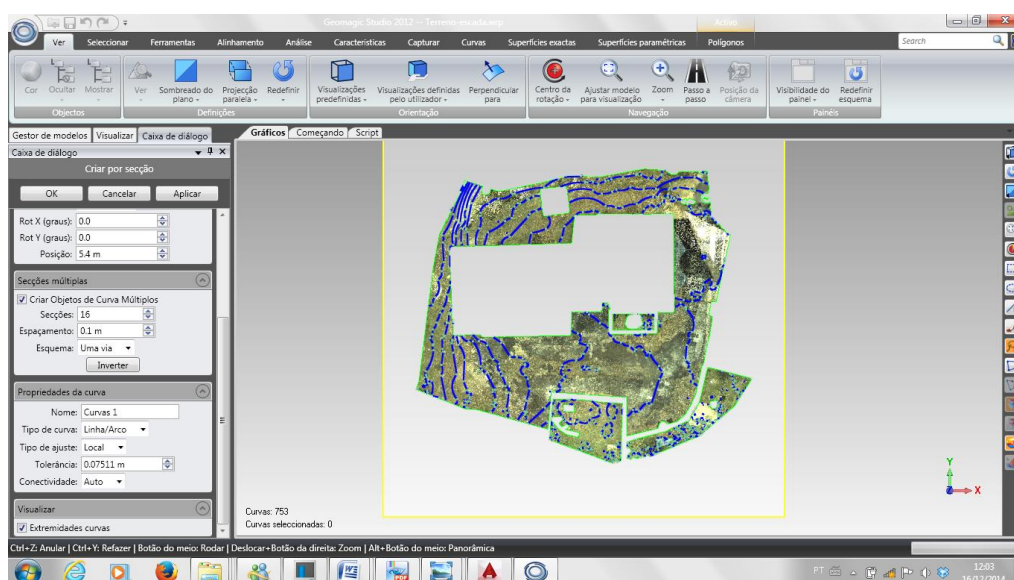
Figura 189 - Processo de limpeza no Recap para obtenção do modelo do terreno



Fonte: elaboração da autora.

O formato PTS foi o único exportado pelo Recap que abriu corretamente no Geomagic Studio. Inicialmente, foi realizado no Geomagic o processo de triangulação da "nuvem de pontos", e depois feito o seccionamento da malha triangular¹⁶³ por planos horizontais equidistantes de 0,10 m (Figura 190).

Figura 190 - Criação das curvas no Geomagic Studio



Fonte: elaboração da autora.

As curvas geradas no Geomagic Studio foram exportadas com sucesso para o AutoCAD somente no formato IGS¹⁶⁴. Não foi possível a importação das curvas geradas no Geomagic Studio diretamente no Revit, sendo necessária a intermediação do AutoCAD. Nessa etapa, foram testadas diferentes formas de utilização das curvas (métodos 3 e 4), uma vez que se verificou a necessidade de edição do arquivo importado no AutoCAD.

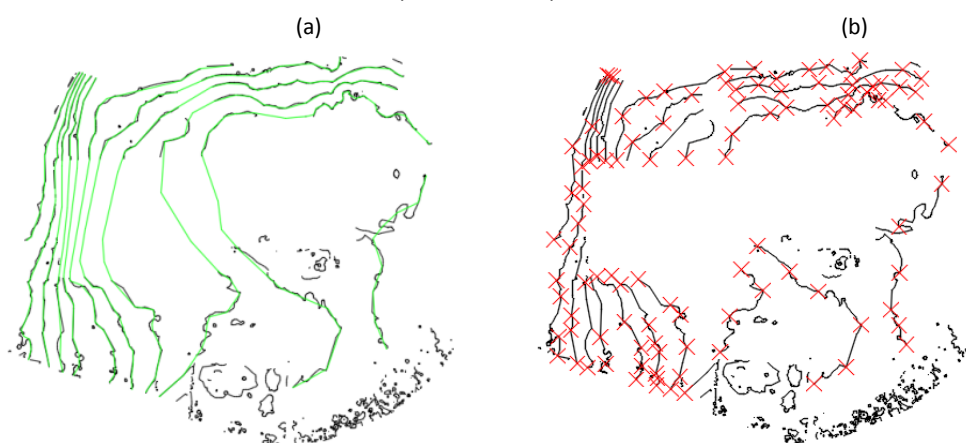
No método 3, foram traçadas polilinhas sobre as curvas importadas, visando a eliminação de ruídos e de contornos inadequados do terreno e a complementação das informações (Figura 191a). Gerou-se um arquivo contendo somente as novas curvas traçadas (polilinhas em verde), que foi importado pelo Revit para a modelagem do terreno. Apesar da obtenção de um modelo ainda mais preciso (desvio máximo observado de 2 cm) do que os anteriores, decidiu-se experimentar um método mais rápido e que não necessitasse de acréscimo de áreas sem informação (trecho de implantação da capela).

¹⁶³ É possível o seccionamento diretamente sobre a "nuvem de pontos", mas o resultado não foi adequado, apresentando muito ruído e contornos inadequados do terreno.

¹⁶⁴ Dos três formatos disponíveis para exportação de curvas (WRP, IGS, OBJ), obteve-se êxito somente com o IGS, quando habilitada a opção "Exportar ficheiro único".

No método 4, foram introduzidos alguns pontos¹⁶⁵ sobre curvas geradas no Geomagic Studio (Figura 191b). As coordenadas desses pontos foram exportadas para o formato CSV, e depois inseridas no Revit para criação do terreno (desvio máximo de 3 cm).

Figura 191 - Traçado interativo sobre curvas produzidas no Geomagic Studio (em preto): (a) Método 3 - criação de polilinhas para representação das curvas de nível (em verde); (b) Método 4 - introdução de novos pontos (em vermelho)



Fonte: elaboração da autora.

Os quatro métodos testados apresentaram diferenças significativas de tempo de processamento, recursos utilizados e precisão obtida (Quadro 21).

Quadro 21 - Comparação dos métodos utilizados para modelagem do terreno

	PONTOS INTRODUZIDOS	TEMPO TOTAL DO PROCESSO (min)	DESVIOS MÁXIMOS (cm)
MÉTODO 1	24	15	10
MÉTODO 2	52	5	8
MÉTODO 3	217	80	2
MÉTODO 4	105	70	3

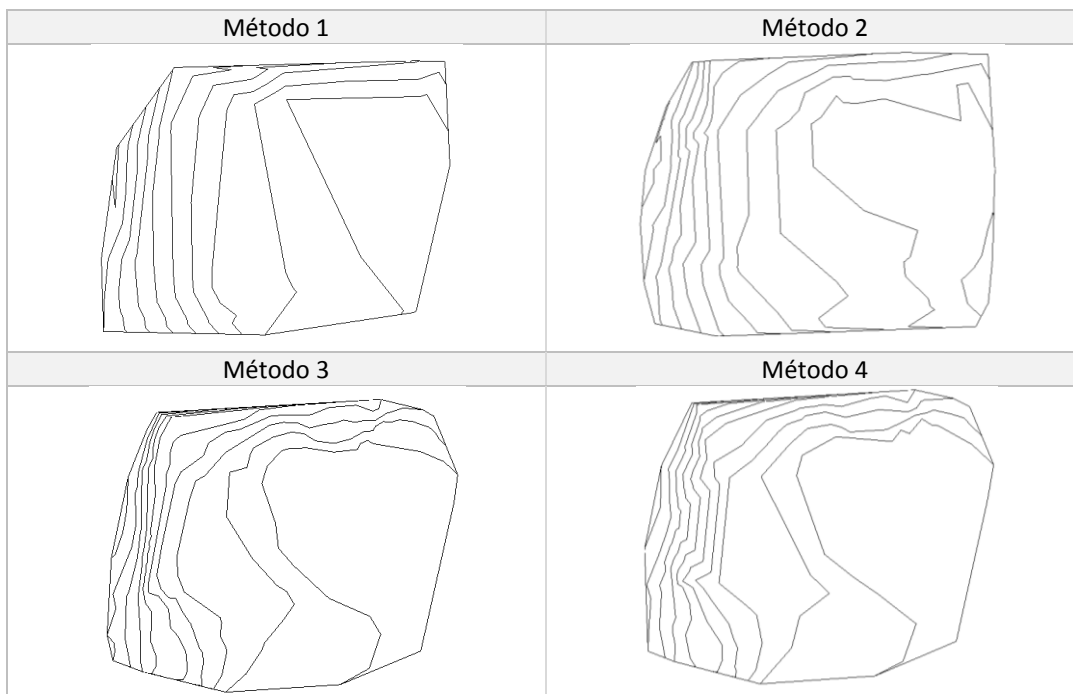
Fonte: elaboração da autora.

A partir da inspeção visual dos quatro modelos de terreno gerados (Figura 192) e, comparando-os com a "nuvem de pontos", verificou-se que os modelos mais precisos foram os obtidos a partir da importação das curvas de nível (métodos 3 e 4), que coincidiam com quase todos os pontos da "nuvem de pontos", sendo observado desvios máximos de 2 e 3 cm respectivamente, em pequenos trechos do terreno. Esses foram os processos mais demorados, que utilizaram uma maior quantidade de programas e maior número de pontos

¹⁶⁵ Os pontos introduzidos com comandos de precisão adquirem os valores das coordenadas dos trechos selecionados de cada curva, tal como realizado no método 2.

introduzidos (seja para objetos do tipo polilinhas ou pontos), sendo adequados para aplicações em escalas grandes e com maior nível de detalhamento.

Figura 192 - Modelos de terreno gerados no Revit a partir dos diferentes métodos utilizados



Fonte: elaboração da autora.

Nos dois primeiros métodos, foram verificadas maiores variações do modelo gerado em função da localização e quantidade dos pontos selecionados, tendo-se menor controle do resultado, uma vez que os pontos inseridos foram aleatórios e em menor quantidade.

Apesar da automatização na geração das curvas no Geomagic Studio, verificou-se que é imprescindível a intervenção humana na correção ou redesenho das mesmas para a geração de produtos adequados. É interessante o seccionamento do modelo a partir de planos horizontais próximos (nesse caso 10 cm) para maior precisão na criação do terreno.

Na próxima seção, são tratados aspectos específicos relacionados à modelagem dos elementos construtivos com uso de diferentes níveis de detalhamento e precisão.

7.5.3 Diferentes níveis de detalhe adotados

O objetivo principal do experimento consistia na criação do modelo BIM da Capela de Nossa Senhora da Escada a partir de "nuvem de pontos", visando o estabelecimento de métodos e procedimentos de modelagem adequados a diferentes níveis de detalhe e aplicações,

permitindo associar as características específicas de determinados elementos construtivos à escala da representação gráfica, técnica de levantamento adotada e finalidade do modelo.

Quadro 22 - Classificação dos modelos BIM de edificações existentes em cinco níveis de detalhe

	NÍVEL 1	NÍVEL 2	NÍVEL 3	NÍVEL 4	NÍVEL 5
Escala	1/500	1/200	1/100	1/50	1/20
Afastamento máximo de pontos na "nuvem de pontos" (mm)	75	30	15	5	3
Desvio máximo para modelagem dos elementos principais (mm)	200	100	50	25	10
Desvio máximo para modelagem de detalhes (mm)	-	-	20	10	4
Elementos modelados	Volumetria externa, contemplando paredes e coberturas.	Modelagem simplificada dos principais elementos construtivos do exterior e interior: paredes, pisos, escadas, pilares, forros, e aberturas de portas e janelas. Modelagem do terreno. Identificação das paredes: interior e exterior. Inclusão dos parâmetros sobre desvios de modelagem.	Inclusão de detalhes de elementos básicos. Uso preferencial de famílias existentes. Criação de famílias em baixo nível de detalhe, quando necessário.	Inclusão de elementos detalhados e mobiliário. Criação de famílias em médio nível de detalhe. Descrição de materiais de acabamento dos principais elementos construtivos. Nova modelagem dos elementos com desvios superiores aos máximos.	Criação de famílias em alto nível de detalhe. Inserção de informações semânticas associadas aos elementos construtivos. Associação de arquivos de imagens. Aplicação de texturas fotorealísticas em trechos relevantes.
Finalidade do modelo	Planejamento inicial do projeto de documentação. Identificação de áreas prioritárias. Visualização da edificação no contexto urbano. Utilização em sistemas de informações geográficas.	Estimativa de áreas e volumes para diversas finalidades, como manutenção e estudo de viabilidade.	Modelo base para ser exportado para programas de gerenciamento de <i>facilities</i> . Planejamento funcional. Base para pequenas intervenções na edificação.	Documentação arquitetônica de edificações de interesse histórico-cultural. Base para projetos de intervenção.	Documentação arquitetônica de edificações de interesse histórico-cultural. Monitoramento estrutural. Base para projetos de intervenção mais complexos.

Fonte: elaboração da autora.

Foi elaborado um quadro geral (Quadro 22), usado como referência para a modelagem BIM em cinco níveis de detalhe. Para sua elaboração, utilizou-se a bibliografia citada nos capítulos 2 e 5, relativa a níveis de detalhe e precisão em documentação arquitetônica, associados à finalidade do modelo. Diversos valores foram ajustados, visando uma coerência maior entre as diferentes fontes bibliográficas e escalas de representação. Além disso, há detalhamento e proposição de elementos a serem modelados e incluídos em cada nível de detalhe, fazendo-se associações com possíveis aplicações de cada tipo de modelo.

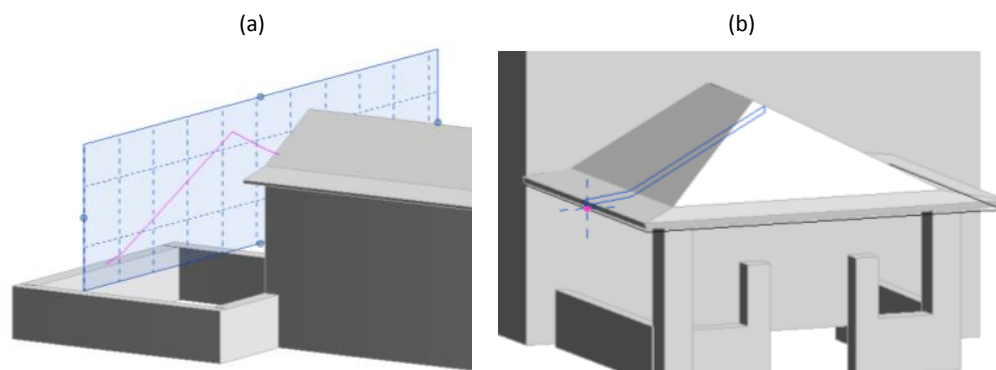
A seguir, são descritos os procedimentos adotados para a modelagem da capela nos cinco níveis de detalhe propostos, partindo-se do menor (nível 1) e acrescentando ou modificando as informações para os níveis subsequentes.

7.5.3.1 Nível 1

O nível de detalhamento mais baixo consistiu na modelagem do exterior da edificação, contemplando paredes (sem aberturas) e coberturas. Foram adotados todos os procedimentos descritos no item 7.5.1.

A modelagem foi iniciada pela inserção das paredes, tendo-se o cuidado de identificar a forma (linear ou curva) e a espessura da parede que mais se aproximasse à "nuvem de pontos", evitando ou minimizando a necessidade de substituição das mesmas em níveis mais detalhados. Essa precisão na modelagem foi possível, uma vez que utilizou-se uma "nuvem de pontos" densa, adequada para os maiores níveis de detalhamento.

Figura 193 - Traçados dos perfis das coberturas (a) extrusão, usada na maior parte dos telhados; (b) varredura do perfil para a modelagem do telhado do alpendre



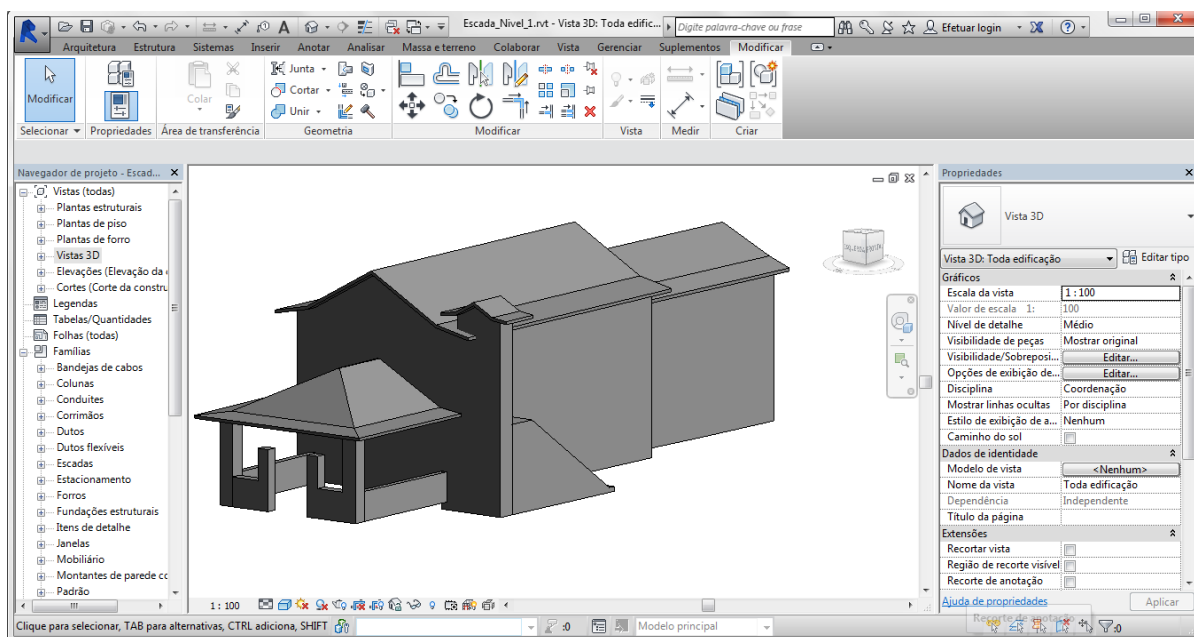
Fonte: elaboração da autora.

Para a modelagem das coberturas, foram criados planos de referência no eixo de cada telhado que, quando visualizados em corte (pequena faixa da "nuvem de pontos"), permitiam a criação dos contornos a serem usados para realizar a extrusão (na maior parte dos telhados) e para a varredura da modelagem no local (*model In-Place*) na cobertura do alpendre (Figura 193).

Como a "nuvem de pontos" da cobertura apresentava áreas sem informações (que não puderam ser levantadas devido à altura elevada), foi necessário, em alguns momentos, mudar a localização do corte para melhorar a visualização desses trechos do telhado e permitir uma modelagem mais precisa. No caso do telhado da torre sineira, foi necessário espelhar o perfil traçado, devido à falta de dados na "nuvem de pontos".

Ao final, obteve-se o modelo simplificado da capela (Figura 194). A representação é compatível com a escala 1/500, mas o nível de precisão obtido é bastante superior (ao estipulado para essa escala), dada à densidade da "nuvem de pontos" utilizada e o cuidado na modelagem dos elementos, visando um maior aproveitamento dos mesmos para os níveis mais detalhados.

Figura 194 - Modelagem da capela no nível 1 de detalhe



Fonte: elaboração da autora.

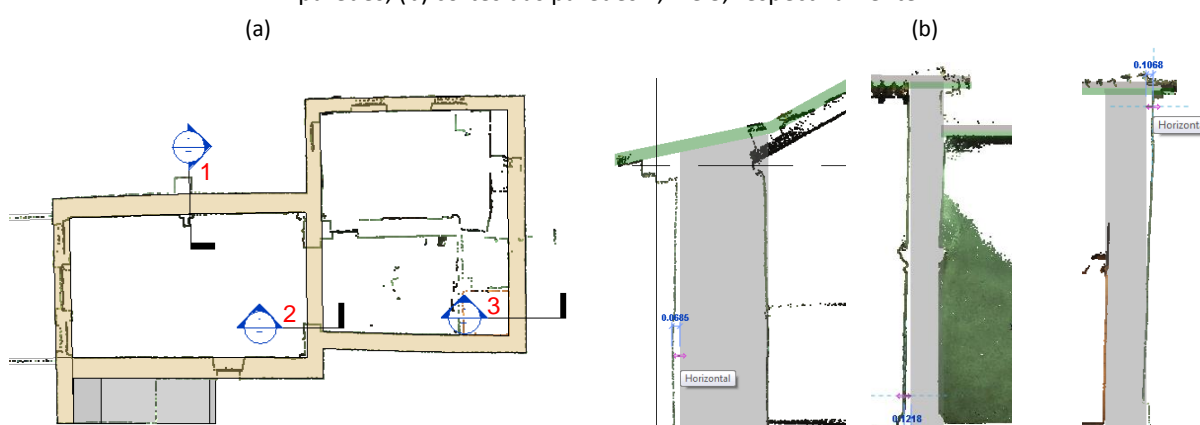
7.5.3.2 Nível 2

Para a modelagem no nível 2, foram incluídos os seguintes elementos construtivos: paredes internas, pisos, escadas, pilares, forros, aberturas de portas e janelas.

Como o nível 2 requer maior precisão do que o anterior (estipulado em 10 cm o valor máximo de desvio), a primeira tarefa foi a verificação dos elementos modelados, através da sobreposição com a "nuvem de pontos", visualizada em diferentes seções, tanto em plantas baixas, como em cortes.

Os maiores desvios foram 6.8, 12.1 e 10.7 cm verificados nas paredes 1, 2 e 3 (Figura 195). As diferenças encontradas aconteceram devido às irregularidades presentes nas paredes da capela (barrigas, diferenças de espessura e inclinações), que só poderiam ser "corrigidas" se criados outros tipos de modelos, não mais através das famílias de paredes de sistema do Revit.

Figura 195 - Paredes que apresentaram os maiores desvios horizontais: (a) planta baixa com indicação das paredes; (b) cortes das paredes 1, 2 e 3, respectivamente



Fonte: elaboração da autora.

Apesar dos dois últimos valores ultrapassarem o limite estipulado para o nível 2, decidiu-se manter as paredes criadas anteriormente. Foram dois os motivos principais que determinaram essa decisão: as diferenças encontradas não estavam tão distantes do máximo estipulado e uma nova modelagem não se justificava para esse nível de detalhamento.

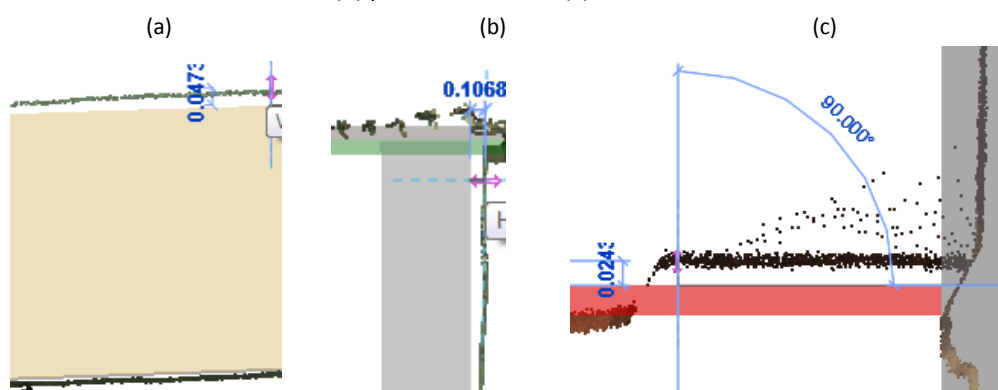
Como forma de registrar essas discrepâncias, decidiu-se criar parâmetros compartilhados que permitissem armazenar os valores de desvios máximos encontrados. Além da inclusão desses parâmetros nos elementos já existentes, adotou-se o mesmo procedimento para os

novos elementos criados, que ultrapassassem os desvios estipulados para esse nível de detalhe. Essas informações seriam importantes, inclusive, para identificação dessas paredes na modelagem da capela nos próximos níveis de detalhe.

Foram criados três parâmetros compartilhados, adicionados ao grupo "Dados de identidade":

- **Desvio horizontal máximo** - para registro de discrepâncias de elementos construtivos quando visualizados em planta baixa. Como exemplo mais comum pode ser citada a variação de espessura da parede, pequenas curvaturas ou irregularidades que divergem do elemento modelado (Figura 196a);
- **Desvio lateral máximo** - para registro de discrepâncias dos elementos quando vistos em corte ou elevação, como paredes fora do prumo ou com variações de espessura (Figura 196b).
- **Desvio vertical máximo** - para registro de discrepâncias dos elementos horizontais ou inclinados, como pisos, forros (Figura 196c) ou telhados, quando vistos em corte ou elevação.

Figura 196 - Exemplos de desvios horizontais, laterais e verticais, respectivamente: (a) parede vista em planta baixa; (b) parede em corte; (c) forro em corte



Fonte: elaboração da autora.

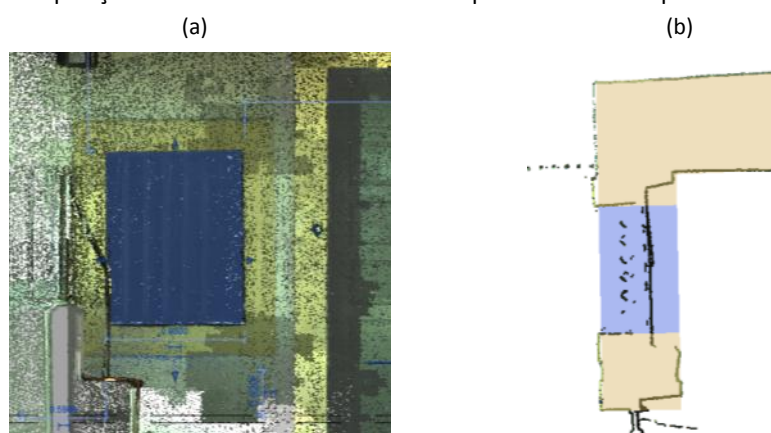
Depois da análise dos elementos modelados no nível anterior e da atribuição dos valores dos desvios, realizou-se a modelagem do terreno através do "método 1"¹⁶⁶ (descrito no item 7.5.2). Depois, foi modelado o passeio, dividido em três áreas, devido às mudanças de inclinação.

¹⁶⁶ Método testado no momento da criação do modelo no nível de detalhe 2.

Em seguida, foram modeladas as paredes internas. As paredes internas e externas eram identificadas tanto pela função escolhida no tipo, como pela nomenclatura utilizada, que contemplava a fase (CADASTRO), o tipo de parede e sua espessura (exemplo: CADASTRO-interna_0.16m).

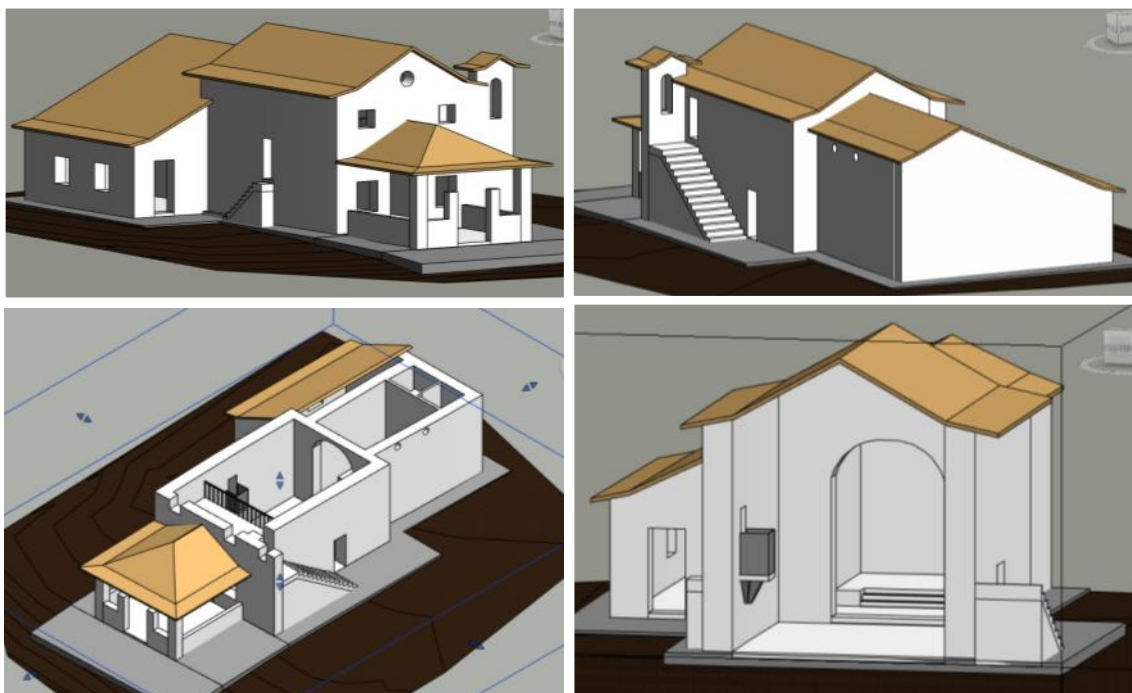
Depois, foram modelados, de modo simplificado, pisos, escadas, forros, púlpito, guarda-corpo do coro e inseridas as aberturas.

Figura 197 - (a) Ajuste do elemento "abertura de parede" (em azul) a partir da visualização das fachadas; (b) sobreposição da abertura com a "nuvem de pontos" vista em planta baixa



Fonte: elaboração da autora.

Figura 198 - Diferentes ângulos do modelo com nível de detalhe 2, tanto do exterior como do interior

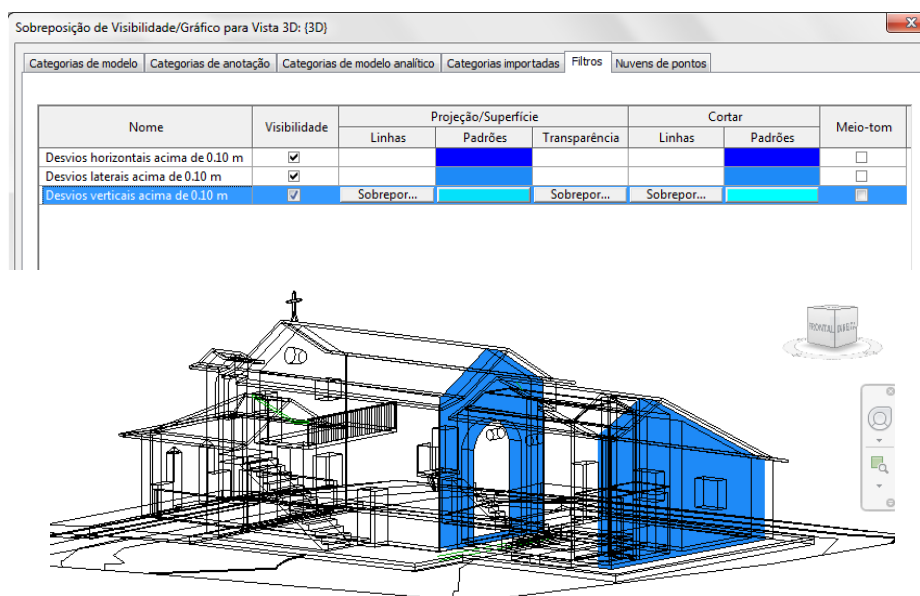


Fonte: elaboração da autora.

A criação das aberturas das paredes foi realizada a partir do ajuste interativo do elemento "abertura da parede" em relação ao modelo de "nuvens de pontos". Depois, verificava-se na caixa de propriedades se o nível associado da abertura estava correto e realizava-se a aproximação dos valores. As aberturas das fachadas foram criadas a partir da visualização do exterior, apresentando diferenças em relação ao interior, devido à simplificação das mesmas em relação à forma real (Figura 197). O modelo completo gerado nesse nível pode ser visto na Figura 198.

Ao final, foram criados filtros para visualização dos desvios observados na modelagem, a partir da comparação visual entre elementos modelados e a "nuvem de pontos". A Figura 199 ilustra a janela com os três filtros criados, visando a substituição da representação existente por cores sólidas (em tons de azul) para destacar elementos com desvios acima dos estipulados para esse nível.

Figura 199 - Criação de filtros para visualização dos desvios



Fonte: elaboração da autora.

7.5.3.3 Nível 3

Apesar de terem sido detectadas duas paredes modeladas com desvios acima dos estipulados para os níveis 2 e 3, decidiu-se a manutenção das mesmas, com a indicação dos valores dos desvios em suas propriedades.




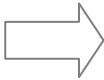
A modelagem do nível 3 demandou um tempo bem superior aos dois níveis anteriores. Um dos fatores de maior relevância foi a inexistência de componentes de esquadrias e outros

detalhes construtivos próximos ou compatíveis com os observados na Capela de Nossa Senhora da Escada. Nesse sentido, foi necessário desenvolver métodos para possibilitar a criação de famílias de componentes em diferentes níveis de detalhe e com uso de diferentes recursos.

O primeiro componente modelado foi a janela, por ser o elemento que mais se repetia na edificação, apesar das variações nas dimensões e da presença/ausência de grade. Verificou-se que seria interessante modelá-la no editor de famílias e adicionar parâmetros para permitir a realização de ajustes no momento da inserção.

Como a base utilizada para sua criação era o modelo de "nuvem de pontos", que não pode ser inserido no editor de famílias do Revit, foram testadas algumas alternativas, descritas no Quadro 23.

Quadro 23 - Alternativas para utilização da "nuvem de pontos" na criação de objetos no editor de famílias do Revit

ALTERNATIVAS TESTADAS		OBSERVAÇÕES
realizar as medições sobre a "nuvem de pontos" (no ambiente de projeto do Revit ou no AutoCAD) e adicionar as medidas no editor de famílias		método lento, não permite comparações, sendo adequado para formas muito simples
gerar linhas de modelo no ambiente de projeto e copiar para o ambiente de criação de famílias		dificuldade para comparação de diferentes tipos, e em diferentes vistas, e necessidade de selecionar as linhas e apagá-las posteriormente
exportar trecho da "nuvem de pontos" como DXF e importá-lo no editor de famílias do Revit		necessidade de criação de arquivos separados em DXF para cada objeto de interesse, perda do atributo cor (importante na identificação dos elementos), manipulação extremamente lenta, uma vez que o arquivo é transformado em pontos do AutoCAD
traçar as feições principais dos objetos no AutoCAD		facilidade na criação dos desenhos em diversas vistas e possibilidade de sobreposição do traçado em diferentes trechos da "nuvem de pontos" para comparações (método adotado)

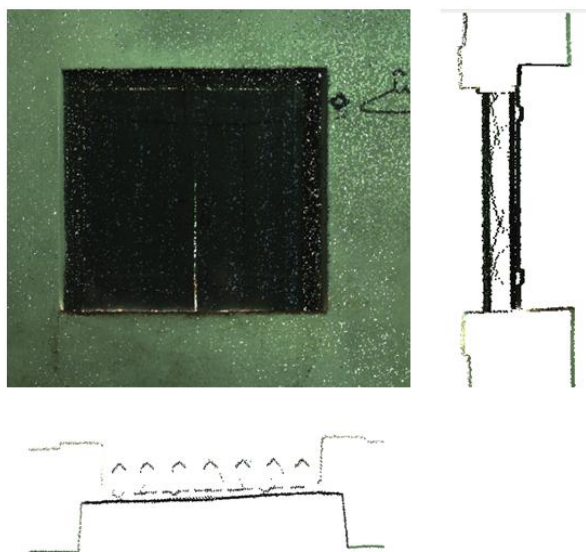
Fonte: elaboração da autora.

Dentre as alternativas testadas, identificou-se que a melhor forma para a elaboração de objetos no "Editor de Famílias" foi através do desenho preliminar realizado no AutoCAD. Esse modo permitiu realizar o traçado diretamente no arquivo base (com a "nuvem de pontos" completa), sem necessitar gerar diversos arquivos independentes (em outros

programas) contendo trechos de interesse, uma vez que os recortes realizados sobre a "nuvem de pontos", foram feitos com comandos de visualização (*crop*) do AutoCAD. Além do mais, a elaboração de desenho no AutoCAD possibilitou sua colocação sobre outras janelas, para análise dos elementos que apresentavam variações nas dimensões.

A "nuvem de pontos" por varredura a laser representou uma base importante de informações para a representação das esquadrias, principalmente com relação à visualização em planta baixa e cortes (Figura 200). Apesar da "nuvem de pontos" obtida nesse levantamento permitir o traçado das feições dos planos principais das janelas (vistas internas e externas), verificou-se que seria mais interessante a utilização de ortofotos, geradas por fotogrametria digital, por permitir uma melhor visualização dos detalhes vistos nas elevações. As ortofotos foram geradas no PhotoModeler através da monorrestituição digital¹⁶⁷ (Figura 201).

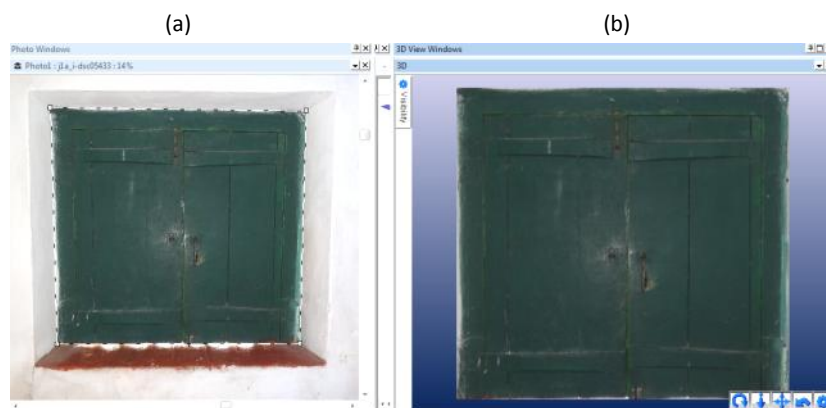
Figura 200 - Visualização de trechos da "nuvem de pontos" da janela: planta baixa, vista do interior e corte



Fonte: elaboração da autora.

¹⁶⁷ Tipo de restituição da fotogrametria digital mais simples e rápido, que pode ser utilizado em objetos planos. Processo baseado na identificação de características geométricas em uma única fotografia. Nesse caso, foram identificados os eixos (x e z) das arestas da esquadria para obtenção da ortofoto. Essa técnica foi descrita brevemente na seção 2.3.6, mas pode ser vista detalhadamente em Groetelaars (2004).

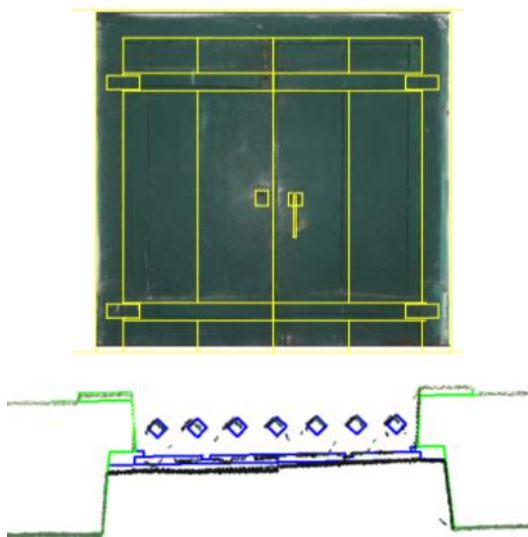
Figura 201 - Processo da restituição no PhotoModeler: (a) foto com arestas identificadas; (b) ortofoto gerada



Fonte: elaboração da autora.

Desse modo, a "nuvem de pontos" foi utilizada como base para o traçado da janela em planta baixa e em corte, e a ortofoto como referência para o traçado das vistas (internas e externas), conforme ilustrado na Figura 202. Apesar da importância desse material, sentiu-se a necessidade de utilização de esboços realizados no local, que permitiram entender melhor o funcionamento das esquadrias, o encaixe das peças e outros elementos que não puderam ser registrados por varredura a laser nem por fotogrametria digital.

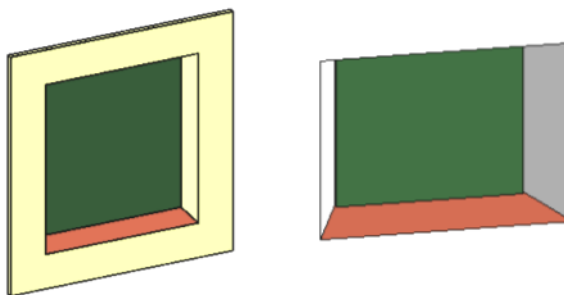
Figura 202 - Traçado das feições da janela a partir da vista interna (ortofoto) e da planta baixa ("nuvem de pontos")



Fonte: elaboração da autora.

Foram criados três conjuntos de desenhos, adequados aos três níveis de detalhe (baixo, médio e alto). Os desenhos foram importados no editor de famílias do Revit, sendo criada inicialmente, para o nível 3, a janela com baixo detalhamento, sem divisão das folhas e sem grade (Figura 203).

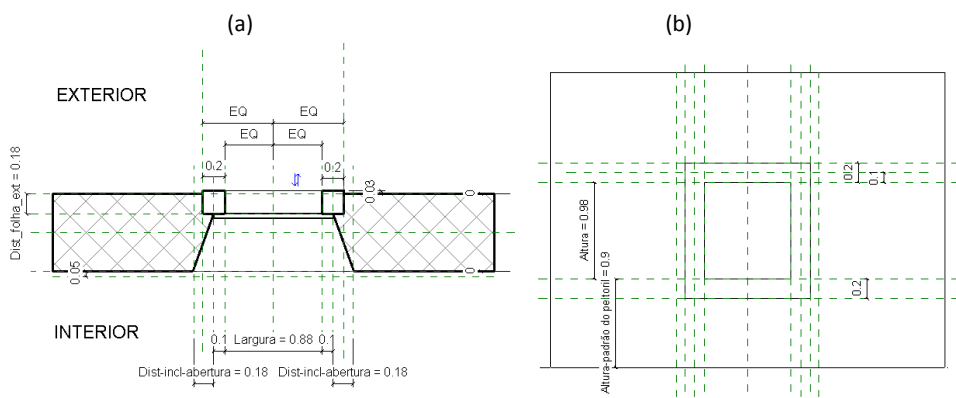
Figura 203 - Família de janela utilizada para o nível 3: exterior e interior, respectivamente



Fonte: elaboração da autora.

Foram criados parâmetros para todos os elementos que apresentavam variações, como largura e altura, inclinação da abertura interior (parametrização sobre o volume vazio de recorte da parede) e distância da folha em relação à face externa (Figura 204).

Figura 204 - Janela no "Editor de famílias" do Revit: (a) planta baixa; (b) vista externa



Fonte: elaboração da autora.

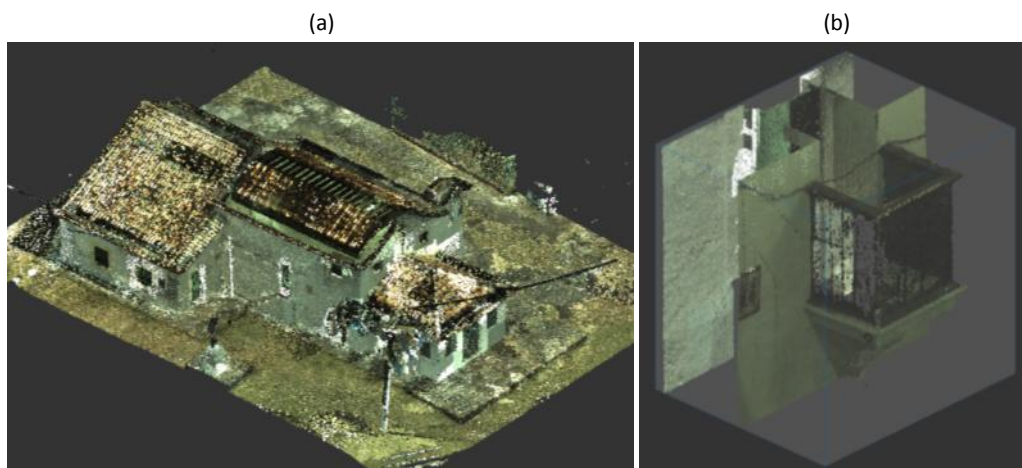
Para a representação de objetos de média complexidade¹⁶⁸, sem repetição ou variações de parâmetros, foram utilizados os recursos da modelagem no local (*Model In-Place*). Dessa forma, era possível a utilização da "nuvem de pontos" diretamente no Revit, como referência para a modelagem. Como o arquivo contendo toda a edificação era "muito pesado" e a "nuvem de pontos" completa demandava bastante tempo para regeneração, decidiu-se trabalhar com um arquivo novo, contendo somente o elemento que tinha

¹⁶⁸ Considerou-se objetos de média complexidade, aqueles que podem ser gerados através de um conjunto de comandos de modelagem, como extrusão, revolução ou varredura de perfis, incluindo a possibilidade de subtração de volumes. Os objetos definidos de alta complexidade têm formas irregulares, que só podem ser obtidos a partir de comandos do tipo *loft*, com base em diferentes seções, e/ou a partir de um conjunto exaustivo de operações (edição de vértices, subtração de diversos volumes, etc.) que visam uma aproximação da forma real.

"contato direto" com o objeto a ser modelado¹⁶⁹. O uso de arquivo novo (vazio) facilitava a criação de cortes, planos de trabalho e permitia maior agilidade na modelagem.

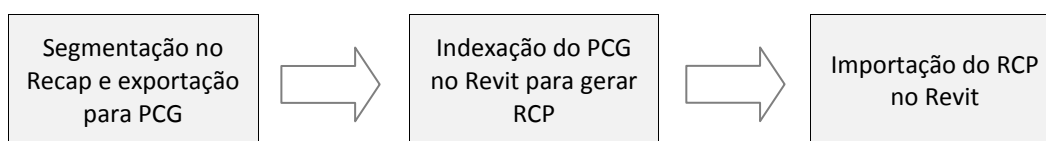
Um exemplo de objeto modelado com esse método foi o púlpito. Inicialmente, foi necessário recortar, no Recap, a área de interesse sobre a "nuvem de pontos" completa. Para isso, utilizou-se o *limit box* para isolar a visualização do púlpito (Figura 205) e permitir a exportação no formato PCG¹⁷⁰ da área contida nesse prisma. Para a inserção da "nuvem de pontos" no Revit, é necessário realizar a indexação, etapa realizada automaticamente pelo programa para conversão do formato PCG em RCP. O processo¹⁷¹ de inserção da "nuvem de pontos" segmentada no Revit está resumido na Figura 206.

Figura 205 - Processo de recorte da área de interesse no Recap: (a) toda a nuvem de pontos; (b) trecho do *limit box* contendo o púlpito



Fonte: elaboração da autora.

Figura 206 - Processo para inserção da "nuvem de pontos" segmentada no Revit



Fonte: elaboração da autora.

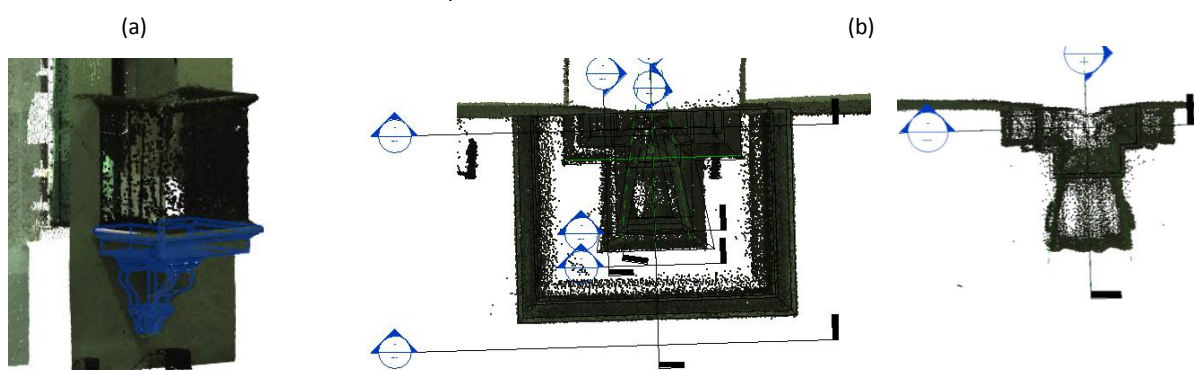
¹⁶⁹ A presença do elemento com "contato direto" ao objeto a ser modelado é relevante, uma vez que se trata de uma edificação que apresenta paredes com inclinações (que fogem aos alinhamentos horizontais e verticais) e variações nos valores das espessuras, que dificultam o posicionamento de objetos quando não há referência comum.

¹⁷⁰ Se o arquivo for salvo no formato próprio do Recap (formato RCP), o programa cria uma pasta temporária (SUPPORT) contendo a "nuvem de pontos" completa (arquivo original "muito pesado", no formato RCS). Além disso, quando o arquivo RCP é importado em alguns programas, como o AutoCAD, o recorte realizado é ignorado.

¹⁷¹ Esse processo poderia ser simplificado se não houvesse problemas na exportação (interrompida pelo programa) para o formato RCS, compatível com o Revit e o AutoCAD.

A importação do arquivo RCP no Revit foi realizada considerando-se o mesmo sistema de coordenadas do arquivo original, para garantir, posteriormente, a inserção correta do objeto modelado no arquivo principal (completo) do modelo da edificação. A Figura 207 ilustra o trecho da "nuvem de pontos" inserida no Revit (em perspectiva e em planta baixa) para a modelagem do púlpito, junto aos elementos criados de apoio à modelagem: planos de referência (para traçado das feições e identificação de eixos de simetria) e cortes em diferentes inclinações. Além disso, foram controlados os valores de faixa de vista para permitir a visualização adequada das seções características dos diversos elementos que compõem a base do púlpito.

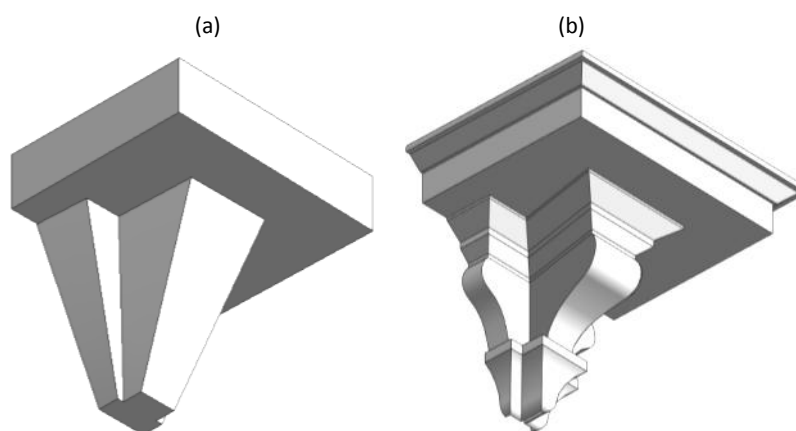
Figura 207 - "Nuvem de pontos" inserida no Revit para modelagem do púlpito em: (a) perspectiva; (b) plantas baixas partir de diferentes "faixas de vista"



Fonte: elaboração da autora.

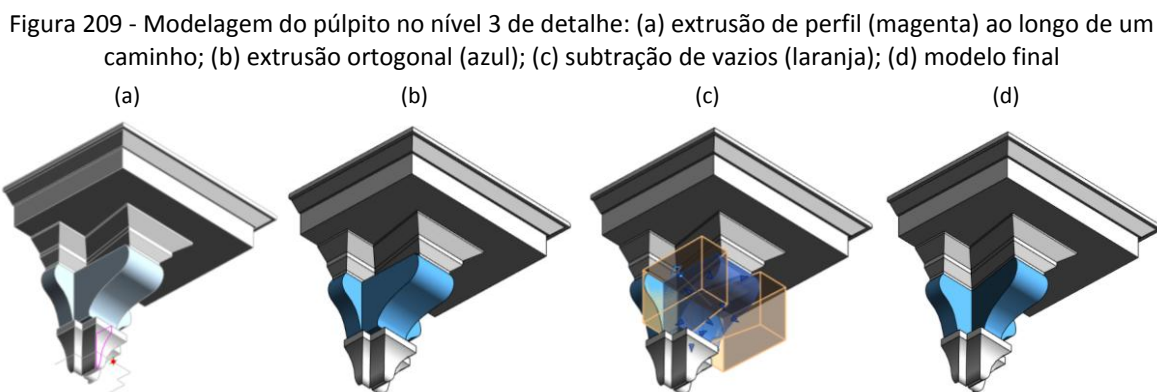
A modelagem do púlpito no nível 3 de detalhe representou um avanço em relação ao modelo extremamente simplificado utilizado no nível 2 (Figura 208).

Figura 208 - Base do púlpito: (a) nível de detalhe 2; (b) nível de detalhe 3



Fonte: elaboração da autora.

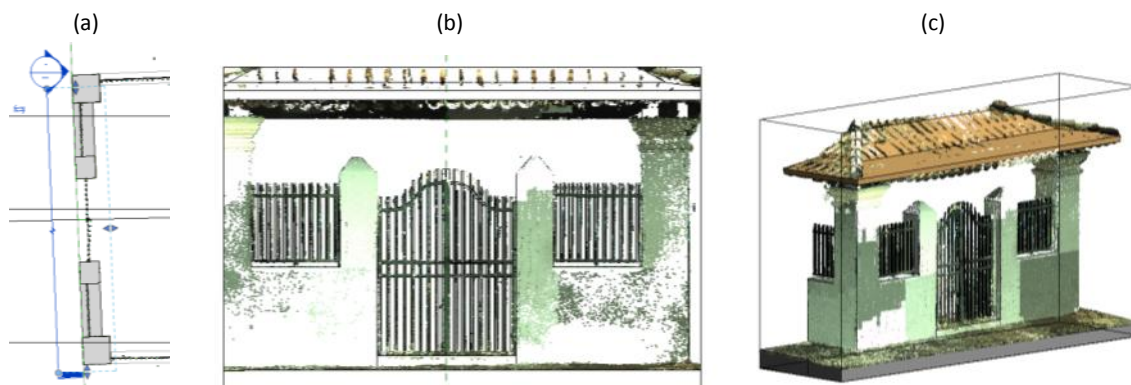
Foram necessários diversos comandos para a modelagem do púlpito no nível 3 (Figura 209), como a extrusão ao longo de um caminho (três trechos em cinza), extrusão ortogonal (em azul) e a subtração de forma vazia (em laranja) dos elementos em azul.



Fonte: elaboração da autora.

Além do púlpito, foram incluídos outros elementos menos complexos, modelados no arquivo principal. Para aumentar a agilidade na manipulação da "nuvem de pontos", faziam-se recortes de vista (restringindo a área de visualização) e criavam-se cortes específicos com pouca profundidade de vista, paralelos ao elemento de interesse, como pode ser visto na Figura 210a, durante a modelagem do gradil do alpendre.

Figura 210 - Recorte das vistas para modelagem do gradil do alpendre: (a) planta baixa ilustrando a linha de corte; (b) visualização do corte indicado na planta; (c) perspectiva do trecho de interesse, limitado pela caixa de corte (*section box*)



Fonte: elaboração da autora.

Outros elementos modelados podem ser vistos na Figura 211. Diversos ângulos do modelo completo do nível 3 estão ilustrados na Figura 212.

Figura 211 - Diversos elementos modelados no nível 3



Fonte: elaboração da autora.

Figura 212 - Modelo da capela no nível 3



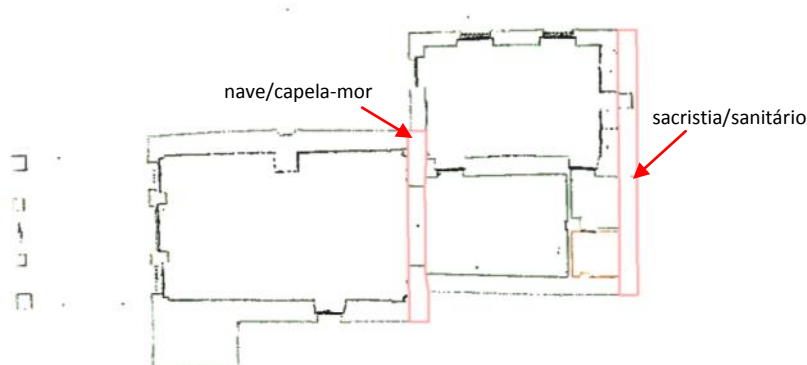


Fonte: elaboração da autora.

7.5.3.4 Nível 4

A modelagem do nível 4 começou pela construção das paredes que apresentavam maiores desvios (Figura 213): parede da sacristia/sanitário (fachada sudeste) e parede interna da nave/capela-mor (do arco cruzeiro). Devido às limitações do Revit para a modelagem de formas mais complexas, identificadas e descritas no item 6.4, as paredes foram geradas no AutoCAD, através do *loft* (sólido) realizado sobre seções traçadas interativamente.

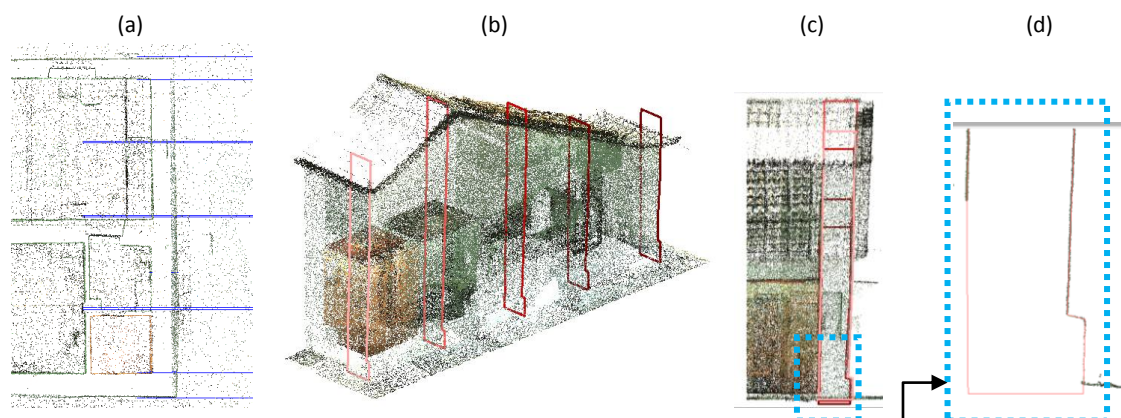
Figura 213 - Indicação das paredes modeladas no AutoCAD e substituídas posteriormente



Fonte: elaboração da autora.

Na construção da parede da sacristia, partiu-se da análise da sua forma, visando a determinação da orientação (vertical ou horizontal) e do posicionamento das seções. Verificou-se que as seções deveriam ser verticais e estar posicionadas nas extremidades da parede e em outros pontos internos, coincidindo com a cumeeira e os eixos dos ambientes, evitando-se interseções entre paredes (com oclusão de uma extremidade), como pode ser visto na Figura 214a.

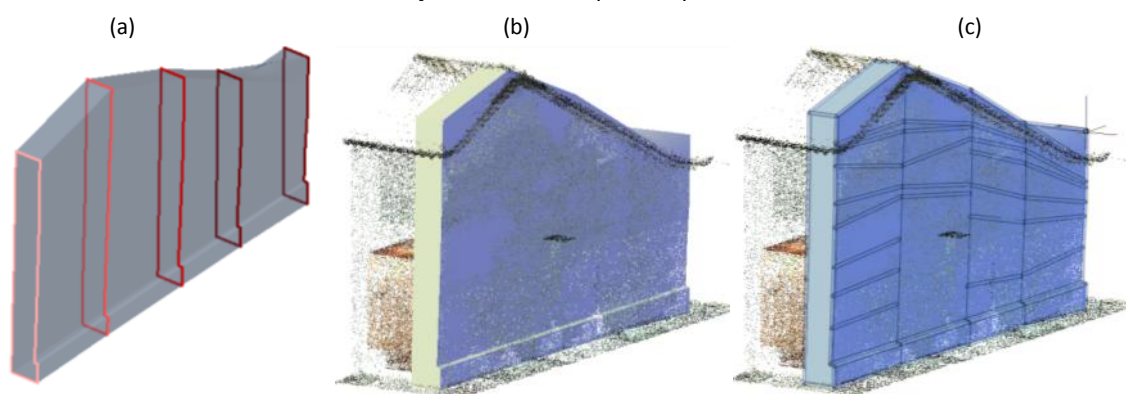
Figura 214 - Criação das seções da parede da sacristia/sanitário: (a) posicionamento das seções (em azul) em planta baixa; (b) seções em perspectiva; (c) seções em corte; (d) detalhe do prolongamento da seção



Fonte: elaboração da autora.

Foram criadas diferentes camadas (*layers*) associadas a cores em "degradê" para facilitar a identificação dos perfis sucessivos sobrepostos (Figura 214b e c), utilizados muitas vezes para complementar as informações ausentes em determinados trechos da "nuvem de pontos" (áreas ocultas, como parte superior do forro do sanitário e atrás de móvel da sacristia). Para o traçado de cada seção, realizava-se o fatiamento da "nuvem de pontos" (*pointcloudcrop*) e a mudança do sistema de coordenadas, coincidindo com os posicionamentos definidos anteriormente.

Figura 215 - Parede da sacristia/sanitário modelada com o *loft* (sólido) do AutoCAD em três visualizações diferentes: (a) sem nuvem de pontos e com a sobreposição das seções; (b) sem visualização das arestas; (c) com visualização das arestas que compõem o modelo



Fonte: elaboração da autora.

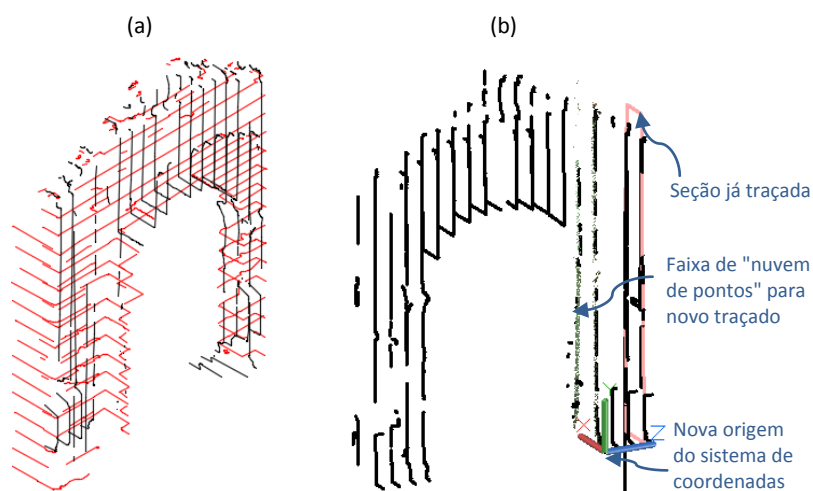
As seções foram traçadas com polilinhas ultrapassando um pouco os limites (prolongamento inferior e superior) visualizados na "nuvem de pontos" (Figura 214d), de modo a garantir que não haveria áreas vazias¹⁷² no modelo da parede, quando fosse associado a outros elementos

¹⁷² A subtração do volume excedente pode ser realizada facilmente no Revit, com uso das formas do tipo *void* (vazio).

construtivos no Revit (como passeio e cobertura). Depois de criadas todas as seções, foi gerado o modelo sólido com o *loft*¹⁷³ (Figura 215).

Na parede da nave/capela-mor (arco cruzeiro), utilizou-se um procedimento diferente. Foram geradas seções - horizontais e verticais - de modo automatizado no Geomagic Studio, espaçadas a cada 40 cm (Figura 216a). As seções foram importadas no AutoCAD e auxiliaram na determinação da orientação mais adequada para representação da forma. No entanto, não puderam ser aproveitadas para o traçado das polilinhas, devido à grande quantidade de falhas/interrupções. Serviram como referência para o posicionamento das novas seções a serem criadas, a partir da seleção de pontos que determinavam as origens dos sistemas de coordenadas e as faixas da "nuvem de pontos" a serem visualizadas no AutoCAD (Figura 216b). As seções traçadas (com polilinhas extrapolando os limites) podem ser vistas na Figura 217, que serviram para a criação do modelo sólido (Figura 218).

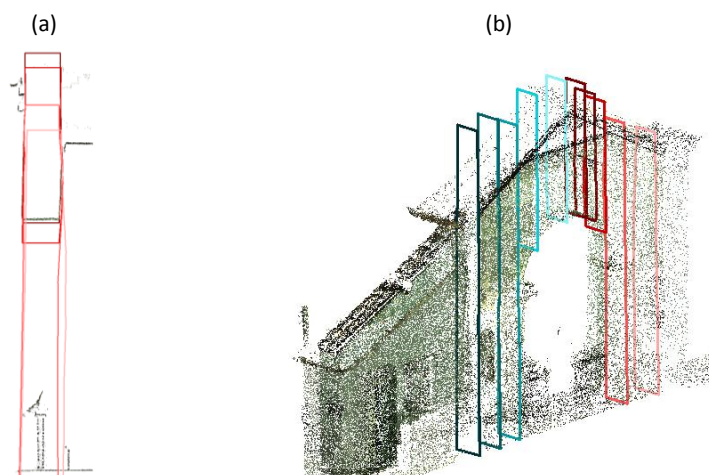
Figura 216 - (a) Seções horizontais e verticais criadas no Geomagic Studio; (b) uso das seções verticais como referência para criação das faixas de "nuvens de pontos" e posicionamento das origens dos sistemas de coordenadas



Fonte: elaboração da autora.

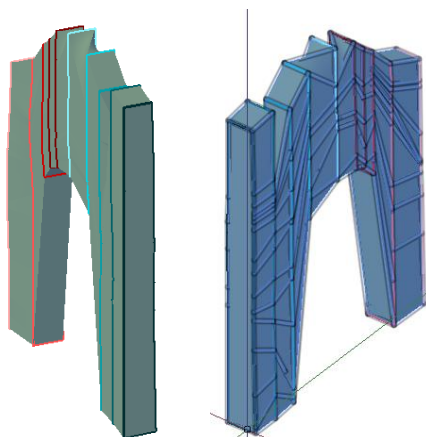
¹⁷³ Para a criação de modelo sólido com o *loft*, as seções devem ser criadas a partir de polilinhas fechadas. Se utilizado o modo de superfície do *loft*, depois de importado no Revit, o modelo não pode ser explodido nem ser associado a materiais.

Figura 217 - Diferentes seções verticais criadas com polilinhas, vistas em: (a) corte; (b) perspectiva



Fonte: elaboração da autora.

Figura 218 - Primeiro modelo criado a partir de seções geradas por polilinhas



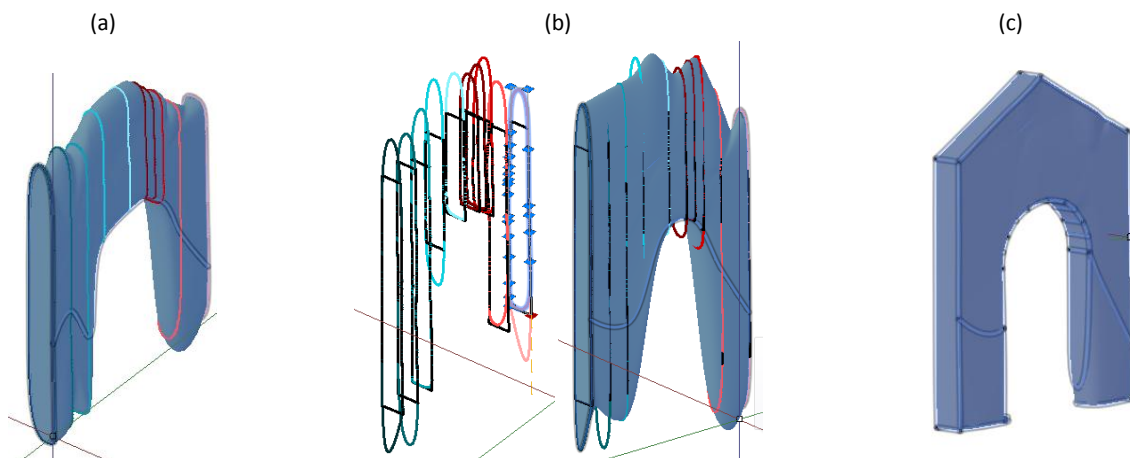
Fonte: elaboração da autora.

Como o produto gerado foi considerado inadequado, com diversas "torções" e recortes na forma, experimentou-se a transformação das polilinhas em *splines*. O grande inconveniente das *splines* é a suavização nas quinas das seções, diminuindo e alterando a configuração da parede em suas extremidades (inferiores e superiores).

Para resolver o problema gerado pelas *splines* nas extremidades, fez-se um prolongamento ainda maior das seções (em *splines*)¹⁷⁴, de modo a permitir, posteriormente, a subtração de trechos não desejados (Figura 219). Uma subtração preliminar foi realizada dentro do próprio AutoCAD, mas garantindo extensões a serem cortadas de modo definitivo no Revit. O modelo gerado por seções do tipo *splines* mostrou-se mais adequado à representação da forma dessa parede do que o gerado por polilinhas.

¹⁷⁴ No prolongamento, atentou-se para haver coincidência dos pontos das *splines* com as extremidades marcadas com as polilinhas.

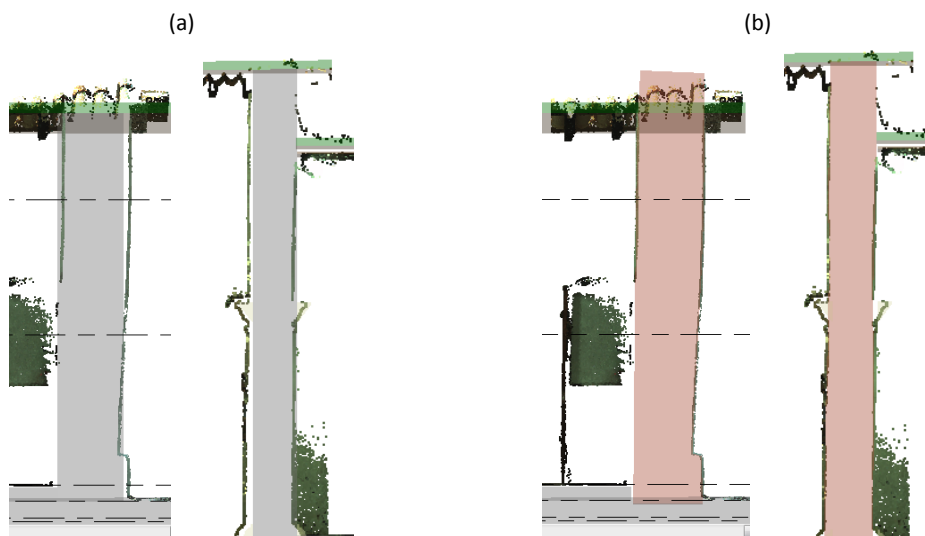
Figura 219 - Modelo gerado a partir de seções do tipo *splines*: (a) antes do prolongamento; (b) depois do prolongamento; (c) após subtração preliminar no AutoCAD



Fonte: elaboração da autora.

Após a criação das duas paredes no AutoCAD, partiu-se para a importação das mesmas no modo de modelagem no local (*In-Place*) na categoria "Paredes", que, depois de "explodidas" tornaram-se objetos "próprios" do Revit (tal como descrito na seção 7.4). Essas substituíram as paredes com maiores desvios, inseridas nos níveis anteriores. A Figura 220 ilustra um corte na parede da sacristia e do arco cruzeiro, antes e depois da substituição, evidenciando a melhor adequação dos modelos importados para representação das irregularidades das paredes, visto a coincidência de seus limites com a "nuvem de pontos".

Figura 220 - Cortes nas paredes da sacristia e do arco cruzeiro, respectivamente: (a) paredes inseridas anteriormente (cinza), (b) modelos importados do AutoCAD (vermelho)

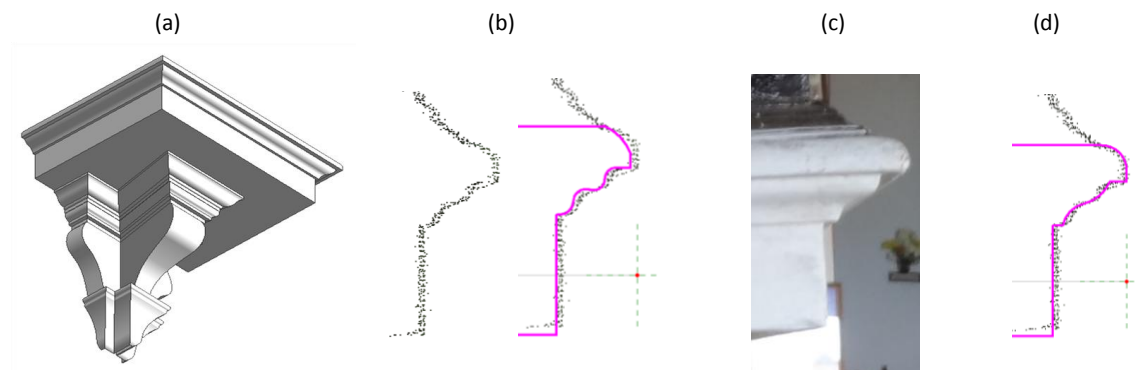


Fonte: elaboração da autora.

Depois da substituição das paredes, passou-se ao refinamento do modelo do púlpito, através da inclusão de mais elementos e da revisão/edição do traçado das seções. Apesar da alta

densidade da "nuvem de pontos", foi necessário observar os detalhes em fotografias para auxiliar o traçado correto das seções (Figura 221).

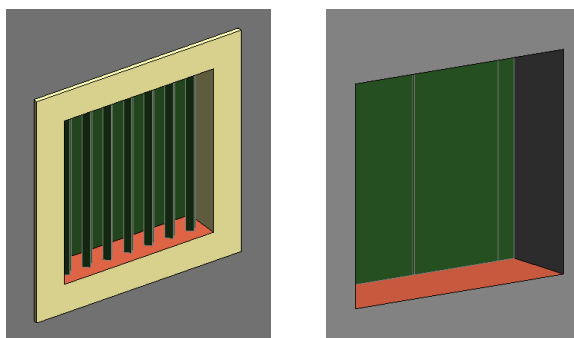
Figura 221 - (a) Base do púlpito no nível 4 de detalhe; (b) primeira seção traçada; (c) foto; (d) seção refeita



Fonte: elaboração da autora.

Depois da modelagem do púlpito, partiu-se para a alteração das famílias de esquadrias geradas anteriormente. As famílias do nível 3 foram gravadas com outro nome, para inclusão de mais detalhes, como contramarco, divisão das folhas e grade, adequados ao nível 4 (Figura 222). Os nomes dos arquivos indicavam o nível de detalhamento, se baixo, médio ou alto, relacionados aos níveis 3, 4 ou 5, respectivamente.

Figura 222 - Família de janela utilizada para o nível 4: exterior e interior, respectivamente

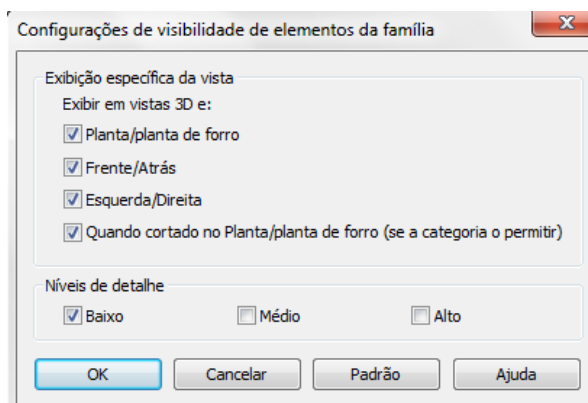


Fonte: elaboração da autora.

Nessa fase, foram selecionados os elementos específicos do nível 3, associados ao nível "Baixo" (Figura 223) e os novos elementos criados foram associados ao nível "Médio" e "Alto"¹⁷⁵.

¹⁷⁵ No momento da criação da família com nível alto de detalhe, havia uma atualização dos elementos específicos para os níveis 4 ou 5 (médio ou alto).

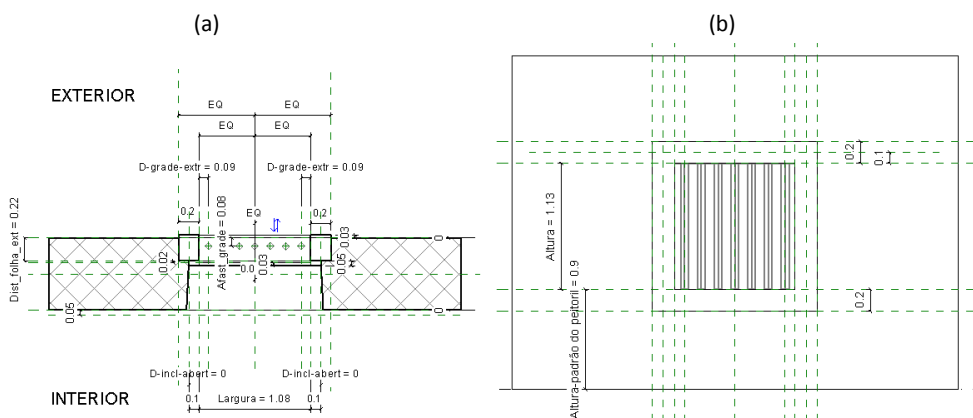
Figura 223 - Configuração de visibilidade dos elementos da família



Fonte: janela capturada do Revit 2015.

Foram adicionados parâmetros para o elemento "grade", como distância para as extremidades da abertura da parede, número de grades e controle de sua visibilidade, determinado pelo tipo de janela (Figura 224).

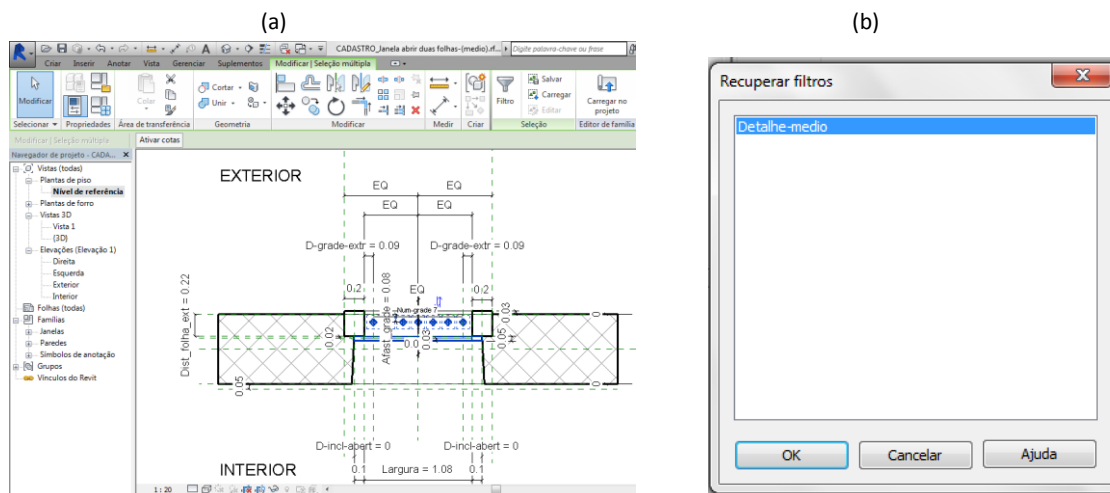
Figura 224 - Janela no "Editor de famílias" do Revit: (a) planta baixa; (b) vista externa



Fonte: elaboração da autora.

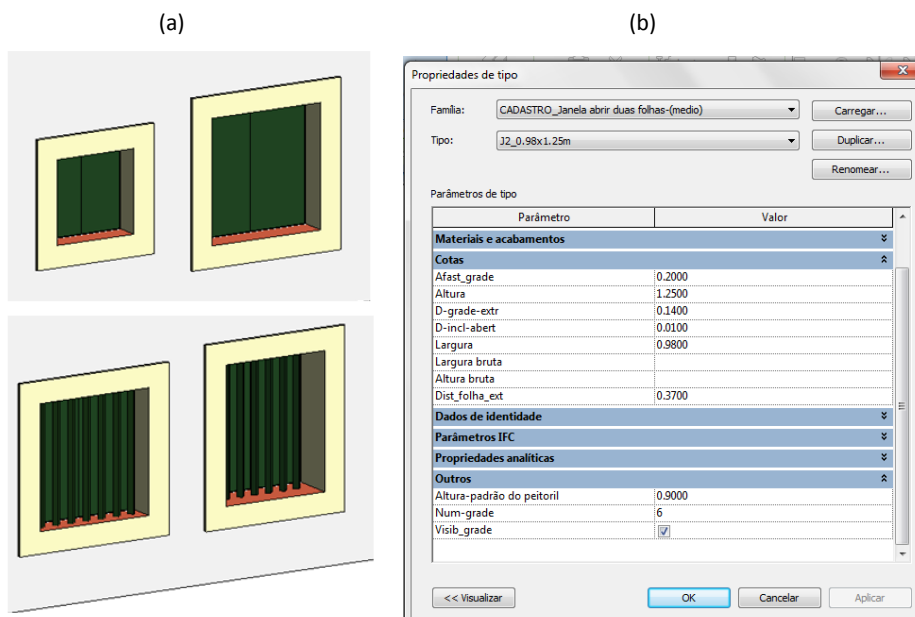
Além disso, foram criados "filtros" para facilitar a seleção dos novos elementos incluídos no nível 4 (Figura 225), bem como os elementos específicos do nível 3. A utilização desses filtros é interessante em uma eventual necessidade de redução dos tamanhos dos arquivos, uma vez que a sobreposição dos elementos adequados aos três níveis de detalhe existentes no Revit podem tornar lenta a manipulação de modelo com muitos componentes inseridos.

Figura 225 - Seleção (em azul) dos novos elementos incluídos no nível médio de detalhe (nível 4); (b) filtro para seleção desses elementos



Fonte: elaboração da autora.

Figura 226 - Os quatro tipos de janelas criados no nível médio de detalhe; (b) parâmetros de um tipo



Fonte: elaboração da autora.

Os quatro tipos de janelas criados estão ilustrados na Figura 226. Na sequência, foram incluídos no modelo uma série de objetos, como os elementos principais de sustentação dos telhados e o mobiliário, e foram refinados os modelos dos gradis, guarda-corpos e do cruzeiro (Figuras 227 e 228).

Figura 227 - Diversos elementos incluídos/detalhados no nível 4



Fonte: elaboração da autora.

Figura 228 - Modelo da capela no nível 4



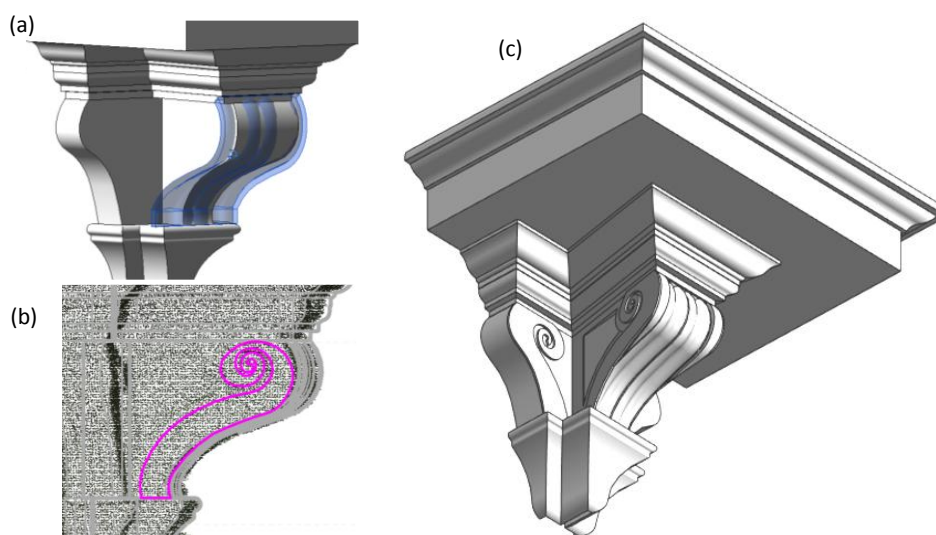
Fonte: elaboração da autora.

7.5.3.5 Nível 5

No nível 5, houve o refinamento de alguns detalhes do nível anterior, com destaque para a modelagem de formas mais complexas realizadas tanto no Revit, como em outros programas (Geomagic Studio e AutoCAD).

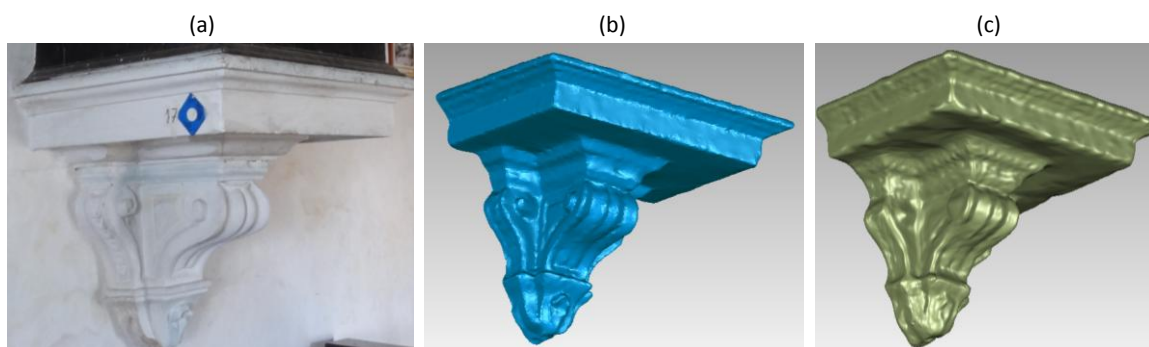
No modelo da base do púlpito (Figura 229c), foram adicionadas as ranhuras - através da subtração de trecho modelado por *sweep*¹⁷⁶ (Figura 229a) - e volutas, através da extrusão de seção (Figura 229b). Apesar de se ter conseguido o modelo do púlpito com alto nível de detalhe, sentiu-se a necessidade de comparação com modelo gerado a partir de processamento mais automatizado no Geomagic Studio.

Figura 229 - Modelagem detalhada da base do púlpito: (a) subtração de volume (em azul) para geração das ranhuras; (b) extrusão de perfil da voluta (em magenta); (c) modelo gerado



Fonte: elaboração da autora.

Figura 230 - Base do púlpito: (a) foto; (b) modelo em malha TIN; (c) modelo NURBS

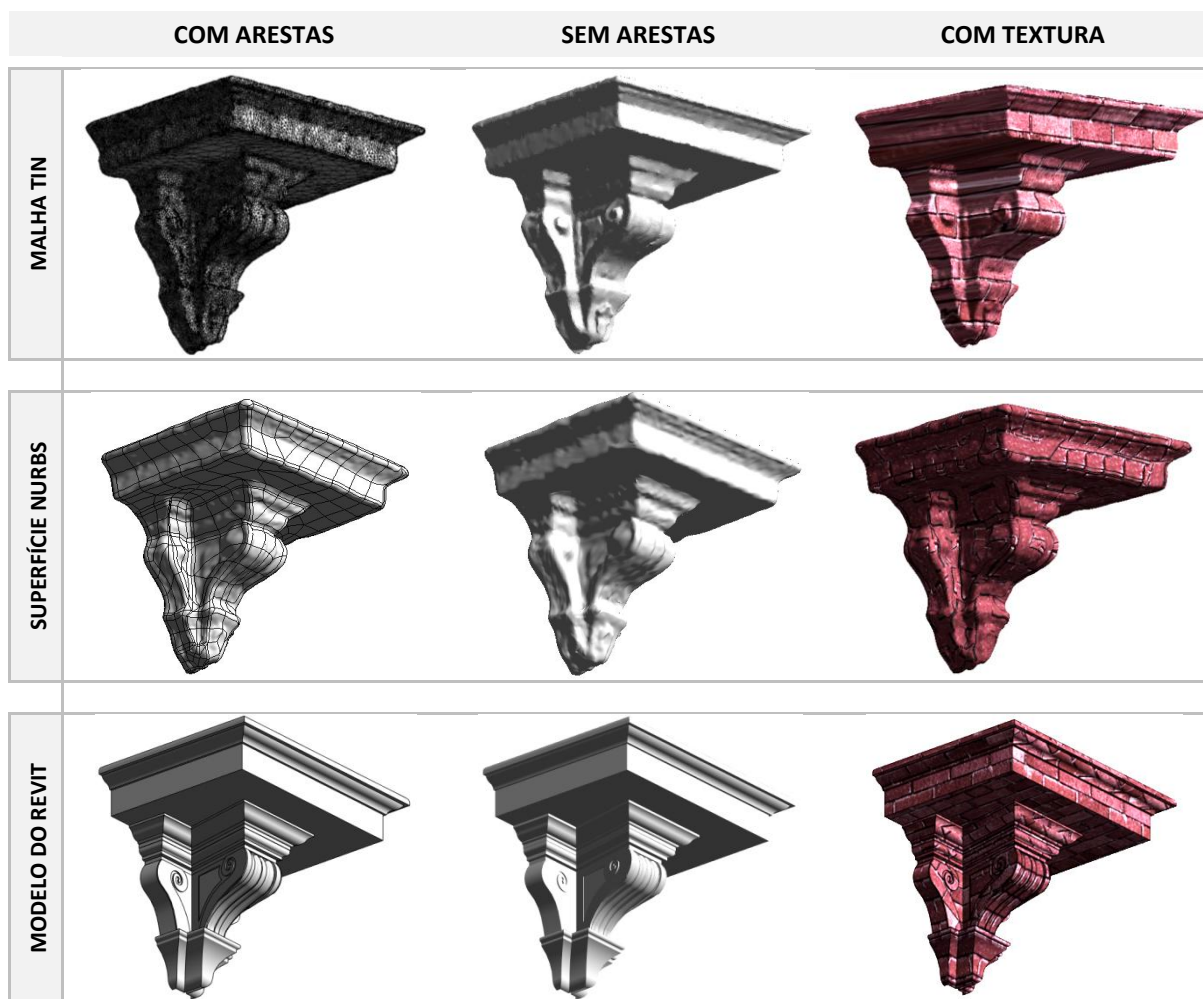


Fonte: elaboração da autora.

¹⁷⁶ Ou extrusão de perfil através de caminho.

Após a realização de uma série de operações sobre a "nuvem de pontos" para a geração da malha TIN e da superfície NURBS, obteve-se os modelos ilustrados na Figura 230, que foram exportados para os formatos OBJ e IGS, para a posterior importação no Revit, a partir do processo de conversão de arquivos descrito na seção 6.2.3.

Figura 231 - Comparação dos modelos em malha TIN e NURBS em perspectiva



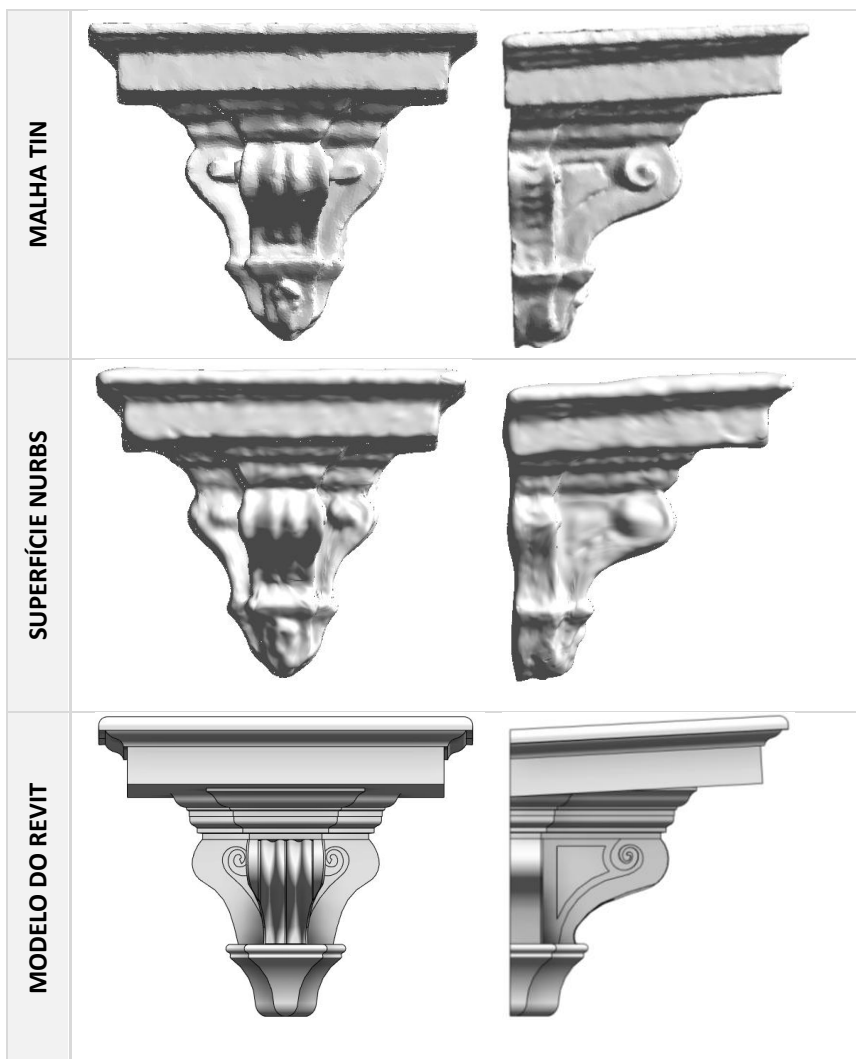
Fonte: elaboração da autora.

Depois da importação dos dois tipos de modelos no Revit, foi possível a comparação entre eles (Figuras 231 e 232). Nesse experimento, a malha TIN apresentou maiores vantagens do que a superfície NURBS, principalmente pela melhor definição de detalhes e continuidade da textura (quando aplicado materiais "não homogêneos"¹⁷⁷). Além disso, os procedimentos para obtenção desse modelo no Geomagic Studio são mais simples do que para geração da superfície NURBS. As maiores desvantagens da malha TIN foi a visualização de grande quantidade de arestas que compõem a superfície, quando vistas no modo "padrão" do Revit

¹⁷⁷ Como o material do tipo "tijolinho", aplicado sobre os dois modelos para realização de testes.

(interferindo na percepção da forma), e a impossibilidade de contabilização do volume nas propriedades do objeto, possível no modelo NURBS. O resumo das vantagens e desvantagens de cada modelo é apresentado no Quadro 24.

Figura 232 - Comparação da malha TIN, superfície NURBS (ambos sem arestas) e do modelo gerado no Revit (com arestas) nas vistas frontal e lateral esquerda



Fonte: elaboração da autora.

Quadro 24 - Comparação dos modelos em malha TIN e NURBS no Geomagic Studio e Revit

	VANTAGENS	DESVANTAGENS
MALHA TIN	<p>Procedimentos mais simples e rápidos para geração da malha TIN no Geomagic Studio</p> <p>Melhor definição dos detalhes de que o NURBS (nesse caso específico)</p> <p>Manutenção da textura original do levantamento,¹⁷⁸ dentro do Geomagic Studio</p> <p>Continuidade da textura, quando aplicado material não homogêneo no Revit</p>	<p>Visualização de grande quantidade de arestas que compõem a superfície, dificultando a percepção da forma quando vista no modo "padrão" do Revit (com arestas)</p>
SUPERFÍCIE NURBS	<p>Menos interferência visual das linhas de contorno do modelo</p> <p>Obtenção do volume nas propriedades do modelo</p>	<p>Necessidade de programas específicos para criação de modelos NURBS</p> <p>Visualização fragmentada da textura, quando aplicado material não homogêneo</p> <p>Menor definição de pequenos detalhes (nesse caso específico)</p>
MODELO DO REVIT	<p>Produção de desenhos com elevada qualidade e com contornos bem definidos</p> <p>Atribuição de materiais e contabilização de dados em planilhas do Revit</p> <p>Maior controle dos produtos gerados</p>	<p>Processo mais demorado e necessidade de conhecimento avançado em modelagem geométrica</p> <p>Maior subjetividade na interpretação dos dados</p> <p>Simplificação da forma com desconsideração de pequenas irregularidades</p>

Fonte: elaboração da autora.

É importante ressaltar que em nenhum dos modelos importados foi possível obter o quantitativo de materiais nas planilhas do Revit, uma vez que eles não puderam ser "explodidos", por se tratarem de superfícies. Os materiais foram associados aos elementos através dos estilos de objetos importados.

Considerando as características particulares de cada tipo de modelo, verificou-se que para um objeto com essas características geométricas, o modelo da base do púlpito gerado no Revit apresentou mais vantagens, apesar do tempo de processamento muito superior, se comparado ao despendido nos outros modelos.

Para a representação de objetos mais complexos e detalhados que a base do púlpito, foram realizados experimentos com a estátua de Santo Antônio presente na lateral da nave, através de modelos gerados a partir da varredura a laser e do DSM. Em ambos os casos,

¹⁷⁸ No modelo NURBS, perde-se a associação com a textura original.

foram necessárias operações de limpeza da "nuvem de pontos" e preenchimento de vazios (Figura 233). No caso da "nuvem de pontos" gerada pela varredura a laser, foi necessária ainda a triangulação e a suavização da malha (operações 2 e 4 da Figura 233a).

Figura 233 - Operações sobre o modelo da estátua: (a) gerado por varredura a laser; (b) gerado por DSM



Fonte: elaboração da autora.

Figura 234 - Comparação da estátua a partir do processamento das "nuvens de pontos" geradas pela varredura a laser e por DSM

VARREDURA A LASER		DSM	
visualização dos pontos	malha texturizada	visualização dos pontos	malha texturizada
"Nuvem de pontos" original (após limpeza): 5.759 pontos - arquivo com 153 KB	Malha TIN após preenchimento de vazios e suavização: 13.374 triângulos - arquivo com 779 KB	Malha TIN original (após limpeza): 99.896 triângulos - arquivo 8,17 MB ¹⁷⁹	Malha TIN após preenchimento de vazios: 155.242 triângulos - arquivo com 10,7 MB

Fonte: elaboração da autora.

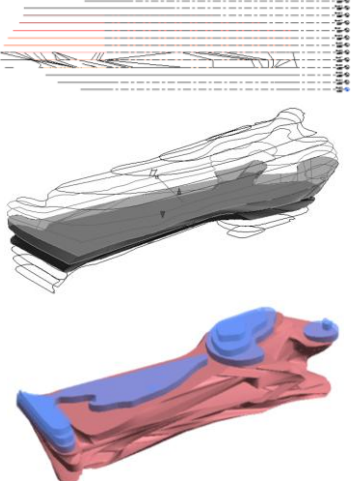
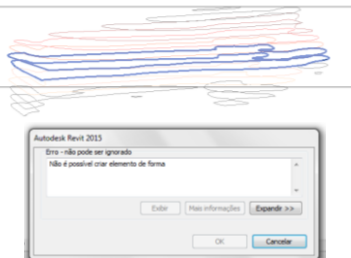
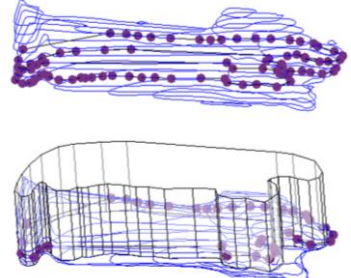
¹⁷⁹ Para a geração da malha TIN foram utilizadas 12 fotografias da estátua, processadas no 123D Catch. O formato adotado para exportação do modelo do 123D Catch para o Geomagic foi o OBJ (com 12,2 MB), junto ao JPG da textura (2,09 MB), com a resolução de 8.192 X 8.192 pixels.

A partir da comparação dos dois produtos, é nítida a diferença entre os dois modelos. A malha TIN gerada pela técnica DSM permitiu, nesse caso, a obtenção de um modelo com nível de detalhamento e qualidade de textura bastante superior ao da varredura a laser (Figura 234).

Para inserção da estátua no Revit, foram experimentados alguns métodos: importação dos modelos produzidos no Geomagic Studio (malha TIN e modelo NURBS), modelagem da estátua no AutoCAD e no Revit.

Para a modelagem no AutoCAD e Revit, foram utilizadas as seções criadas no Geomagic Studio, como referência para o traçado de novos contornos, inicialmente polilinhas e depois *splines*.

Quadro 25 - Testes de modelagem complexa realizados no Revit

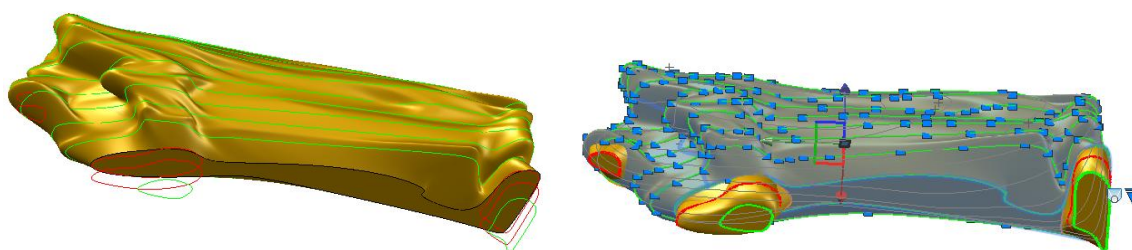
MÉTODO	IMAGENS	OBSERVAÇÃO
<p>MODELAGEM NO LOCAL (<i>MODEL IN-PLACE</i>) - uso do "mesclar" (<i>blend</i>) entre seções adjacentes criadas</p>		<p>Processo demorado, que requer a criação de diversos níveis para associação das novas seções nos planos correspondentes. Além disso, há necessidade de modelagem de cada trecho separadamente (entre curvas adjacentes criadas). Nesse experimento, houve problema com o <i>blend</i> em algumas seções, que tiveram de ser modeladas com extrusão (em azul). O resultado não foi satisfatório.</p>
<p>MASSA CONCEITUAL (<i>IN-MASS</i>) - seleção de polilinhas</p>		<p>Foram selecionadas duas seções para criação de objetos próprios do Revit, (associados aos níveis correspondentes), para criação de forma no modelo conceitual. Essa operação não teve êxito, aparecendo mensagem de erro.</p>
<p>MASSA CONCEITUAL (<i>IN-MASS</i>) -recurso do "Snap 3D" dos comandos de linha e arco, na opção "desenho sobre face"</p>		<p>Foram traçadas novas linhas a partir do recurso "Snap 3D" sobre modelo importado contendo somente as seções. Não se conseguiu gerar uma forma a partir da seleção de duas ou mais seções (<i>loft</i>), sendo possível somente a modelagem por extrusão.</p>

Fonte: elaboração da autora.

Os testes realizados no Revit em ambiente de modelagem no local (*Model In-Place*) e em massa conceitual não geraram resultados satisfatórios para a representação da estátua, como pode ser visto no Quadro 25.

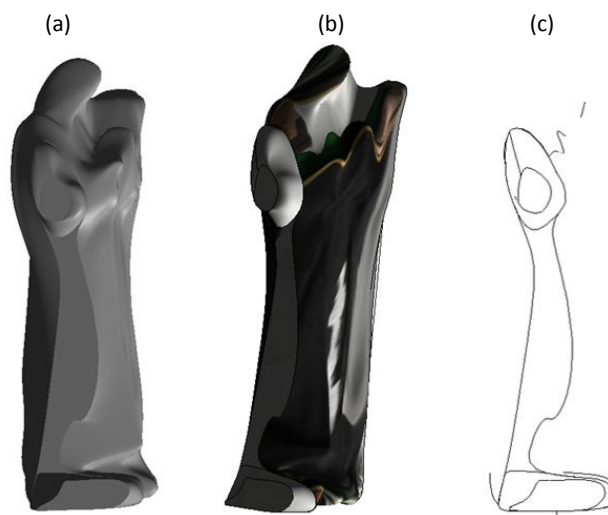
No AutoCAD, só houve sucesso quando foram utilizadas seções traçadas com *splines*¹⁸⁰ para a criação de modelo sólido através do *loft*. Para a modelagem das extremidades da estátua foi necessário duplicar a seção para realização do *loft* do trecho, separadamente (Figura 235). Esse artifício foi realizado após diversos problemas de modelagem entre curvas adjacentes muito diferentes.

Figura 235 - Modelagem da estátua no AutoCAD, com extremidades modeladas separadamente



Fonte: elaboração da autora.

Figura 236 - Estátua inserida no Revit: (a) sem textura; (b) após a associação à textura da foto; (c) vista em *wireframe*



Fonte: elaboração da autora.

O resultado gerado no AutoCAD foi superior aos obtidos nas tentativas citadas anteriormente. O modelo foi importado no Revit (Figura 236c) através da modelagem no local, associado à categoria "modelos genéricos". Depois do *explode*, o objeto permitiu a

¹⁸⁰ As seções traçadas com polilinhas apresentavam erros constantes de modelagem com o comando *loft*.

atribuição de materiais e pode ser contabilizado na planilha de quantitativos. Apesar dessas propriedades, foram verificados dois inconvenientes no modelo: (1) quando aplicada a textura fotorrealística da estátua, havia fragmentação nos trechos modelados separadamente, no AutoCAD (Figura 236b); (2) a representação do modelo em *wireframe* era incompleta (Figura 236c).

Figura 237 - Produtos gerados no Gemagic Studio e importados no Revit: malha TIN e superfície NURBS

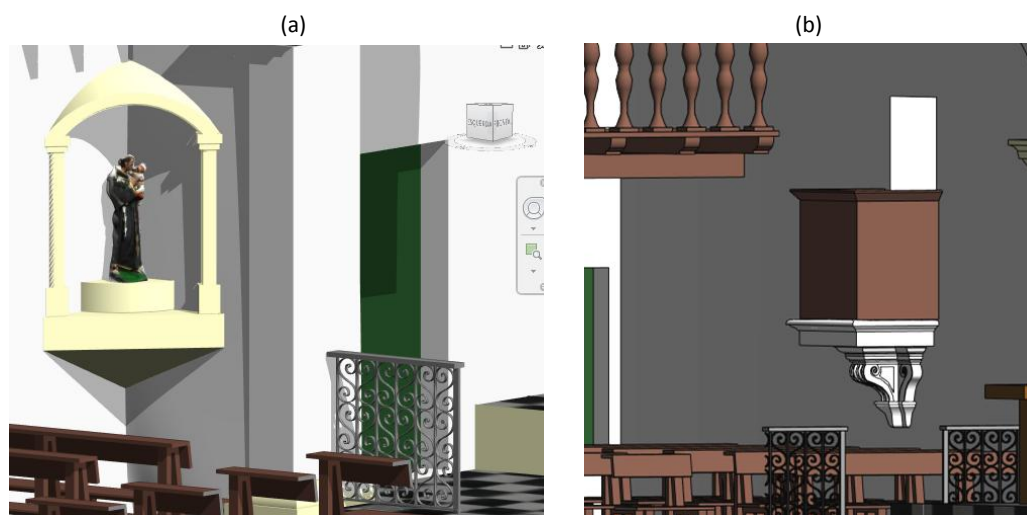


Fonte: elaboração da autora.

Com o problema da textura, da forma simplificada modelada no AutoCAD e do tempo elevado para obtenção desse modelo¹⁸¹, sentiu-se a necessidade de se fazer testes com os produtos gerados no Geomagic Studio: malha TIN e superfície NURBS. Foram criados dois tipos de cada modelo, para comparação dos resultados em diferentes níveis de detalhe: com e sem decimação da malha (mais detalhado). A Figura 237 ilustra os modelos após a importação no Revit, com diferentes tipos de visualização: com arestas (*wireframe*), com preenchimento sólido (sem arestas) e com textura aplicada no Revit.

A partir da comparação dos modelos (Figura 237) em menor nível de detalhe (1b e 3b), verificou-se que a superfície NURBS apresentou qualidade superior à malha TIN, pelo aspecto menos fragmentado e pela maior suavização da superfície. Com relação aos modelos mais detalhados visualizados sem arestas (2b e 4b) observa-se uma equivalência entre os tipos de produtos, com vantagem da NURBS quando visto com arestas (4a). A representação em malha TIN com alta densidade (2a), dificulta a percepção da forma quando o modelo é visto com arestas, modo padrão de visualização do Revit. A grande vantagem da malha TIN nesse experimento foi na aplicação da textura fotorrealística (2c), representada de modo inadequado (fragmentado) no modelo NURBS (4c).

Figura 238 - Inclusão de detalhes mais complexos: (a) malha TIN texturizada da estátua de Santo Antônio; (b) modelo do púlpito gerado no Revit



Fonte: elaboração da autora.

¹⁸¹ O tempo elevado foi devido aos diversos erros apresentados durante a seleção das seções com o *loft*, e à necessidade de alteração das mesmas para realização de novos testes.

Além da inclusão de elementos detalhados no modelo no nível 5 (Figura 238), houve o refinamento na aparência de alguns materiais, com a utilização de texturas obtidas por fotografias retificadas (Figura 239).

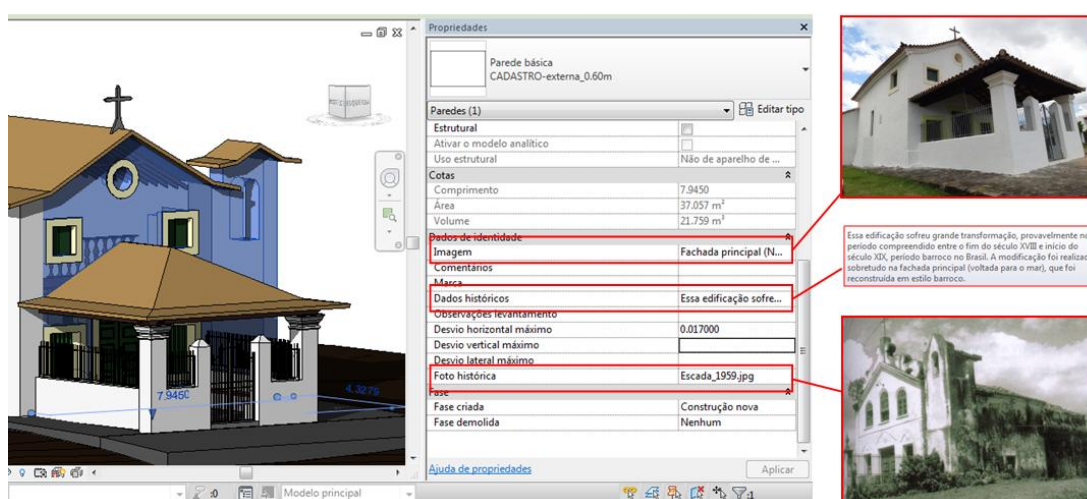
Figura 239 - Aplicação de texturas obtidas pela retificação de fotos: (a) piso em mármore da capela-mor; (b) lápide da fachada nordeste, marco da invasão holandesa



Fonte: elaboração da autora.

Ainda no nível 5, foram criados novos parâmetros compartilhados para além dos desvios, introduzidos no nível 2. A Figura 240 ilustra os parâmetros criados (Dados históricos, Observações de levantamento, Foto histórica) e algumas informações ou arquivos vinculados. No parâmetro "Imagem", associou-se fotos atuais dos elementos construtivos, como fachadas e materiais de acabamento.

Figura 240 - Parâmetros compartilhados para inclusão de informações semânticas aos elementos construtivos



Fonte: elaboração da autora.

7.6 DISCUSSÃO

Esta seção discute diversas questões observadas durante os experimentos realizados, especialmente na modelagem BIM da Capela de Nossa Senhora da Escada realizada com base na "nuvem de pontos".

A abordagem contempla os seguintes aspectos:

- procedimentos para manipulação mais eficiente da "nuvem de pontos";
- métodos e técnicas de modelagem para formas complexas;
- técnicas para aplicação de texturas fotorrealísticas;
- métodos de levantamento associados às características dos objetos e aos objetivos do modelo;
- níveis de detalhe.

7.6.1 Procedimentos para manipulação da "nuvem de pontos"

Os experimentos permitiram constatar uma série de questões e propor métodos e técnicas para modelagem BIM de formas existentes (complexas ou não) a partir de "nuvens de pontos".

Verificou-se que é possível e vantajoso realizar a modelagem BIM dos principais elementos construtivos diretamente sobre a "nuvem de pontos" no Revit. Como é difícil a percepção da forma e da posição exata dos objetos sobre a "nuvem de pontos" completa (seja em perspectiva ou em vistas ortogonais), é imprescindível trabalhar com estreitas faixas de "nuvens de pontos", preferencialmente visualizadas em plantas baixas, cortes ou elevações. Esse método, além de facilitar a visualização dos contornos da forma, diminui significativamente o tempo de processamento, bastante lento¹⁸², de manipulação das "nuvens de pontos" no Revit.

Observou-se que a melhor forma de realizar o fatiamento da "nuvem de pontos" é através de comandos de visualização do próprio Revit:

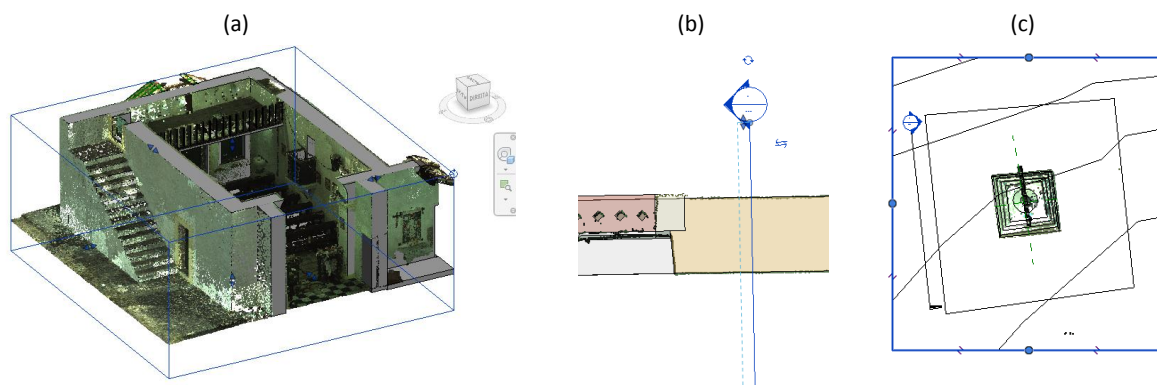
¹⁸² No início da modelagem, ocorreram muitos problemas de processamento, como travamento e superaquecimento da máquina, trabalhando muitas vezes no limite de sua capacidade. Depois da adoção dos métodos apresentados, houve uma melhoria significativa no desempenho computacional.

- plantas baixas - controle dos valores da faixa de vista (por nível) para visualização da "nuvem de pontos" em diferentes alturas;
- cortes - utilização de pequenas profundidades de corte (Figura 241a);
- perspectivas - uso do *section box*¹⁸³ (caixas de corte), para visualização em perspectiva ou vistas de trechos selecionados do objeto, útil principalmente para verificação dos elementos modelados através da sobreposição com a "nuvem de pontos" (Figura 241b).

Esses recursos eram usados não somente como referência para a modelagem dos elementos, mas também para verificação dos objetos modelados (visualizados com fator de transparência) através da sobreposição com a "nuvem de pontos", vista em diferentes posições, a partir do deslocamento das seções.

Outro recurso importante para melhorar o desempenho computacional, é utilizar frequentemente pequenas "regiões de corte" nas vistas, focando no trecho de interesse (Figura 241c), uma vez que a regeneração da "nuvem de pontos" é somente na área visível.

Figura 241 - Recursos para fatiamento da "nuvem de pontos" e de modelos gerados no Revit: (a) *Section box* em perspectiva; (b) seção com pequena profundidade; (c) delimitação da "região de corte" (em azul)



Fonte: elaboração da autora.

Conforme já abordado, a modelagem dos principais elementos construtivos, como paredes, pisos, coberturas, forros, elementos de sustentação do telhado e do coro foi realizada diretamente no Revit. Para modelagem de formas mais complexas e irregulares foi necessário utilizar outros programas, devido as limitações encontradas no Revit.

¹⁸³ O *section box* apresentou desvantagem em relação aos cortes e plantas baixas devido à maior lentidão de processamento e não possibilidade de realizar medições sobre a "nuvem de pontos", pois as cotas só permitem medir objetos modelados no Revit. A grande vantagem é a visualização tridimensional e maior facilidade de movimentação dos planos de seccionamento.

A segmentação da "nuvem de pontos" realizada pelo AutoCAD através de comandos de visualização foi utilizada diversas vezes, e permitiu melhorar a observação das seções características dos objetos, a serem usadas como base para a geração de desenhos (importados no editor de família do Revit) ou modelos geométricos (importados no ambiente de projeto do Revit).

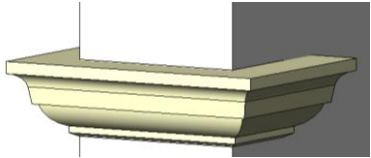
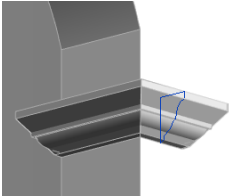
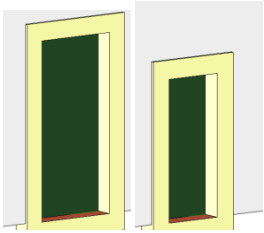
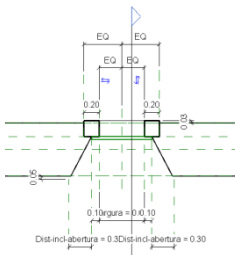
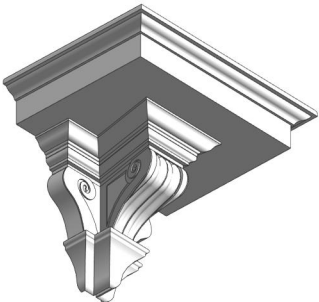
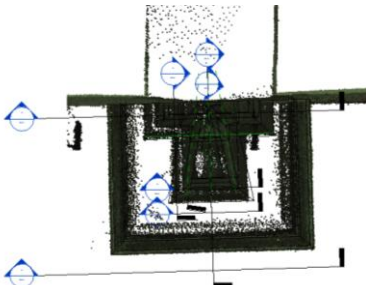
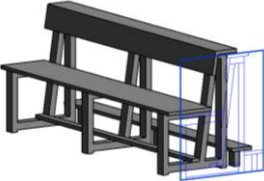
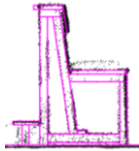
Em algumas situações, foi necessária a segmentação "definitiva" da "nuvem de pontos" para geração de arquivos separados de trechos selecionados. Nesses casos, o programa utilizado e considerado mais adequado foi o Recap, pela velocidade na manipulação da "nuvem de pontos" e pela compatibilidade de arquivos com diversos programas (Geomagic Studio¹⁸⁴, AutoCAD e Revit). Quando esses arquivos eram importados, tinha-se o cuidado de utilizar a mesma unidade (metro) e o mesmo sistema de coordenadas de referência, visando o alinhamento correto dos diversos elementos.

7.6.2 Métodos e técnicas para modelagem de formas complexas

Em função das características geométricas do modelo e/ou do nível de detalhe, pode haver grandes variações no fluxo de trabalho, compreendendo técnicas de modelagem e programas utilizados. O Quadro 26 apresenta a proposição de técnicas de modelagem para a representação de objetos de baixa e média complexidade, que podem ser modelados no ambiente de projeto ou no editor de famílias do Revit.

¹⁸⁴ Para importação no Geomagic Studio foi utilizado o formato PTS. Esse programa não tem formato de exportação de modelo de "nuvem de pontos" compatível com o AutoCAD e o Revit.

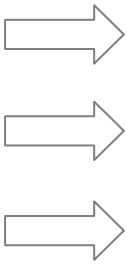

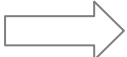
Quadro 26 - Técnicas de modelagem para objetos de baixa ou média complexidade

CARACTERÍSTICAS DO MODELO	TÉCNICA DE MODELAGEM
<p>OBJETOS DE BAIXA COMPLEXIDADE E/OU BAIXO NÍVEL DE DETALHE</p> 	<p>AMBIENTE DE PROJETO DO REVIT (dentro do modelo geral)</p> 
<p>OBJETOS REPETITIVOS DE BAIXA COMPLEXIDADE E/OU BAIXO NÍVEL DE DETALHE</p> 	<p>EDITOR DE FAMÍLIAS DO REVIT</p> 
<p>OBJETOS DE MÉDIA COMPLEXIDADE</p> 	<p>AMBIENTE DE PROJETO DO REVIT (em arquivo isolado)</p> 
<p>OBJETOS REPETITIVOS DE MÉDIA COMPLEXIDADE</p> 	<p>DESENHOS AUXILIARES NO AUTOCAD</p>  <p>EDITOR DE FAMÍLIAS DO REVIT</p>

Fonte: elaboração da autora.

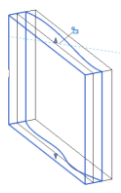

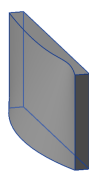

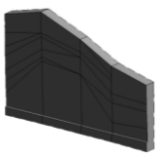



Com relação aos objetos de alta complexidade, há várias técnicas de modelagem que podem ser realizadas tanto na ferramenta BIM (Revit), como em modeladores geométricos (AutoCAD) ou programas para processamento de "nuvens de pontos" (Geomagic Studio). As particularidades de cada método estão descritas no Quadro 27.

Quadro 27 - Técnicas de modelagem para objetos de alta complexidade

CARACTERÍSTICAS DO MODELO	TÉCNICA DE MODELAGEM
OBJETOS QUE PODEM SER MODELADOS COM SEÇÕES CARACTERÍSTICAS	 MODELAGEM SÓLIDA (<i>LOFT</i>) NO AUTOCAD MODELAGEM <i>IN-PLACE</i> NO AMBIENTE DE PROJETO DO REVIT MODELAGEM NO EDITOR DE FAMÍLIAS DO REVIT (COM BASE EM DESENHOS)
OBJETOS COMPLEXOS COM ESPESSURAS UNIFORMES, DO TIPO PISO, PAREDE, PAINEL DE VIDRO OU COBERTURA	 MODELAGEM <i>IN-MASS</i> DO REVIT
OBJETOS IRREGULARES COM ALTO NÍVEL DE DETALHE	 MODELAGEM NO GEOMAGIC STUDIO (MALHA TIN OU NURBS)

Fonte: elaboração da autora.

Quadro 28 - Técnicas para modelagem de paredes complexas

CARACTERÍSTICAS DO ELEMENTO "PAREDE"	TÉCNICA DE MODELAGEM
PAREDES PRÉ-DEFINIDAS Paredes com espessura variáveis, apresentando irregularidades "simples" (com seções bem definidas) que podem ser modeladas com a utilização de um dos comandos a seguir: extrusão, <i>blend</i> , revolução ou extrusão ao longo de caminho 	 Uso de família de parede pré-definida do Revit junto à subtração da forma "vazia" do <i>Model In-Place</i>
IN-PLACE Irregularidades "simples" (com seções bem definidas) 	 Uso dos recursos de modelagem do <i>Model In-Place</i>
IMPORTAÇÃO GEOMETRIA Formas complexas/irregulares, de espessuras variadas, geradas pela combinação de diversas seções 	 Importação de modelo sólido produzido no AutoCAD com o comando <i>loft</i>
IN-MASS Formas complexas, mas com espessuras uniformes 	 Seleção da superfície modelada no AutoCAD ou Revit, para associação de família pré-definida no Revit (<i>wall by face</i>)

Fonte: elaboração da autora.

Com relação às paredes complexas e irregulares, há também diversas possibilidades de modelagem dentro do próprio Revit ou a partir da importação da geometria gerada em outros programas. O Quadro 28 apresenta uma proposição de técnicas de modelagem em função das características geométricas das paredes.

A grande limitação do Revit está relacionada à modelagem de paredes irregulares, com diferentes espessuras, geradas a partir de diversas seções, dada à morosidade do processo e as frequentes mensagens de erro. Nesses casos, recomenda-se a importação de modelos sólidos criados em outros programas, para permitir a associação de materiais e a vinculação nas planilhas de quantitativos. No caso de paredes complexas, mas com espessuras uniformes, a técnica mais adequada e eficiente é através do recurso de modelagem “massa conceitual” (*In-Mass*) do Revit.

Apesar das diversas possibilidades apresentadas, a modelagem das irregularidades das paredes existentes deve ser realizada de modo criterioso, em função das necessidades específicas do modelo, dada a morosidade do processo de modelagem, a necessidade de uso de outros programas e os problemas de interoperabilidade das ferramentas. Além disso, a representação não contempla as diversas camadas e diminuem-se as possibilidades de edição da geometria do objeto no Revit.

Dessa forma, deve-se priorizar a modelagem das paredes com uso das famílias pré-definidas do Revit, ajustando-se os valores de espessuras e da composição das camadas (se for possível ou requerido), tendo-se o cuidado no traçado em planta (segmentos de retas ou curvas) e adicionando, em suas propriedades, os parâmetros de desvios (horizontal, lateral e vertical) observados na sobreposição com a “nuvem de pontos”. Os valores registrados facilitam a identificação das paredes mais irregulares, que foram representadas de modo simplificado.

Quadro 29 - Técnicas de modelagem para objetos irregulares

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO MODELO		TÉCNICA DE MODELAGEM
Qualidade da representação bidimensional, tabela de quantitativo de materiais, tamanho reduzido de arquivos e baixo tempo de processamento		Extrusão de seções: importação de modelo sólido gerado no AutoCAD ou modelagem no <i>Model In-Place</i> do Revit
Representação bidimensional (somente), com tamanhos reduzidos de arquivos e baixo tempo de processamento		Utilização das seções geradas automaticamente no Geomagic Studio, como base para o desenho (após projetá-las para um único plano)
Qualidade da visualização tridimensional, maior precisão na tabela de quantitativos de materiais, sem preocupação com o alto tempo de processamento		Uso do <i>loft</i> : importação de modelo sólido produzido no AutoCAD ¹⁸⁵ através do modo <i>Model In-Place</i> do Revit
Qualidade da visualização tridimensional com aplicação da textura (sem arestas), sem preocupação com o tamanho do arquivo		Importação de malha TIN com alto nível de detalhe, produzida no Geomagic Studio ¹⁸⁶ e aplicação de textura no Revit
Qualidade da visualização tridimensional (com arestas), com propriedades de volume, sem preocupação com o tamanho do arquivo		Importação de superfície NURBS produzida no Geomagic Studio
Rapidez de modelagem e tamanho reduzido do arquivo para visualização tridimensional (sem arestas)		Importação de malha TIN com pequena quantidade de triângulos (após decimação) produzida no Geomagic Studio

Fonte: elaboração da autora.

¹⁸⁵ Ou outro programa com modelagem sólida que permita a conversão de formatos sem perda de informações.

¹⁸⁶ Ou outro programa para processamento de "nuvens de pontos" que permita a conversão de formatos sem perda de informações.

Em se tratando de detalhes ainda mais complexos e irregulares, como o caso de esculturas, torna-se imprescindível a importação da geometria, devido às limitações e aos problemas verificados no Revit. Existem diversas possibilidades para a modelagem geométrica de objetos complexos/irregulares, com características, programas e tempos de processamento bem diferenciados. Não foi identificada uma técnica que permita gerar um “modelo completo”¹⁸⁷, que atenda a uma ampla gama de aplicações da forma complexa/irregular.

Nesse sentido, surgiu a necessidade de experimentação de diversos processos de modelagem para análise dos produtos gerados junto às possíveis aplicações do modelo. O Quadro 29 apresenta um resumo do estudo realizado, permitindo associar as características principais requeridas para o modelo e as técnicas de modelagem utilizadas.

Para a escolha da técnica de modelagem, devem estar claras as funções ou operações a serem realizadas sobre o modelo no Revit, definindo, por exemplo: se a prioridade é a representação bidimensional, junto à geração de dados em planilhas ou se o foco é a visualização tridimensional fotorrealística.

Quadro 30 - Dois conjuntos de modelos sobrepostos a serem definidos em função das aplicações desejadas



Fonte: elaboração da autora.

Uma forma de ampliar as aplicações dos modelos de formas complexas importadas de outros programas, é o uso de dois modelos sobrepostos, controlados pela propriedade de

¹⁸⁷ O termo "modelo completo" é utilizado aqui, para se referir a um objeto complexo/irregular gerado no Revit ou importado, que apresenta, simultaneamente, as seguintes características: boa qualidade na representação bi e tridimensional, aplicação adequada de textura fotorrealística, associação a elementos construtivos e a planilhas do Revit.

visibilidade dos elementos (dentro da família), conforme apresentado no Quadro 30. Desse modo, é possível aliar a qualidade da representação bi ou tridimensional (modelos "b" e "d", respectivamente), com modelos sólidos relacionados a categorias do Revit (modelos "a" e "c"), incluindo aplicação de materiais e uso de planilhas de quantitativos, não possível com objetos importados do tipo superfície (NURBS ou malha TIN).

7.6.3 Técnicas para aplicação de texturas fotorrealísticas

Com relação à aplicação de textura fotorrealística, é importante ressaltar a importância desse recurso na representação arquitetônica, especialmente em edificações históricas, para mapeamento de danos ou registro de ornamentos ou detalhes planos ou com pequena profundidade, como os presentes em esquadrias ou paredes.

As três formas de aplicação de textura no Revit (Decalque, Pintura e Materiais) foram apresentadas na seção 7.4. Uma síntese das vantagens, desvantagens e aplicações de cada tipo está ilustrada no Quadro 31.

O método mais comum de aplicação de texturas é através da criação e associação dos materiais aos objetos modelados no próprio Revit (técnica b do Quadro 31). Apesar de apresentar problemas quando utilizada a opção sem repetição de padrão ("Ladrilho" ou "Tile"), é o único método que pode ser aplicado a objetos importados no Revit, somente para visualização da textura.

Em se tratando de edificações históricas, merece destaque o uso do "decalque" (ou *Decal*) e da "pintura" (ou *Paint*), pelas possibilidades de registro de elementos únicos, como objeto com textura relevante contido em um trecho de parede (como a lápide), ou representação de danos (como a fachada da capela em 2004), respectivamente.

Quadro 31 - Técnicas para aplicação de texturas no Revit

	VANTAGENS	DESVANTAGENS	APLICAÇÕES
(a) DECALQUE	Rapidez no ajuste, que é feito de modo interativo pela manipulação direta sobre a imagem aplicada, com possibilidade de alternar a visualização de diferentes texturas, pois permite a sobreposição de elementos.	Presença da moldura, só pode ser visto no modo de visualização realista e não consta nas planilhas do Revit. Só pode ser aplicado em superfícies planas ou cilíndricas.	Maneira mais rápida para inclusão de texturas de objetos relevantes contidos em um trecho de superfície (como a lápide, à direita), para o registro de detalhes ou danos, ou como base para o traçado de feições de interesse. 
(b) MATERIAIS	Aplicação da textura a todos elementos vinculados àquele material. Quantificação precisa de materiais em planilhas do Revit e vinculação de outras representações em função do estilo ou forma de visualização do objeto, se em corte ou em vista, e relacionados aos modos de exibição dos gráficos, como <i>wireframe</i> , sombreado ou realístico.	Não pode ser utilizado para aplicação de textura em um trecho específico do objeto. Apresenta alguns problemas quando não utilizada a forma "padrão" de repetição da textura.	Mais adequado para representação de um padrão que se repete uniformemente (como o piso da capela-mor, à direita). É a única forma de associação de texturas para modelos complexos importados no Revit, através da seleção do material em "objetos importados" (como a estátua, à direita). 
(c) PINTURA	Melhor modo para visualização de texturas realísticas "únicas" (sem repetição), sem presença de moldura.	Lentidão no processo de ajuste das dimensões e posicionamento da textura na superfície do objeto. Necessidade de criação de diversos materiais a serem associados a cada face do objeto. Como só aplica o material na face do elemento, não é adequado para cálculo de volume de material.	Recurso interessante para o registro de danos (como a fachada à direita), ou detalhes essencialmente planos (ou com pouca profundidade), contidos em paredes ou esquadrias. 

Fonte: elaboração da autora.

A visualização da textura fotorrealística é interessante, mas só se justifica se houver, de fato, relevância ou necessidade para sua aplicação, uma vez que o processo de geração de ortofotos e sua aplicação no modelo demandam tempo e conhecimento de técnicas fotogramétricas por parte do operador.

As texturas obtidas por fotos são mais relevantes, principalmente, em aplicações que requerem realismo sem a necessidade de modelagem de toda a edificação (modelos simplificados), servindo como base para modelagem de diversos elementos ou como um

recurso para facilitar a visualização e análise de feições importantes contidas nas texturas, como mapeamento de danos.

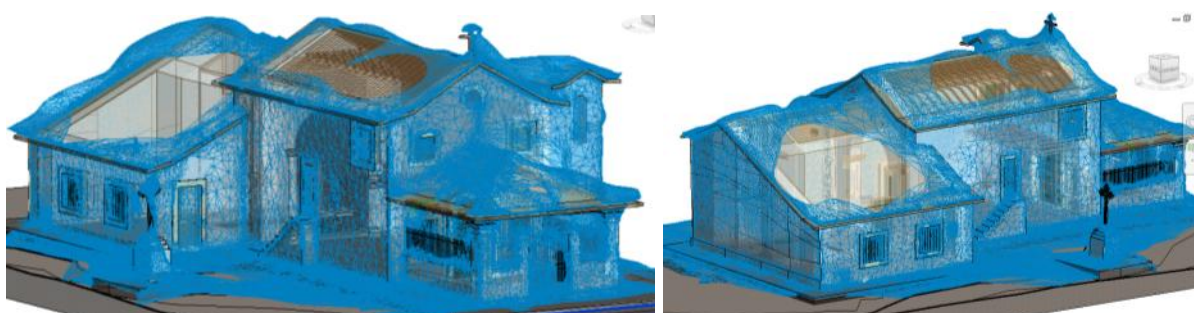
7.6.4 Métodos de levantamento

Conforme já apresentado, foram utilizados para a modelagem BIM da capela, diversos métodos de levantamento, cada um com suas particularidades, resolvendo problemas específicos.

O principal método adotado foi a varredura a laser, uma vez que a "nuvem de pontos" capturada pelo *3D laser scanner* serviu como base geral para toda a modelagem BIM realizada. A rapidez no levantamento de grande quantidade de informações e a precisão dos resultados confirmam o grande potencial dessa tecnologia para documentação de edificações existentes, especialmente em cadastros detalhados de monumentos históricos que apresentam irregularidades significativas.

A técnica DSM foi mais adequada para o levantamento de objetos complexos e de pequenas dimensões (estátuas), permitindo gerar modelos geométricos detalhados e com elevada qualidade de texturização. O levantamento externo da capela por DSM gerou um modelo incompleto e menos preciso do que a varredura a laser, como pode ser visto na sobreposição entre o modelo BIM (produzido com base nos dados obtidos pelo *laser scanner*) e a malha TIN gerada pelo DSM (Figura 242).

Figura 242 - Sobreposição do modelo BIM com a malha TIN (em azul) gerada por DSM, visualizada em dois diferentes ângulos



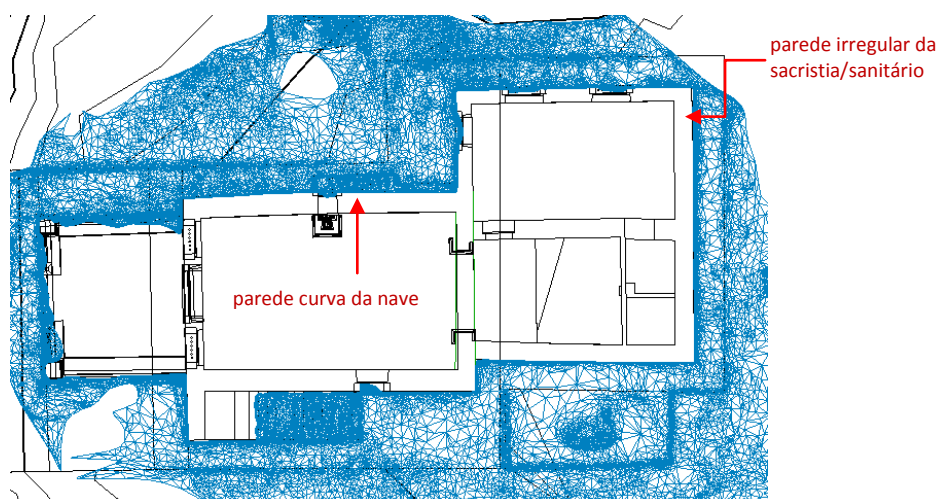
Fonte: elaboração da autora.

A menor precisão está relacionada, principalmente, à menor resolução do modelo gerado por DSM em relação à varredura a laser e a presença de grandes áreas sem informação (principalmente telhados e fachada principal). Aliado a isso, quando a malha TIN é importada

no Revit (formato DXF), perde-se o atributo da textura, dificultando a percepção das esquadrias e outros detalhes das fachadas.

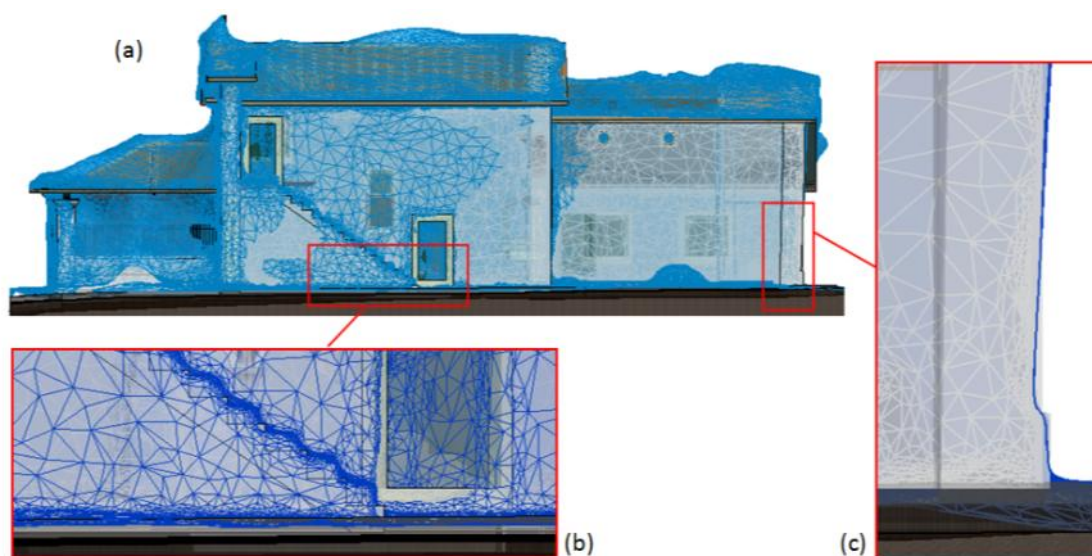
Apesar dessas questões, é importante ressaltar que o DSM permitiu registrar de modo adequado as formas gerais das paredes (Figura 243), com destaque para a parede curva da nave (fachada nordeste) e a parede irregular da sacristia/sanitário (Figura 244c).

Figura 243 - Sobreposição do modelo BIM com a malha TIN gerada por DSM, visualizada em planta baixa



Fonte: elaboração da autora.

Figura 244 - Sobreposição do modelo BIM com a malha TIN gerada por DSM (azul): (a) fachada sudoeste; (b) detalhe da escada; (c) detalhe da parede



Fonte: elaboração da autora.

A grande diferença de resultados produzidos por DSM em modelos de pequenas e grandes dimensões (estátua e edificação, respectivamente), justifica-se pelos seguintes aspectos:

- foram tomadas fotografias com os mesmos valores de resolução (4.608 x 3.456 *pixels*), fazendo com que os elementos fotografados mais distantes (edificação) tivessem menor definição;
- a estátua apresentava uma textura bem definida (não homogênea), permitindo a identificação de mais feições e gerando um modelo mais denso;
- menores valores da relação R (B/L) na tomada fotográfica da estátua e maior facilidade para a tomada fotográfica de diversos ângulos, diferentemente da capela, em que não foi possível levantar a cobertura e a fachada principal de forma adequada;
- a edificação tem forma poligonal, tornando mais difícil o registro de quinas (entre degraus e paredes, por exemplo) que tendem a ficar com forma suavizada e curva (Figura 244b e c), pela baixa densidade da "nuvem de pontos".

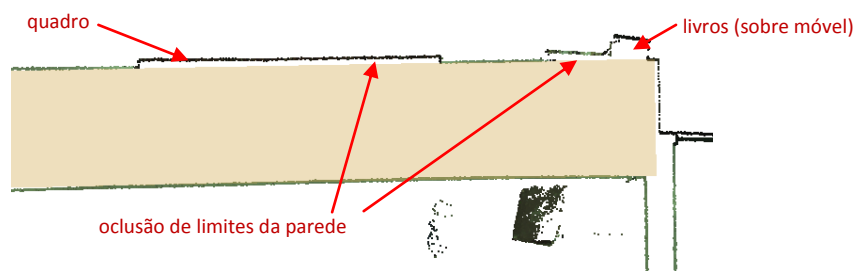
Uma maneira de melhorar o produto gerado pelo DSM seria a utilização de maior quantidade de fotografias, tomadas inclusive de posições mais próximas, de modo a aumentar a definição das feições. No entanto, a segmentação excessiva de fotografias (fotos de trechos da edificação) além de aumentar o tempo de processamento, elevam as chances de erros na geração da malha, dada a maior dificuldade de correlação das feições homólogas. Esses fatores podem inviabilizar o levantamento por DSM.

Nesse sentido, o uso de câmera com maior resolução, ou de imagens panorâmicas, aliado a recursos para tomada fotográfica de pontos elevados (como andaimes ou "caminhão concha"), parecem ser os mais adequados para o levantamento preciso de edificações com a técnica DSM.

Outra técnica utilizada no experimento da capela foi a fotogrametria digital (*stricto sensu*), principalmente para geração de ortofotos a serem usadas como base ao traçado de detalhes planos ou vistas das esquadrias, dada à melhor percepção das feições observadas em elevação, se comparada à "nuvem de pontos". Além disso, a fotogrametria foi utilizada para correção das distorções das fotos de objetos planos ou materiais de acabamento da capela, que foram aplicados em alguns trechos da edificação, visando maior realismo.

Apesar das potencialidades desses métodos de levantamento, destaca-se a importância de procedimentos "tradicionais" realizados em campo, como: (1) o contato do levantador com a edificação para melhor observação de detalhes; (2) a tomada fotográfica; (3) a realização de croquis e anotação de informações que podem não estar presentes ou claras no momento da modelagem a partir de "nuvem de pontos", como encaixe e espessura de peças das esquadrias, funcionamento das aberturas, materiais de acabamento, etc. Além disso, como é comum haver algumas oclusões na "nuvem de pontos" devido a presença de obstáculos (como quadros, móveis, equipamentos, etc.), é necessário interpretar o modelo, comparando com os elementos registrados em fotos e observados em campo (Figura 245).

Figura 245 - Trecho de parede modelada (em bege) vista em planta baixa, junto à sobreposição com os obstáculos (quadros e livros) registrados na "nuvem de pontos", que podem confundir a espessura real da parede



Fonte: elaboração da autora.

O Quadro 32 apresenta uma síntese das aplicações, vantagens e desvantagens dos métodos de levantamento utilizados na Capela de Nossa Senhora da Escada.

Apesar da ampla utilização do modelo de "nuvem de pontos" gerado pela varredura a laser, servindo como base para a modelagem de praticamente todos os elementos construtivos da capela, verificou-se que à medida em que se aumentava o nível de detalhe, tornava-se cada vez mais necessário o uso de métodos complementares, como o DSM, a Fotogrametria Digital (*stricto sensu*) e a medição direta.

Dessa forma, ressalta-se a importância do conhecimento dos profissionais do setor de AECO, (especialmente os envolvidos em projetos de intervenção em edificações existentes) das potencialidades e limitações dos diversos métodos de levantamento, de modo a permitir a escolha dos mais adequados para situações específicas em documentação arquitetônica.

Quadro 32 - Aplicações, vantagens e desvantagens dos métodos de levantamento utilizados

	APLICAÇÕES (ELEMENTOS A SEREM LEVANTADOS)	VANTAGENS	DESVANTAGENS
3D LASER SCANNING	Todos os elementos construtivos (interior e exterior), com detalhamento para objetos complexos	Grande rapidez no levantamento completo da edificação (interior e exterior) Grande precisão do levantamento Facilidade para observação e modelagem dos elementos quando seccionados (vistos em cortes ou plantas baixas)	Alto custo do levantamento Lentidão para manipulação de grande quantidade de informações Arquivos pesados e necessidade de computadores de alto desempenho Necessidade de programas específicos para manipulação de "nuvens de pontos", visando resolver limitações de modelagem de ferramentas BIM
DSM	Objetos mais complexos, junto à necessidade de alta resolução e qualidade de texturização a baixo custo	Baixo custo Geração de modelos geométricos fotorrealísticos detalhados Rapidez no levantamento de objetos com textura não homogênea	Necessidade de objetos com textura não uniforme Se utilizado para grandes objetos, pode haver lentidão para manipulação dos dados
FOTOGRAMETRIA	Objetos poliédricos, planos e alta qualidade de ortofotos e texturas	Baixo custo Rapidez no levantamento de objetos poliédricos, mas principalmente na geração de ortofotos de objetos mais planos (como parede com danos, ou detalhes de esquadrias) As ortofotos permitem maior definição de detalhes das faces dos objetos, quando vistos em elevação (superior à "nuvem de pontos")	Processo que requer grande interação humana Dificuldade de conexão entre dados do interior e exterior das edificações Não adequado para formas complexas
PROCESSOS TRADICIONAIS	Representação detalhada de esquadrias (plantas baixas e cortes), incluindo seu funcionamento Medição de pequenos objetos (ocultos em diversos métodos de levantamento) Anotações diversas	Rapidez no levantamento de objetos pequenos e com baixa complexidade Uso de instrumentos simples de medição Contato próximo com a edificação para observação de detalhes, encaixes das peças, materiais, etc.	Dificuldade no levantamento de formas mais complexas, aliado ao baixo nível de detalhamento nesses casos Necessidade de equipamentos auxiliares para levantamento de grandes dimensões e em alturas elevadas

Fonte: elaboração da autora.

7.6.5 Níveis de detalhe

A modelagem da Capela de Nossa Senhora da Escada em níveis crescentes de detalhamento, visou a identificação de processos adequados a cada nível e uma maior flexibilidade de uso do modelo para diferentes aplicações.

Apesar de ser importante a definição clara dos objetivos do modelo BIM antes mesmo do início do levantamento cadastral, podem ocorrer situações em que o nível de detalhe pretendido ou seus usos potenciais não estejam totalmente definidos.

Nesses casos, é interessante que o modelo apresente recursos para facilitar a seleção de informações desejadas e a visualização em diferentes escalas e níveis de detalhe. O registro de diferentes versões do modelo (começando do mais básico), facilita a escolha de arquivos mais adequados para uma determinada aplicação. Além disso, é importante que existam filtros nos modelos mais detalhados (incluindo os arquivos com famílias de componentes) que auxiliem a seleção de informações de níveis inferiores, de modo a reduzir os tamanhos dos arquivos, quando necessário.

No que pese as vantagens de um modelo que permita alterar o nível de detalhe, esse tipo de modelagem leva um tempo consideravelmente superior, pois é necessário que existam algumas versões de diversos tipos objetos (componentes) a serem usados nos modelos. Desse modo, é importante que a flexibilidade para escolha de diferentes níveis de detalhe seja realizada de modo criterioso.

Capítulo 8

Considerações finais

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho apresentou e discutiu métodos e técnicas para utilização integrada das tecnologias de captura de "nuvens de pontos" para a geração de modelos BIM de edificações existentes, com destaque para as especificidades na documentação do patrimônio arquitetônico.

Para isso, embasou-se nos fundamentos dos sistemas para aquisição de "nuvens de pontos", contextualizados na pesquisa sobre estado da arte das técnicas digitais para levantamento cadastral, nos processos para geração de produtos derivados da "nuvem de pontos", e nos exemplos de aplicações do uso da tecnologia BIM para documentação arquitetônica.

A partir da revisão bibliográfica, foram identificadas diversas limitações dos produtos apresentados, como: simplificação excessiva do modelo BIM, subutilização das "nuvens de pontos", utilização de texturas "genéricas" e problemas para modelagem de formas complexas. Além disso, não foi identificada abordagem consistente e detalhada sobre métodos para manipulação de "nuvens de pontos" em ferramenta BIM, associados a diferentes usos e níveis de detalhamento.

Foi necessário o estudo, a apreensão e a realização de testes em diversas ferramentas, desde programas para geração de "nuvens de pontos" por fotografias, a programas específicos para processamento de "nuvens de pontos" e modelagem geométrica, visando a sistematização de fluxos de trabalho e a proposição de métodos e técnicas para a documentação arquitetônica com o emprego de ferramentas BIM, em diferentes níveis de detalhe.

Através dos estudos e experimentos realizados, foi possível comprovar o potencial do uso integrado dos sistemas de captura de "nuvens de pontos" com a tecnologia BIM para o levantamento e representação de edificações existentes, bem como identificar algumas limitações.

O estudo de caso da Capela de Nossa Senhora da Escada mostrou que é possível e vantajoso realizar a modelagem da maioria dos elementos construtivos diretamente sobre a "nuvem de pontos" inserida no Revit e visualizada em estreitas faixas nas vistas ortogonais. Dessa

forma, evita-se a propagação de erros e reduz-se o tempo de processamento (se comparado ao processo "tradicional" de dupla modelagem¹⁸⁸) e, principalmente, permite geração de um modelo mais preciso do que os baseados em desenhos CAD. Isso é possível na medida em que a "nuvem de pontos" pode ser visualizada em diferentes pontos de vista (diferentes fatiamentos horizontais e verticais), facilitando não somente o ajuste das dimensões (para melhor precisão), como permitindo avaliar (dependendo da discrepância e da finalidade do modelo) se será necessária a utilização de outra técnica de modelagem, ou a importação de modelos produzidos em outros programas.

Com relação à etapa de aquisição de dados, a rapidez na captura de grande quantidade de informações e a precisão dos resultados confirmam o grande potencial dos sistemas de varredura para a obtenção de "nuvens de pontos" a serem usadas como base para a modelagem geral (*3D laser scanning*) ou para detalhes complexos fotorrealísticos (DSM) de edificações existentes.

Conforme já discutido, a grande desvantagem do *3D laser scanning* está relacionada ao elevado custo da tecnologia ou da contratação dos serviços de varredura. No entanto, o surgimento de equipamentos cada vez mais rápidos, precisos e de menor custo, junto a maior divulgação e utilização dessa tecnologia, tendem a reduzir o custo do levantamento.

A grande desvantagem do DSM é a dificuldade para sua aplicação em objetos com textura uniforme. O levantamento de grandes objetos exige, ainda: (1) a utilização de câmera de alta resolução (ou de panoramas fotográficos), compatível com a precisão desejada; (2) recursos para viabilizar a tomada fotográfica completa e adequada do objeto (inclusive de pontos elevados), e (3) métodos auxiliares para o levantamento de pontos específicos no objeto, visando o controle da precisão dos resultados e/ou a complementação de dados em trechos específicos (com problemas na tomada fotográfica ou com texturas mais uniformes)¹⁸⁹.

¹⁸⁸ No processo "tradicional" de trabalho com "nuvens de pontos", elaboram-se plantas baixas, cortes e fachadas em ferramentas CAD (tomando-se como referência a "nuvem de pontos"), para depois serem importados e usados como base para modelagem BIM. Nesse caso, há o processo de dupla modelagem.

¹⁸⁹ Apesar desses dois últimos recursos serem requeridos em alguns casos no levantamento a laser, eles se tornam mais relevantes no DSM, dada a obrigatoriedade de sobreposição dos dados (capturados de diferentes estações) e a necessidade de maior controle do levantamento, devido às diversas variáveis que podem afetar a precisão dos resultados (tipo de textura, diferenças de iluminação, etc.).

Além dessas questões, outro fator de grande influência na não adoção ou no restrito uso desses métodos de levantamento no Brasil, é o desconhecimento das características e potencialidades dessas tecnologias, aliado à falta de capacitação para manipulação e processamento do modelo de "nuvem de pontos", dentro e fora da ferramenta BIM, especialmente para representação de formas irregulares.

Acredita-se que esse último aspecto justifique a subutilização do modelo de "nuvem de pontos" apresentada nos artigos (internacionais) consultados, somada à complexidade dos processos, à diversidade de ferramentas necessárias e à variedade de produtos que podem ser gerados.

8.1 CONCLUSÕES

Algumas questões que surgiram desde o início da pesquisa e guiaram os diversos caminhos da investigação puderam ser melhor compreendidas e encaminhadas para proposição dos métodos de trabalho.

Em se tratando da representação detalhada de edificações existentes, especialmente as de interesse histórico-cultural, há necessidade de criação de diversas famílias de componentes, dada à falta de correspondência entre os componentes disponíveis e os observados nos edifícios históricos. A etapa de modelagem desses elementos construtivos, seja através do editor de famílias, seja através da modelagem *In-Place*, demanda tempo significativamente superior à modelagem dos elementos presentes nas famílias de sistema (como paredes, pisos, escadas e forros).

Apesar da precisão da representação da "nuvem de pontos" e da possibilidade de se observar diversas irregularidades dos elementos construtivos, a modelagem precisa dessas características deve ser realizada de modo criterioso, devido à complexidade dos processos envolvidos, ao elevado tempo de processamento e às limitações de alguns tipos de modelo.

Nesse sentido, a categorização do modelo BIM em diferentes níveis de detalhe, associados a finalidades (ou usos potenciais do mesmo), escalas, densidades da "nuvem de pontos", desvios aceitáveis e tipos de elementos a serem modelados, tal como apresentado no capítulo 7, auxiliam na definição das informações a serem acrescentadas e da maneira como serão modeladas ou inseridas.

Essa classificação serve como referência inicial no processo de documentação em ferramenta BIM, mas deve ser adaptada para atender às necessidades específicas de cada situação, que vão permitir a determinação mais precisa dos recursos necessários e das estratégias de modelagem.

Nos estudos de caso, foram identificadas algumas limitações, não somente relacionadas aos produtos gerados, como também aos processos para obtenção dos resultados esperados, especialmente quando há necessidade de modelos com alto nível de detalhe, com registro preciso de formas complexas/irregulares.

Com relação aos produtos, verificou-se que existem diversas possibilidades de geração do modelo, tanto através da modelagem diretamente em ferramenta BIM como da importação da geometria, tomando-se como referência produtos gerados por diferentes técnicas de levantamento (*laser scanning*, DSM, fotogrametria digital e medição direta).

A escolha do fluxo de trabalho, incluindo a técnica de levantamento a ser utilizada, depende das características do objeto e das finalidades do modelo. No caso de objetos irregulares, não foi identificada uma única técnica que permitisse gerar um “modelo completo”, garantindo, ao mesmo tempo, qualidade na representação 2D, 3D e textura fotorrealística, com a possibilidade de quantificação nas planilhas do Revit. Nesses casos, foi necessária a utilização conjunta de mais de um modelo visando ampliar suas aplicações.

Além disso, a modelagem detalhada dos elementos construtivos (especialmente os irregulares) pode aumentar significativamente o tamanho dos arquivos, dificultando a manipulação e o compartilhamento das informações. Nesse sentido, é importante que o nível de detalhe e a organização dos dados estejam coerentes com as aplicações desejadas, de modo a facilitar o acesso e a seleção das informações por diferentes usuários/profissionais, para os usos pretendidos.

Com relação aos processos, as maiores limitações identificadas foram: necessidade de utilização de diferentes métodos de levantamento e programas, morosidade para modelagem de formas complexas e detalhadas e problemas de interoperabilidade entre as ferramentas.

A representação de formas complexas/irregulares exige domínio não somente dos recursos de modelagem da ferramenta BIM (nesse caso, o Revit), como conhecimento amplo dos métodos de levantamento arquitetônico (especialmente os sistemas de varredura de "nuvens de pontos" e a fotogrametria digital) e de outros programas, como o Geomagic Studio e o AutoCAD, de modo a permitir identificar possibilidades, limitações e aplicações de cada um deles.

Essas questões envolvem uma complexidade de processos, exigem treinamento, experimentação e sistematização de métodos e técnicas visando atender às finalidades pretendidas. A morosidade não está relacionada somente à etapa de aprendizado das tecnologias, mas a sua utilização efetiva na documentação detalhada de formas complexas/irregulares. Aliado a isso, os problemas de interoperabilidade entre as ferramentas são frequentes, e demandam uma grande quantidade de testes para evitar/minimizar perda de informações.

Além da inclusão de modelos complexos, houve atenção especial no mapeamento de textura fotorrealística em modelos BIM. Essa questão merece destaque, principalmente quando se trata de documentação de edificações históricas, dada à riqueza de informações contidas nas texturas dos objetos, que podem ser tanto elementos decorativos (pinturas ou pequenos ornamentos), como danos e patologias, que precisam ser registrados, visualizados, quantificados e analisados.

As texturas fotorrealísticas ampliam as possibilidades de visualização da edificação (em ângulos e níveis de detalhe definidos pelo usuário), distinta da observação planimétrica e fragmentada da fotografia (CAVALCANTI NETO; AMORIM, 2006). Elas podem ser aplicadas nas faces dos objetos de interesse, como forma de representação das superfícies, ou usadas como base para geração de outros produtos (2D ou 3D), de modo a ressaltar as informações desejadas.

Além da abordagem sobre métodos para modelagem complexa e mapeamento de texturas fotorrealísticas, foram experimentadas maneiras para associação de atributos gráficos e alfanuméricos, através da criação de parâmetros compartilhados. Dentre os atributos gráficos (imagem e foto histórica), foram associados arquivos de fotografias atuais e históricas da capela, vinculada aos elementos construtivos principais. Dentre os

alfanuméricos, foram criados parâmetros como dados históricos, observações do levantamento e desvios (horizontal, lateral e vertical).

A utilização de parâmetros de desvios mostrou-se uma interessante forma de registrar as discrepâncias entre os modelos gerados na ferramenta BIM e sua forma "real", visualizada na "nuvem de pontos". Esse método permitiu a simplificação na modelagem de diversos elementos construtivos (com destaque para as paredes), garantindo a identificação de objetos com desvios acima dos requeridos para uma dada aplicação. Aliado a isso, deixou-se a "nuvem de pontos" inserida no arquivo do Revit, para eventuais consultas ou refinamento posterior do modelo BIM.

Apesar das vantagens dos métodos de levantamento utilizados, incluindo os sistemas de varredura e a fotogrametria digital, deve-se ressaltar que somente as informações visíveis foram capturadas.

A criação de um modelo BIM de edificações existentes com a incorporação de dados ocultos (como instalações, composição das paredes, elementos estruturais) e outros atributos semânticos (resistência dos materiais, estado de conservação, danos, etc.), representa um grande desafio, pela dificuldade de obtenção dessas informações, especialmente quando não existem registros detalhados das fases de projeto e construção.

Nesses casos, é importante a participação de especialistas de diversas disciplinas e o uso de técnicas não destrutivas para aquisição de informações ocultas dos elementos construtivos, como termografia infravermelho, georradar e radiografia (por raios X ou gama), citadas no capítulo 2. Um recurso interessante, que permite a incorporação de informações semânticas e ocultas dos objetos, facilitando a análise do modelo para fins de manutenção ou desenvolvimento de propostas de intervenção, é o mapeamento de imagens termográficas em determinados elementos construtivos modelados em ferramenta BIM, como paredes, pisos e tetos.

Por fim, apesar de algumas limitações encontradas, a integração das tecnologias de captura de "nuvens de pontos" e BIM é uma tendência promissora, que deve crescer significativamente nos próximos anos, na medida em que forem aprimorados os processos de representação e manipulação das informações das edificações existentes. No entanto,

seu uso efetivo vai muito além do conhecimento de suas potencialidades e limitações, do treinamento, da aquisição e atualização de *software* e *hardware*, mas principalmente, da vontade e disposição em se alterar métodos tradicionais de trabalho, enfrentando desafios, testando processos e estabelecendo padrões e fluxos de trabalho, para melhor aproveitamento dos recursos disponibilizados pelo uso adequado das tecnologias.

8.2 CONTRIBUIÇÕES

Uma série de questões foram estudadas visando superar as limitações encontradas na literatura. Foram experimentados e sugeridos:

- processos envolvendo a modelagem BIM com base na "nuvem de pontos" inserida diretamente no Revit e, em alguns casos, sugerindo a utilização de outros programas;
- integração de tecnologias (tanto para levantamento, como para representação), indicando as mais adequadas para cada situação;
- métodos para aumentar a flexibilidade de uso do modelo, permitindo a alteração do nível de detalhe, através de famílias com elementos representados diferentes níveis de detalhamento;
- métodos para modelagem e registro de elementos complexos e irregulares;
- processos para melhorar a representação de formas existentes, permitindo não somente aumentar o realismo dos modelos BIM, como ampliar suas possibilidades de análise e utilização, com uso de texturas fotorrealísticas e inclusão de modelos complexos.

Acredita-se que o material produzido possa contribuir não só para divulgação do estado da arte em documentação arquitetônica, mas como referência para auxiliar a escolha e utilização das tecnologias de captura de "nuvens de pontos" e BIM pelos profissionais do setor de AECO, especialmente os envolvidos em manutenção e desenvolvimento de projetos de intervenção em edificações existentes, e àqueles ligados às instituições de preservação do patrimônio arquitetônico.

8.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Recomenda-se para o desenvolvimento de trabalhos posteriores, a utilização de técnicas não destrutivas (especialmente a termografia infravermelho e o georradar) para o

estabelecimento de métodos para levantamento, processamento e incorporação de dados ocultos dos objetos, visando a geração de modelo BIM com grande quantidade de informações semânticas associadas. Além disso, sugere-se a exportação do modelo para outros programas, visando sua utilização em diferentes etapas do ciclo de vida da edificação, e procurando superar ou minimizar problemas decorrentes da falta de interoperabilidade entre programas.

Outras possibilidades de investigação sobre o uso do BIM em edificações existentes são apontadas a seguir:

- uso efetivo do modelo BIM de edificação de interesse histórico-cultural para desenvolvimento de projetos de restauração, comparando com processos e produtos obtidos pelos métodos tradicionais de documentação e projeção arquitetônica;
- estabelecimento de padrões de representação gráfica de edifícios históricos em ferramentas BIM, com uso integrado de texturas fotorrealísticas;
- aprofundamento dos estudos em direção à especificação e consolidação de um padrão HBIM, adequado às necessidades da realidade brasileira;
- estudo de formas de utilização do modelo BIM para divulgação e visualização do patrimônio arquitetônico com tecnologias *web*;
- integração de modelos BIM em modelos de informações urbanas, baseados em plataformas GIS;
- uso do modelo BIM para aplicações em realidade aumentada.

Com relação às técnicas de levantamento, é interessante a realização de estudos aprofundados que contemplem:

- uso integrado da Fotogrametria Esférica (para geração de panoramas fotográficos) e DSM, visando aumentar a resolução das "nuvens de pontos" geradas por fotografias e a precisão no levantamento de edificações;
- sistemas para captura de imagens de pontos elevados (como VANT), para complementação dos dados capturados por sistemas terrestres.

Referências

REFERÊNCIAS

ABDELHAFIZ, A. **Integrating Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning**. 2009. 115 f. Tese (Doutorado) - Institute for Geodesy and Photogrammetry, Technical University Braunschweig, Braunschweig, 2009.

AEC (UK) Committee. AEC (UK) BIM Protocol. Implementing UK BIM Standards for the Architectural, Engineering and Construction industry. Version 2.0. 2012.

AQUINO, Josilto Oliveira. **Procedimentos de proteção radiológica em aplicações industriais para radiografia computadorizada**. 2009. 69 f. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

AIA. American Institute of Architects. AIA document G202 – 2013: Project Building Information Modeling Protocol Form. 2013. Disponível em: <<http://www.aia.org/aiaucmp/groups/aia/documents/pdf/aiab099086.pdf>>. Acesso em: 7 maio 2014.

AIA. American Institute of Architects. National Documents Committee. DocumentE202 – Building Information Modeling Protocol Exhibit. Washington, DC, 2008.

ALVES, A. B. M; OLIVEIRA, L. B. Projeto de restauro na Ilha da Fumaça. In: ARQ.DOC 2010 – SEMINÁRIO NACIONAL: DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COM USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS, 1., 2010, Salvador. **Anais...** Salvador: FAUFBA, 2010. 1 CD-ROM.

ALVES, Felipe da Silva. **Uso do georradar para estudos de estratigrafia do subsolo**. 2011. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

AMORIM, Arivaldo Leão de. **BIM - Building Information Modeling**. Notas de Aula da disciplina Informática e Desenho I – Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010b.

AMORIM, Arivaldo Leão de. Documentação do patrimônio arquitetônico do estado da Bahia com tecnologias digitais. In: COMPUTAÇÃO GRÁFICA: PESQUISAS E PROJETOS RUMO À EDUCAÇÃO PATRIMONIAL, 1., 2008, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: AHMWL, 2008.

AMORIM, Arivaldo Leão de. Methodological aspects of architectural documentation. In: INTERNATIONAL CIPA SYMPOSIUM, 23., 2011, Prague. **Proceedings...** Prague: CIPA, 2011. Disponível: <<http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/007.pdf>>. Acesso em 10 jan. 2014.

AMORIM, Arivaldo Leão de. **Projeto de documentação arquitetônica** - Introdução. Notas de Aula da disciplina: Tecnologias digitais na documentação do patrimônio arquitetônico – Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010a.

AMORIM, Arivaldo Leão de. **Representação numérica da forma**. Notas de Aula da disciplina: Tecnologias digitais na documentação do patrimônio arquitetônico – Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

ANIL, Engin Burak et al. Assessment of Quality of As-is Building Information Models Generated from Point Clouds Using Deviation Analysis. In: IS&T / SPIE - ELECTRONIC IMAGING SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2., 2011, San Jose. **Proceedings...** San Jose: SPIE, 2011. Disponível em: <www.ri.cmu.edu/pub_files/2011/1/2011-anil-spie-qa-final.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2012.

ANIL, Engin Burak; Burcu AKINCI; HUBER, Daniel. Representation requirements of as-is building information models generated from laser scanned point cloud data. In: ISARC2011 - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION, 28., 2011, Seul. **Proceedings...** Seul: ISARC, 2011. Disponível em: <<http://www.iaarc.org/publications/fulltext/S10-3.pdf>>. Acesso em: 2 mar. 2012

ATTAR, Ramtin et al. 210 King Street: A Dataset for Integrated Performance Assessment. In: SIMAUD - SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN, 2010, Orlando. **Proceedings...** Orlando: SIMAUD, 2010.

AZEVEDO, Teresa Cristina de Sousa. **Reconstrução e Caracterização de Estruturas Anatômicas Exteriores usando Visão Activa**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Universidade do Porto, 2002.

BARBER, D.; MILLS, J.; ANDREWS, D. **3D laser scanning for heritage: Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture (second edition)**. Swindon: English Heritage, 2011.

BARRACA, Nuno Ricardo Silva. **Aplicação da técnica Georadar à reabilitação de património edificado**. 2013. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) - Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2013.

BEDRICK, Jim. A Level of Development Specification for BIM Processes. **AECbytes**. May 2013. Disponível em: <http://www.aecbytes.com/viewpoint/2013/issue_68.html>. Acesso em: 18 jul. 2014.

BEDRICK, Jim. Organizing the Development of a Building Information Model. **AECbytes**. Sept. 2008. Disponível em: <<http://www.aia.org/groups/aia/documents/pdf/aiab078868.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2014.

BENNETT, Terry D. **BIM and Laser Scanning for As-built and Adaptive Reuse Projects: The Opportunity for Surveyors**. [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: <<http://www.amerisurv.com/content/view/6364/>>. Acesso em: 5 out. 2010.

BIMFORUM. **Level of Development Specification**. 2013. Disponível em: <<http://bimforum.org/wp-content/uploads/2013/08/2013-LOD-Specification.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2014.

BOEHLER, W.; HEINZ, G.; MARBS, A. The potential of non-contact close range laser scanners for Cultural heritage recording. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF CIPA, 18., 2001, Postdam. **Proceedings...** Postdam: Cipa, 2001.

BRANDALIZE, M. C. B.; PHILIPS, J. W. Padrões de Classificação de Equipamentos Laser Utilizados em Levantamentos Terrestres e Aéreos. **Geodésia Online - Revista da Comissão Brasileira de Geodésia**, Florianópolis, v. 1, p. 1, 2002.

BREYSSE, Denys. **Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined techniques**. Springer: New York. 2012.

BRITO, Bruno Leão de; GROETELAARS, Natalie Johanna; AMORIM, Arivaldo Leão de. O uso da tecnologia Dense Stereo Matching para levantamento de edificações existentes. In: ARQ.DOC 2012 - SEMINÁRIO NACIONAL: DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS, 2., 2012, Belém. **Anais eletrônicos...** Belém: LACORE/UFPA, 2012.

BRONZINI, Elisa. **Il Pelourinho a Salvador do Bahia: Centro Storico e Culturale del Brasile - documentazione metrica**. 2013. Tese di Laurea (Trabalho Final de Graduação) - Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica delle Marche, 2013.

BRUMANA, Raffaella et al. From survey to HBIM for documentation, dissemination and management of built heritage - The case study of St. Maria in Scaria d'Intelvi. In: DIGITAL HERITAGE INTERNATIONAL CONGRESS, 1., 2013, Marseille. **Proceedings...** Marseille: Digital Heritage, 2013. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/259189689_From_survey_to_HBIM_for_documentation_dissemination_and_management_of_built_heritage_The_case_study_of_St_Maria_in_Scaria_dIntelvi>. Acesso em: 22 de jul. 2014.

BRYAN, Paul; BLAKE, Bill; BEDFORD, Jon. **Metric Survey Specifications for Cultural Heritage**. [S.I.]: English Heritage, 2009.

BUCHANAN, Thomas. **Photogrammetry and projective geometry-an historical survey**. 2010. Disponível em: <<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2010/5142/pdf/bu14.pdf>>. Acesso em: 2 mai. 2014.

CARDOSO, Christina Araújo Paim. Formas arquitetônicas: possibilidades em ambiente computacional. 2005. 228 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

CARVALHO, Jenner Miranda de. **Investigação experimental e numérica aplicada a um edifício caixão da região metropolitana do Recife**. 2010. 327 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2010.

CAVALCANTI NETO, J. R.; AMORIM, A. L. Simulação digital: modelos digitais fotorealísticos no mapeamento e quantificação de patologias em projetos de restauração. In: SIGRADI 2006 - CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE GRÁFICA DIGITAL, 10., 2006, Santiago do Chile. **Anais...** Santiago do Chile: SIGRADI, 2006.

CENTENO, J. A. S; WUTKE, J. D.; KERSTING, A. P. B. Comparação de geração de modelos tridimensionais usando laser scanner terrestre e restituição fotogramétrica monocular. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO - SIMGEO, 1., 2004, Recife. **Anais...** Recife: 2004.

CENTENO, Jorge Antonio Silva; MITISHITA, Edson Aparecido. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: a experiência da UFPR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** 2007, Florianópolis: INPE, p. 3645-3652.

CHADER, Martin. **The Value of 3rd Generation, Parametric Modeling from 3D Scan Data.** 2008. Disponível em: <www.rapidform.com/public/downloadweb/Whitepaper_on_3G_Reverse_Modeling_by_Rapidform.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2010.

CHECCUCCI, E. S.; AMORIM, A. L. Tecnologias computacionais de auxílio ao projeto de edificações: potencialidades versus dificuldades de implantação. In: SIGRADI 2008 - CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE GRÁFICA DIGITAL, 12., 2008, Havana. **Anais...** Havana: SIGRADI, 2008.

CHIABRANDO, F. et al. Very close nadir images: a proposal for quick digging survey. In: COMMISSION V SYMPOSIUM, 2010, Newcastle upon Tyne. **Proceedings...** Newcastle upon Tyne: ISPRS, 2010. p.155-160.

CONTRERAS, Cindy. 3D Scanning Training for Archaeology and Ethnobotany. 2009.

CORTIZO, Eduardo Cabaleiro. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações:** ênfase em edificações do patrimônio histórico. 2007. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CRAMER, Johannes; BREITLING, Stefan. **Architecture in existing fabric:** Planning, Design, Building. Berlin: Birkhauser, 2007. 221 p.

D'ANNIBALE, E. Image based modeling from spherical photogrammetry and structure for motion. The case of the Treasury, nabatean architecture in Petra. In: INTERNATIONAL CIPA SYMPOSIUM, 23., 2011, Prague. **Proceedings...** Prague: CIPA, 2011. Disponível: <<http://www.cipa2011.cz/proceedings/pdfs/A-1/dAnnibale.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2014.

DE LUCA, Livio et al. A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage. **Computers & Graphics**, n. 35, p. 227–241, 2011.

DE LUCA, Livio. 3D Modeling and Semantic Enrichment in Cultural Heritage. In: PHOTOGRAMMETRIC WEEK - FROM HIGH DEFINITION POINT CLOUDS TO 3D VIRTUAL REALITY MODELS, 54., 2013, Stuttgart. **Proceedings...** Stuttgart: Institute for Photogrammetry/University of Stuttgart, 2013.

DEBEVEC, P. E.; TAYLOR, C. J.; MALIK, J. Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry - and image-based approach. In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES - SIGGRAPH 96, 23., 1996, New York. **Proceedings...** New York: [s.n.], 1996.

DONGZHEN, J. et al. Indoor 3D Modeling and Visualization with a 3D Terrestrial Laser Scanner. In: LEE, J.; ZLATANOVA, S. **3D Geo-Information Sciences.** Heidelberg: Springer, 2009.

DORE, Conor; MURPHY, Maurice. **Integration of HBIM and 3D GIS for Digital Heritage Modelling.** In: DIGITAL DOCUMENTATION, Edinburgh. Edinburgh: [s.n.], 2012.

DORE, Conor; MURPHY, Maurice. Semi-automatic generation of as-built bim façade geometry from laser and image data. **ITcon**, v. 19, p. 20-46, 2014. Disponível em: <http://www.itcon.org/data/works/att/2014_2.content.07369.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2014.

DUTESCU, Eugen. **Digital 3D Documentation of Cultural Heritage Sites Based on Terrestrial Laser Scanning**. 2006. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, 2006.

EAST, Bill. *The COBie Guide: a commentary to the NBIMS-US COBie standard*. 2013.

EASTMAN, Chuck et al. **BIM Handbook: A guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

ENGLISH HERITAGE. **Understanding Historic Buildings: a guide to good recording practice**. Swindon: English Heritage, 2006.

FANGI, Gabriele. Multiscale multiresolution Spherical Photogrammetry with long focal lenses for architectural surveys. In: COMMISSION V SYMPOSIUM, 2010, Newcastle upon Tyne. **Proceedings...** Newcastle upon Tyne: ISPRS, 2010. p. 228-233.

FANGI, Gabriele. **Spherical Photogrammetry for Heritage Documentation**. In: ARCHDOC WORKSHOP, 2011, Leuven. Arquivo de apresentação.

FARINA, Humberto. **Projeto integrado, BIM, certificações, comissionamento: conheça os desafios a serem enfrentados pelo projetista**. In: ENCONTRO NACIONAL DE EMPRESAS PROJETISTAS E CONSULTORES DA ABRAVA, 13., 2013, São Paulo. Arquivo de apresentação.

FIDLER, John A. Overview of Diagnostic Indirect Tools for Conservation. In: EPPICH, Rand; CHABBI, Amel. **Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places: Illustrated examples**. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2007.

FREI E.; KUNG, J.; BUKOWSKI, R. High-definition surveying (HDS): a new era in reality capture. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, p. 262-271, 2003.

GARAGNANI, S.; MANFERDINI, A. M. Parametric accuracy: Building Information Modeling process applied to the cultural heritage preservation. In: ISPRS INTERNATIONAL WORKSHOP 3D-ARCH 2013 - 3D VIRTUAL RECONSTRUCTION AND VISUALIZATION OF COMPLEX ARCHITECTURES, 4., 2013, Trento. **Proceedings...** Trento: ISPRS, 2013.

GENECHTEN, Bjorn van et al. **Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications**. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2008. Disponível em: <<https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/201130>>. Acesso em: 8 mar. 2011.

GILARDONI, A.; ORSINI, R. A.; TACCANI, S. **X-rays in Art: Physics, technique, applications**. Como, Itália: Gilardoni S.p.A., 1977. 232 p.

GIUDICE, Matteo; OSELLO, Anna. BIM for cultural heritage. In: CIPA SYMPOSIUM, 24., 2013, Strasbourg. **Proceedings...** Strasbourg: CIPA, 2013. Disponível em: <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W2/225/2013/isprsarchives-XL-5-W2-225-2013.pdf>>. Acesso em 28 set. 2013.

GONÇALES, Rodrigo. **Dispositivo de varredura laser 3D terrestre e suas aplicações na Engenharia, com ênfase em túneis**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GROETELAARS, Natalie Johanna. **Um Estudo da Fotogrametria Digital na documentação de formas arquitetônicas e urbanas**. 2004. 257 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

GROETELAARS, Natalie Johanna; AMORIM, Arivaldo Leão de. Dense Stereo Matching (DSM): conceitos, processos e ferramentas para criação de nuvens de pontos por fotografias. In: SIGRADI 2012 - CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 16., 2012, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SIGRADI, 2012a.

GROETELAARS, Natalie Johanna; AMORIM, Arivaldo Leão de. Nuvem de pontos na criação de modelos BIM: aplicações em documentação arquitetônica. In: TIC 2011 - ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 5., 2011, Salvador. **Anais eletrônicos...** Salvador: FAUFBA, 2011a.

GROETELAARS, Natalie Johanna; AMORIM, Arivaldo Leão de. Nuvem de pontos na criação de modelos BIM: aplicações em documentação arquitetônica. In: SCHEER, Sergio et al. (org.). **Modelagem da informação da construção: uma experiência brasileira em BIM**. Curitiba: UFPR, 2013b. p. 519-537. ISBN 978-85-87801-24-1.

GROETELAARS, Natalie Johanna; AMORIM, Arivaldo Leão de. Tecnologia 3D Laser Scanning: características, processos e ferramentas para manipulação de nuvens de pontos. In: SIGRADI 2011 - CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 15., 2011, Santa Fé. **Anais eletrônicos...** Santa Fé: SIGRADI, 2011b.

GROETELAARS, Natalie Johanna; AMORIM, Arivaldo Leão de. Tecnologias 3D Laser Scanning e BIM: Aplicações em Arquitetura e Urbanismo. **Cadernos PPG-AU/FAUFBA**, Salvador, ano 11, n. 1, p. 97-116, 2013a. ISSN 1679-6861.

GROETELAARS, Natalie Johanna; AMORIM, Arivaldo Leão de. Um panorama sobre o uso de nuvens de pontos para criação de modelos BIM. In: ARQ.DOC 2012 - SEMINÁRIO NACIONAL: DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS, 2., 2012, Belém. **Anais eletrônicos...** Belém: LACORE/UFPA, 2012b.

GRUEN, Armin. Fundamentals of videogrammetry - A review. **Human Movement Science**, n. 16, p. 155-187, 1997.

GSA - General Services Administration. **GSA Building Information Modeling Guide Series: 03** – GSA BIM Guide for 3D Imaging, 2009. Disponível em: <http://www.gsa.gov/graphics/pbs/GSA_BIM_Guide_Series_03.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2010.

GUIMARÃES, Aline Lago; GROETELAARS, Natalie Johanna; AMORIM, Arivaldo Leão de. Modelagem BIM a partir de nuvem de pontos e restituição fotogramétrica: estudos de caso para documentação arquitetônica. In: ARQ.DOC 2012 - SEMINÁRIO NACIONAL: DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS, 2., 2012, Belém. **Anais eletrônicos...** Belém: LACORE/UFPA, 2012.

HECHT, Jeff. **The Laser Guidebook**. New York: McGraw-Hill, 1999.

HENGEL, Anton van den et al. VideoTrace: Rapid interactive scene modelling from video. In: SIGGRAPH 2007, 26., 2007, New York. **Proceedings...** New York: ACM, 2007. Disponível em: <http://www.informatik.uni-marburg.de/~thormae/paper/Siggraph07_videotrace.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2014.

HUBER, Daniel et al. Methods for Automatically Modeling and Representing As-built Building Information Models. In: NSF ENGINEERING RESEARCH AND INNOVATION CONFERENCE, 1., 2011, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: NSF, 2011. Disponível em: <http://www.ri.cmu.edu/pub_files/2011/1/2011-huber-cmmi-nsf-v4.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2012.

HUBER, Daniel. et al. Using Laser Scanners for Modeling and Analysis in Architecture, Engineering, and Construction. In: CISS 2010 - ANNUAL CONFERENCE ON INFORMATION SCIENCES AND SYSTEMS, 44., 2010, Princeton. **Proceedings...** Princeton: CISS, 2010.

HUBER, Daniel; AKINCI, Burcu. As-Is Modeling – Capturing Existing Spatial Conditions Using Laser Scanners. In: AKIN, Ömer. **Embedded Commissioning of Building Systems**. Norwood: Artech House, 2011.

HULLO, J. F.; GRUSSENMEYER, P.; FARES, S. Photogrammetry and Dense Stereo Matching approach applied to the documentation of the cultural heritage site of Kilwa (Saudi Arabia). In: CIPA SYMPOSIUM, 22., 2009, Kyoto. **Proceedings...** Kyoto: CIPA, 2009. Disponível em: <<http://cipa.icomos.org/text%20files/KYOTO/132-1.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2010.

IRSCHARA, Arnold et al. Efficient and globally optimal multi view dense matching for aerial images. In: PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES - ISPRS CONGRESS, 22., 2012, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: ISPRS, 2012. Disponível em: <<http://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/I-3/227/2012/isprsannals-I-3-227-2012.pdf>>. Acesso em: 9 maio 2014.

KIMPTON, G. R.; HORNE, M.; HESLOP, D. Terrestrial laser scanning and 3D imaging: Heritage case study – the Black Gate, Newcastle upon Tyne. In: COMMISSION V SYMPOSIUM, 2010, Newcastle upon Tyne. **Proceedings...** Newcastle upon Tyne: ISPRS, 2010. p. 325-330.

KLAAS, Erik; ERBEN, Klaus-Peter; ZINCK, Sebastian. Robotic Scanning Using a White Light Scanner: A new solution for precise automated digitalization of large objects. **Quality Digest Magazine**, ago. 2009. Disponível em: <<http://www.qualitydigest.com/inside/cmssc-article/robotic-scanning-using-white-light-scanner.html#>>. Acesso em: 16 maio 2014.

KUMAR, Sanjay; MAHTO, Dalgodind. Recent Trends In Industrial And Other Engineering Applications of Non Destructive Testing: A Review. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 4, n. 9, September, 2013.

KWIATEK, K.; TOKARCZYK, R. Photogrammetric applications of immersive video cameras. In: ISPRS TECHNICAL COMMISSION V SYMPOSIUM, 2014, Riva del Garda. **Proceedings...** Riva del Garda: ISPRS, 2014. Disponível em: <<http://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/II-5/211/2014/isprsannals-II-5-211-2014.pdf>>. Acesso em: 31 maio 2014.

LETELLIER, Robin. **Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places: Guiding Principles**. Los Angeles: J. Paul Getty Trust, 2007. 174 p.

LIMA, V. J.; AULBACH, F.; BETREUERIN, M. F. **Capela Nossa Senhora da Escada- Abschlussarbeit Aufbaustudium Denkmalpflege**. 2004. 363 f. Monografia (Especialização em Conservação de Monumentos) - Technische Universität Berlin.

LOPES, João Manuel Brisson. **Modelação geométrica**. Notas de aula da disciplina Computação Gráfica, Universidade Técnica de Lisboa. 2013.

LÓPEZ, Guillermo Ángel Pérez. **Aforapro**: reconhecimento de objetos invariantes sob transformações afins. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LOWE, David G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. **International Journal of Computer Vision**, n. 60, p. 91–110, 2004.

MANFERDINI, A. M.; REMONDINO, F. A Review of Reality-Based 3D Model Generation, Segmentation and Web-Based Visualization Methods. **International Journal of Heritage in the Digital Era**, v. 1, n. 1, p. 103-124, mar. 2012. Disponível em: <<http://multi-science.metapress.com/content/1242674440124408/fulltext.pdf>>. Acesso em: 5 abr. 2012.

MANO, André. **Satellite navigation / Navegação por satélite** - o essencial. Torres Vedras: ALT. 2012. Disponível em: <https://www.academia.edu/2150523/O_Essencial_sobre_Sistemas_de_Navagacao_Global_por_Satelite_GNSS_>. Acesso em: 10 maio 2014.

MARTENS, Bob; PETER, Herbert. Developing Systematics Regarding Virtual Reconstruction of Synagogues. In: ACADIA 2002 - ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN, 2002, Pomona. **Proceedings...** Pomona: ACADIA, 2002. p. 349–356. Disponível em: <<http://www.re-h.nl/koutamanis/image05/martens/f299.content.pdf>>. Acesso em: 10 de fev. 2012.

MATEUS, Luís Miguel Cotrim. **Contributos para o Projecto de Conservação, Restauro e Reabilitação**. Uma metodologia documental baseada na fotogrametria digital e no varrimento laser 3D terrestres. 2012. 339 f. Tese (Doutorado em Arquitectura) - Faculdade de Arquitectura, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

MAUCK, Bob; GEE, Richard. Chicago Federal Center: Improving Scan to Revit Modeling through Lean Inspired Workflows and Advanced Technologies, **SparView**, v. 8, n. 5, 29 Março, 2010.

MOONS, Theo; VERGAUWEN, Maarten; GOOL, Luc Van. **3D reconstruction from multiple images**. 2008. Disponível em: <<ftp://ftp.esat.kuleuven.ac.be/psi/visics/konijn/ICVSS08/vangool.pdf>>. Acesso em: 1 maio 2014.

MOREIRA, Thomaz Passos Ferraz. **A influência da parametrização dos softwares CADD arquiteturais no processo de projeção arquitetônica**. 2008. 226 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MURPHY, M.; MCGOVERN, E.; PAVIA, S. Historic building information modelling (HBIM). **Journal of Building Pathology**, v. 27; n. 4, p. 311-327, 2009.

MURPHY, M.; MCGOVERN, E.; PAVIA, S. Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys. In: ISPRS INTERNATIONAL WORKSHOP 3D-ARCH 2011 - 3D VIRTUAL RECONSTRUCTION AND VISUALIZATION OF COMPLEX ARCHITECTURES, 4., 2011, Trento. **Proceedings...** Trento: ISPRS, 2011. Disponível em: <www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/5-W16/pdf/murphy_etal.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

MURPHY, M.; MCGOVERN, E.; PAVIA, S. Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n. 76, 2013. p. 89-102. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006>>. Acesso em: 13 jun. 2014.

MURPHY, M.; MCGOVERN, E.; PAVIA, S. Parametric Vector Modelling of Laser and Image Surveys of 17th Century Classical Architecture in Dublin. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON VIRTUAL REALITY, ARCHAEOLOGY AND CULTURAL HERITAGE - VAST2007, 8., 2007, [S.l.]. **Proceedings...** [S.l]: [s.n], 2007.

NIBS. NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES. National Building Information Modeling Standard. Version1 – Part 1: Overview, Principles and Methodologies. Washington, 2007. 161 p. Disponível em: <http://academics.triton.edu/faculty/fheitzman/NBIMSv1_ConsolidatedBody_11Mar07_4.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2014.

NOGUEIRA, Fabiano Mikalauskas de Souza. **A representação de sítios históricos:** documentação arquitetônica digital. 2010. 215 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

OLIVEIRA, Mário Mendonça de. **A Documentação como Ferramenta de Preservação da Memória:** Cadastro, Fotografia, Fotogrametria e Arqueologia. Brasília: IPHAN / Programa Monumenta, 2008. 144 p.

ORENI, D. et al. Survey turned into HBIM: the restoration and the work involved concerning the Basilica di Collemaggio after the earthquake (L'Aquila). ISPRS - PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 2014, Riva del Garda. **Proceedings...** Riva del Garda: ISPRS, 2014. Disponível em: <<http://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/II-5/267/2014/isprsanals-II-5-267-2014.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

PATIAS, P.; QUINTERO, M. S. Introduction to heritage documentation. In: STYLIANIDIS, E.; PATIAS, P.; QUINTERO, M. S. (Ed.). **CIPA Heritage Documentation: Best Practices and Applications**. Atenas: CIPA, 2011. cap. 1, p. 9-13.

PAUWELS, P. et al. Architectural Information Modelling for Virtual Heritage Application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIRTUAL SYSTEMS AND MULTIMEDIA, 14., 2008, Limassol. **Proceedings...** Budapeste: ARCHAEOLOGIA, 2008.

PAYNE, A. **Laser Scanning for Archaeology: A Guide to Good Practice**. 2010. Disponível em: <http://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/LaserScan_Toc>. Acesso em: 5 abr. 2011.

PENTTILÄ, Hannu; RAJALA, Marko. FREESE, Simo. Building Information Modelling of Modern Historic Buildings: Case Study of HUT / Architectural Department by Alvar Aalto. In: ECAADE CONFERENCE, 25., 2007, Frankfurt/Wiesbaden. **Proceedings...** Frankfurt: FH Frankfurt. 2007. Disponível em: <http://cumincad.architecture.net/doc/oai-cumincadworks.id-ecaade2007_124>. Acesso em: 15 maio 2010.

PEREIRA, Ana Paula Carvalho. A adoção do paradigma BIM em escritórios de Arquitetura em Salvador - BA. 2013. 201 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

PEREIRA, Antônio José de Sousa. **Contributos do Airborne Laser Scanning na geração de Modelos Digitais de Elevação e produtos derivados:** ensaio comparativo baseado em questões geomorfológicas e hidrográficas. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território) - Faculdade de Letras, Universidade do Porto, Porto, 2012.

PERRY, Gordon. 3D Scanning: High-Definition Mobile Mapping. **Professional Surveyor Magazine**, v. 30, fev. 2010. Disponível em: <<http://www.profsurv.com/magazine/article.aspx?i=70599>>. Acesso em: 25 jul. 2011.

PIEGL, Les. On NURBS: A Survey. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 11, n. 1, p. 55–71, 1991.

PIERROT-DESEILLIGNY, Marc; DE LUCA, Livio; REMONDINO, Fabio. Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation. In: CIPA SYMPOSIUM, 23., 2011, Prague. **Proceedings...** Prague: CIPA, 2011. Disponível em: <cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/113.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2010.

PLOWMAN CRAVEN LIMITED. **BIM Survey Specification v2.0.3.** Harpenden, 2012. 62 p.

POLLEFEYS, Marc et al. Detailed real-time urban 3D reconstruction from video. **International Journal of Computer Vision**, v. 78, p. 143-167, jul. 2008.

POLLEFEYS, Marc et al. Video-to-3D. In: PHOTOGRAMMETRIC COMPUTER VISION - INTERNATIONAL ARCHIVE OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 2002, [S.I.]. **Proceedings...** [S.I.]: ISPRS, 2002. Disponível em: <<http://www.cs.unc.edu/~marc/pubs/PollefeysISPRS02a.pdf>>. Acesso em 5 mai. 2014.

POLONINI, Flávia Biccias da Silva. **A Modelagem Paramétrica na concepção de formas curvilíneas da Arquitetura Contemporânea.** 2014. 286 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

PORTARI JÚNIOR, Sérgio Carlos. **Um sistema para extração automática de keyframes a partir de fluxos de vídeo direcionado à reconstrução tridimensional de cenários virtuais.** 2013. 79 f. Dissertação (Mestrado em Televisão Digital) - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2013.

PRABHU, Venkatesh. **Techniques for the mediation of heritage preservation Vs. building performance.** 2010. 106 f. Dissertação (Master of Architecture) - Carleton University, Ottawa, 2010.

PROFORMA: Probabilistic Feature-based On-line Rapid Model Acquisition. 2009. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=vEOMzjImsVc>>. Acesso em: 28 maio 2014.

PU, Shi; VOSSELMAN, George. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 6, p. 575–584, nov. 2009.

RAJALA, Marko; PENTTILÄ, Hannu. Testing 3D Building Modelling Framework In Building Renovation. In: ECAADE CONFERENCE, 24., Volos. **Proceedings...** Volos: University of Thessaly, 2006. p. 268-275. Disponível em: <cumincad.architecturez.net/doc/oai-cumincadworks.id-2006_268>. Acesso em: 13 mar. 2010.

REISS, M. L. L.; TOMMASELLI, A. M. G. Reconstrução 3D por Luz Estruturada: calibração dos Vetores Diretores do Feixes de Padrões Projetados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 21., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s.n.], 2003.

REMONDINO, Fabio. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. **Remote Sens**, n. 3, p. 1104-1138, 2011. Disponível em: <[doi:10.3390/rs3061104](https://doi.org/10.3390/rs3061104)>. Acesso em: 20 maio 2014.

REZNICEK, J.; PAVELKA, K. New low-cost 3D scanning techniques for cultural heritage documentation. In: ISPRS CONGRESS, COMMISSION I-VIII, 21., 2008, Beijing. **Proceedings...** Beijing: ISPRS, 2008. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/xxxvii/congress/5_pdf/42.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2012.

SANTOS, Eduardo Toledo. BIM – Building Information Modeling: um salto para a modernidade na tecnologia da informação aplicada à construção civil. In: PRATINI, E. F.; SILVA JUNIOR, E. E. A. (Org.). **Criação, representação e visualização digitais: tecnologias digitais de criação, representação e visualização no processo de projeto**. Brasília: Faculdade de Tecnologia da UNB, 2012. p. 25-62.

SANTOS, Gilnete Leite dos. **Análise e extração de características de imagens termográficas utilizando componentes principais**. 2010. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP, 2010.

SANTOS, Taís de Souza; AMORIM, Arivaldo Leão de. O tour virtual na documentação do patrimônio. In: ARQ.DOC 2010 - SEMINÁRIO NACIONAL: DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS, 1., 2010, Salvador. **Anais eletrônicos...** Salvador: FAUFBA, 2010.

SCHEER, Sergio; AYRES FILHO, Cervantes Gonçalves. Abordando a BIM em níveis de modelagem. In: SBQP 2009 - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1., 2009, São Carlos. **Anais...** São Carlos: USP, 2009.

SEITZ, Steve. **Landmarks in 3D Computer Vision**. Notas de aula de NSF - Workshop on Frontiers of Computer Vision. 2011. Disponível em: <<http://homes.cs.washington.edu/~seitz/talks/3Dhistory.pdf>>. Acesso em: 1 maio 2014.

SILVA, Daliton. **Uma avaliação de algoritmos de rastreamento 2D para uso em reconstrução 3D**. 2010. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Centro de Informática,

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <https://www.gprt.ufpe.br/grvm/Publication/Dissertations/2010/Silva_DissertacaoMestrado_2010.pdf>. Acesso em: 3 maio 2014.

SILVA, Fábio Pinto da. **Usinagem de espumas de poliuretano e digitalização tridimensional para fabricação de assentos personalizados para pessoas com deficiência**. 2011. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SNAVELY, Keith N. **Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections**. Tese (Doutorado em Computer Science & Engineering) - University of Washington, 2008. Disponível em: <<http://grail.cs.washington.edu/theses/SnavelyPhd.pdf>>. Acesso em: 1 maio 2014.

SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. In: SIGGRAPH CONFERENCE, 2006, New York. **Proceedings...** New York: ACM Press, 2006. p. 835–846.

STADLER, A.; KOLBE, T. **CityGML** - Modelling our Environment. 2008. Disponível em: <http://www.igg.tu-berlin.de/uploads/tx_ikgpublication/cityGml_Stockholm.ppt>. Acesso em: 1 out. 2010.

SUTTON, Mark; RAHMAN, Imran; GARWOOD, Russel. **Techniques for Virtual Palaeontology**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2014.

SZELISKI, Richard. **Computer Vision: Algorithms and Applications**. New York: Springer, 2010. 812 p.

TANG, Pingbo et al. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. **Automation in Construction**, v. 19, n. 7, p. 829-843, nov. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>>. Acesso em: 30 dez. 2010.

TOLA, Engin; STRECHA, Christoph; FUA, Pascal. Efficient large-scale multi-view stereo for ultra high-resolution image sets. **Machine Vision and Applications**, 28 mai. 2011. Disponível em: <http://infoscience.epfl.ch/record/164425/files/mvap_1.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2012.

TRIMBLE indoor mobile mapping solution (TIMMS): case study. Trimble, 2010. Disponível em: <www.trimble.com/Indoor-Mobile-Mapping-solution/pdf/TIMMSHighSchool_CaseStudy.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2011.

VANDEZANDE, James. **All Things BIM**. Diary of a 21st Century Architectural Technologist. 2008. Disponível em: <<http://www.allthingsbim.com/2008/12/aia-bim-protocol-e202.html>>. Acesso em: 18 jul. 2014.

VOLTOLINI, Francesca et al. Digital documentation of complex architectures by integration of multiple techniques. The case study of Valer Castle. In: VIDEOMETRICS - SPIE-IS&T ELECTRONIC IMAGING, 9., 2007. **Proceedings...** San Jose: (s.n.), 2007. Disponível em: <http://3dom.fbk.eu/sites/3dom.fbk.eu/files/pdf/voltolini_etal_SPIE07.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2014.

WALFORD, Alan. **A New Way to 3D Scan**: Photo-based Scanning Saves Time and Money. 2009. Disponível em: <<http://www.photodeler.com/downloads/ScanningWhitePaper.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2010.

WESTOBY, M. J. et al. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, [S.l.], n. 179, p. 300–314, ago. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>>. Acesso em: 1 maio 2014.

WOO, J.; WILSMANN, J.; KANG, D. Use of As-Built Building Information Modeling. In: CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS, 2010, Banff. **Proceedings...** Banff: CRC, 2010. Disponível em: <http://ascelibrary.org/proceedings/resource/2/ascecp/373/41109/54_1>. Acesso em: 11 out. 2011.

WUTKE, Juliana Dias. **Métodos para avaliação de um sistema Laser Scanner Terrestre**. 2006. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba, 2006.

ZHIQIANG, Du; WANG, Tingsong; LIU, Guanghui. Detail-preservation 3-D modelling for elaborate Buddha sculpture. In: CIPA SYMPOSIUM, 22., 2009, Kyoto. **Proceedings...** Kyoto: CIPA, 2009. Disponível em: <cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/KYOTO/104.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2010.

APÊNDICE A - DETALHAMENTO DA ETAPA DE PROCESSAMENTO DO DSM

O processamento inicia-se com o carregamento das fotografias no PhotoModeler Scanner ou *upload* das mesmas no 123D Catch, para processamento remoto via *web*. Há grandes diferenças na forma com que os dados são especificados e processados nesses programas.

O PhotoModeler Scanner permite a especificação de diversos parâmetros, como o tipo de processo para a orientação das fotografias (se interativo ou automatizado), o espaçamento entre os pontos na "nuvem de pontos", os pares de fotos que serão usados para a associação densa de *pixels* homólogos (*Dense Matching*), diferentemente da maioria dos programas para DSM (incluindo o 123D Catch), que possuem apenas ferramentas automatizadas de processamento, com poucos parâmetros especificados pelos usuários.

Essas características permitem maior controle dos produtos que são gerados no PhotoModeler Scanner. No entanto, requer que a câmera seja calibrada, exige mais conhecimento do operador para especificação dos parâmetros apropriados para cada tipo de levantamento, além de ser necessário mais tempo de processamento.

A seguir, são detalhadas as etapas de processamento no PhotoModeler Scanner e comparadas com as do 123D Catch.

a) Orientação interna

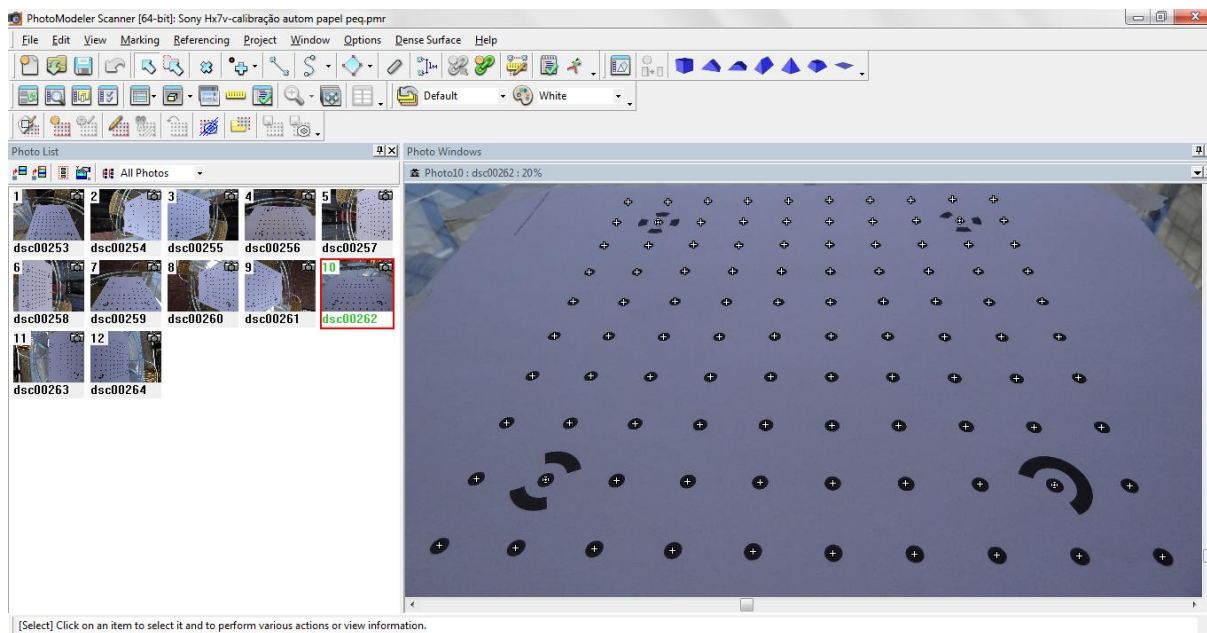
Para determinação dos parâmetros da câmera (orientação interna) no PhotoModeler Scanner, é necessária a calibração da mesma, a partir da tomada fotográfica de um tipo de malha¹⁹⁰ (Figura 246) de 8 a 12 diferentes posições. As fotos são inseridas no programa a partir da escolha da opção "Camera Calibration Project". Todo o processo é realizado automaticamente, mas é importante verificar em "Show Report", se existe algum problema de calibração, ou se os valores de erro estão acima dos estipulados pelo programa¹⁹¹. Além disso, é importante observar todas as fotos para corrigir interativamente eventuais pontos que não foram marcados sobre a malha, ou pontos inexistentes que foram marcados pelo programa.

¹⁹⁰ O PhotoModeler Scanner disponibiliza três tipos de malha: *Multi-sheet Calibration*, a serem usados em levantamento de edificações e o *Large Sheet* e *Single Sheet*, para objetos de tamanhos médios ou pequenos respectivamente.

¹⁹¹ O PhotoModeler recomenda que o "Overall RMS" seja inferior a 0,5 *pixel* e o "Maximum residual" inferior a 1,5 *pixel*.

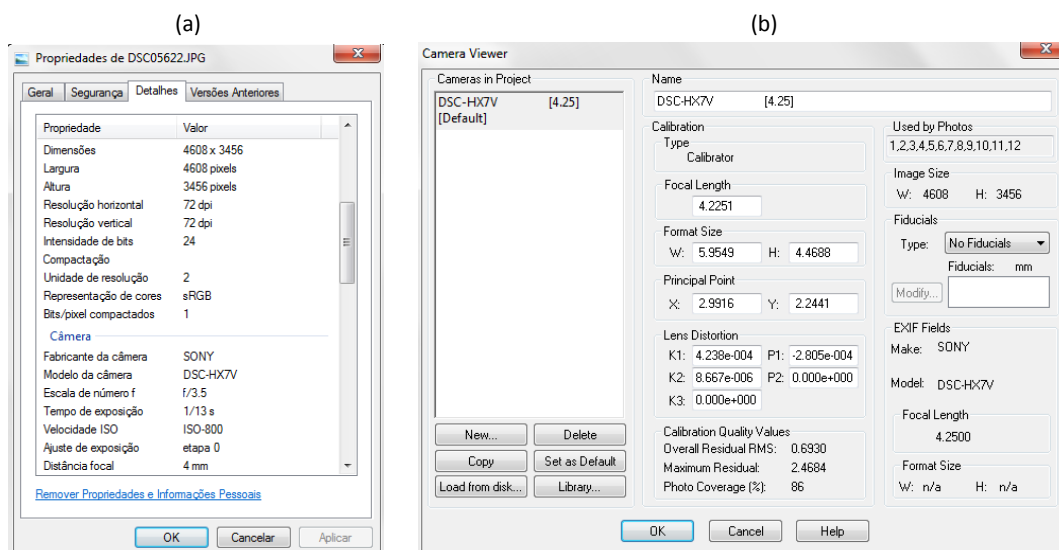
No 123D Catch, são utilizados valores aproximados de alguns parâmetros através do arquivo EXIF, não sendo necessário (nem possível) realizar a calibração da câmera. A Figura 247 ilustra os parâmetros da mesma câmera Sony DSC-HX7V, de 12 *Megapixels* (resolução máxima de 4.608 x 3.456 *pixels*), através do EXIF e dos parâmetros calibrados no PhotoModeler.

Figura 246 - Calibração da câmera no PhotoModeler



Fonte: elaboração da autora.

Figura 247 - Parâmetros internos da câmera: (a) simplificados, através do EXIF; (b) completos, através do processo de calibração no PhotoModeler



Fonte: elaboração da autora.

b) Orientação externa

Após a determinação da orientação interna no PhotoModeler, pode-se iniciar o processo de restituição, para obtenção das "nuvens de pontos". Deve-se escolher o tipo de projeto, se interativo (*Standard Project*) ou automatizado (*Automated Project*).

No tipo *Standard Project* devem ser marcados e associados interativamente alguns pontos homólogos nas várias fotografias. Esses pontos devem ser bem identificados nas fotos e estar espalhados sobre toda a imagem, para permitir melhor precisão na orientação externa relativa. Após o processamento, é possível recuperar o posicionamento das estações e criar um modelo preliminar, baseado nos pontos traçados.

Em se tratando de objetos mais complexos e irregulares (sem quinas/vértices ou com número reduzido dos mesmos), é importante a identificação precisa de pontos comuns nas várias fotografias, o que pode ser facilitado com auxílio de alvos aplicados em algumas partes do objeto ou sobre uma base. Nesses casos, os alvos auxiliam, inclusive, na determinação da escala real do modelo, a partir da associação da medida levantada em campo com as marcações visualizadas nas fotos.

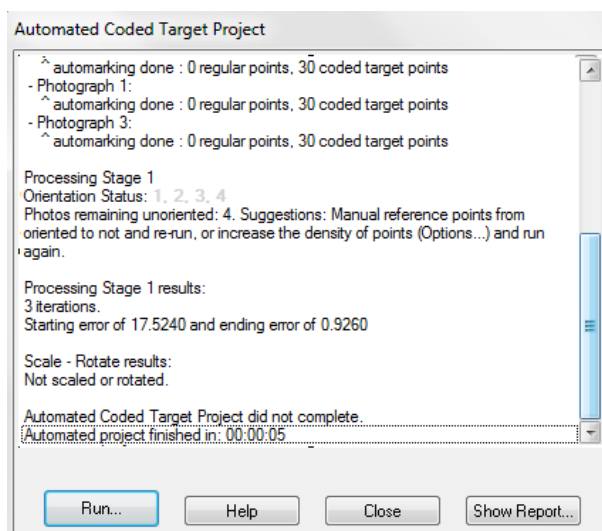
No tipo *Automated Project*, deve-se escolher o tipo de processo desejado (para realização da orientação relativa), se baseado na detecção e associação automática de alvos codificados (*Coded Target Auto-project*) ou de feições naturais (*SmartPoints Project*).

Em qualquer tipo de processo escolhido (interativo ou automatizado) no PhotoModeler é importante a inserção das fotografias aos poucos (por exemplo, de quatro em quatro). Quando isso não acontece, é muito comum a ocorrência de erros de processamento¹⁹².

No processo baseado em alvos codificados, a etapa de identificação dos alvos e associação dos mesmos nas várias fotos, é realizada automaticamente logo após a inserção das fotos (com o botão *Run*), gerando um relatório, que lista, dentre outras coisas, a quantidade de alvos identificados em cada foto, o *status* do processo e o tempo de processamento (Figura 248).

¹⁹² Esses erros de processamento estão relacionados ao *software* (PhotoModeler Scanner), e não ao equipamento utilizado.

Figura 248 - Relatório de processamento automatizado dos alvos



Fonte: elaboração da autora.

Depois dessa etapa inicial, deve-se processar os dados para que seja efetivada a orientação externa das fotografias e criado o modelo preliminar, nesse caso, as coordenadas tridimensionais dos alvos dispostos na base, conforme Figura 109.

Devem ser adicionadas novas fotografias, de modo a permitir maior cobertura do objeto. A medida em que as fotos são inseridas, deve-se realizar novamente a etapa de orientação e associação automática dos alvos, através dos comandos *Automatic Target Marking* e *Automatic Referencing*, respectivamente. Processadas e orientadas as fotos, deve-se conferir se todos (ou a maioria) dos pontos foram marcados e associados corretamente, e se os posicionamentos das estações estão coerentes com a situação real. Se não, toda a correção deve ser feita de modo interativo.

Podem ser geradas algumas "nuvens de pontos" apenas para verificação inicial, no entanto, elas deverão ser refeitas, uma vez que a etapa de determinação da escala e rotação do modelo, bem como a inserção de novas fotos, devem anteceder a etapa de produção das "nuvens de pontos" finais¹⁹³, de modo a não haver desalinhamento entre as "nuvens de pontos" produzidas posteriormente.

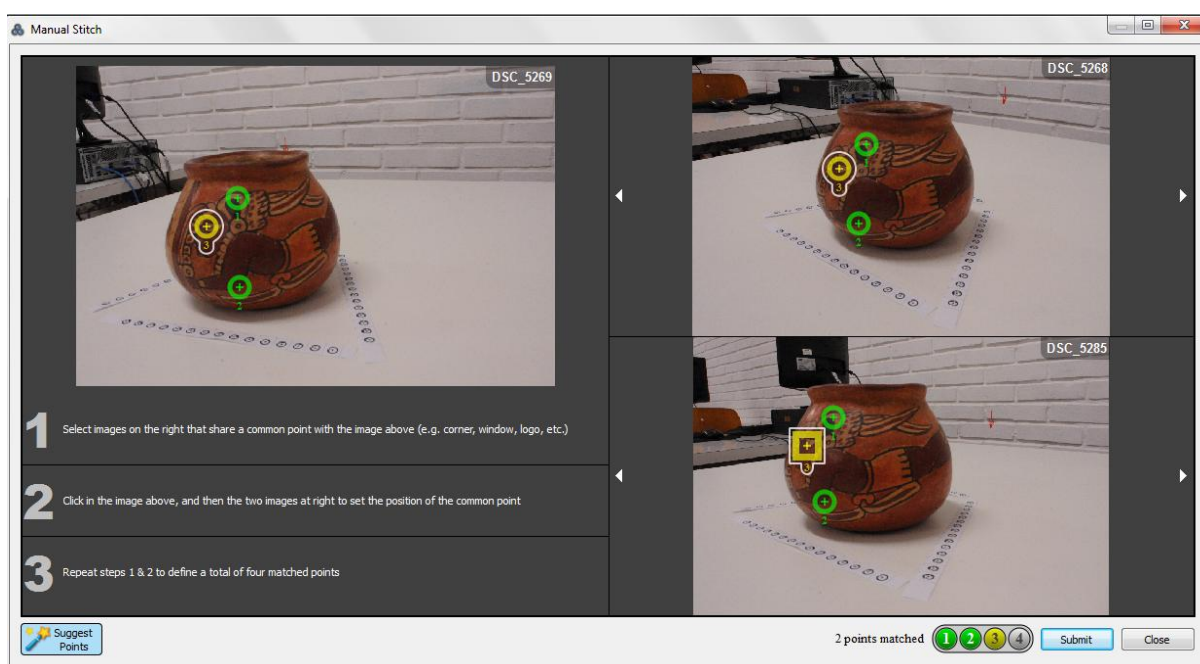
No 123D Catch, deve-se fazer o *upload* das fotos, e toda a etapa de processamento (orientação externa, geração da malha triangular e texturização) é realizada

¹⁹³ Para a representação completa de um objeto no PhotoModeler, geralmente são necessários várias "nuvens de pontos", sendo cada uma relacionada ao par de fotos escolhido para a geração da "nuvem de pontos" densa.

automaticamente via *web* através dos servidores da Autodesk (Figura 110). Depois de alguns minutos (nesse caso, 8 minutos), o modelo pode ser visualizado no computador do usuário.

As poucas possibilidades de intervenção do operador no 123D Catch estão associadas à definição da resolução da malha TIN do modelo, distribuídas em três níveis (*mobile*, *standard* e *maximum*, com valores crescentes de resolução), e a associação interativa de pontos homólogos nas fotografias, quando existirem erros e/ou quando for solicitado pelo operador (Figura 249).

Figura 249 - Associação interativa de pontos homólogos no 123D Catch



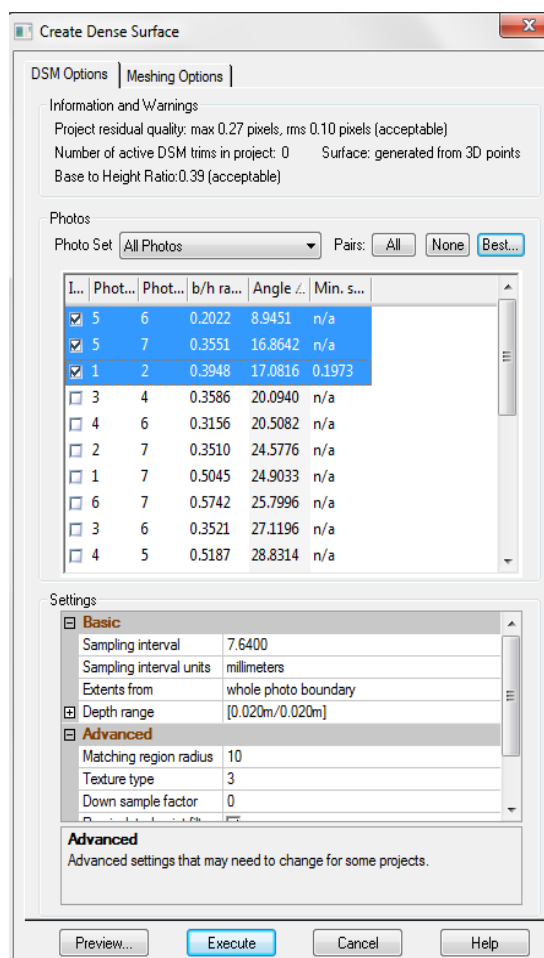
Fonte: elaboração da autora.

c) Geração da "nuvem de pontos" densa

Definida a escala e a rotação do modelo do PhotoModeler Scanner, nesse caso baseado na distância e disposição dos alvos, inicia-se a geração das "nuvens de pontos" com o comando *Creat Dense Surface*. Abre-se uma janela com uma série de parâmetros a serem configurados. Nesse experimento, foi gerada uma primeira "nuvem de pontos", a partir da seleção de pares de fotografias que apresentavam menores valores da relação R (b/h) e menores ângulos entre as estações, para obtenção de "nuvens de pontos" com maior precisão, sendo adotados os parâmetros pré-configurados pelo programa (Figura 250).

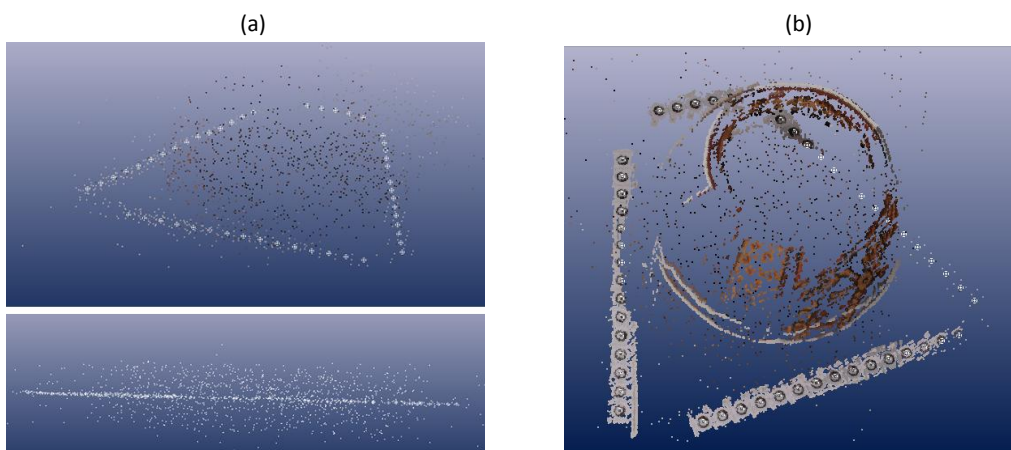
A primeira "nuvem de pontos" gerada (Figura 251a) não foi adequada, tendo baixa resolução - *Sampling interval* de 7,64 mm - e pequena abrangência da "nuvem de pontos" - *Depth range*, limitando-se a gerar pontos localizados a 2 cm abaixo e acima do plano de referência (nesse caso a base, onde estavam os alvos). Foram alterados os parâmetros da superfície de referência, para 0 cm abaixo e 20 cm acima da mesma, e da densidade da "nuvem de pontos", de 7 para 1 mm, produzindo melhor resultado (Figura 251b), mas, ainda assim, insuficiente.

Figura 250 - Janela para a geração de "nuvens de pontos" do PhotoModeler Scanner



Fonte: capturado da interface do PhotoModeler Scanner.

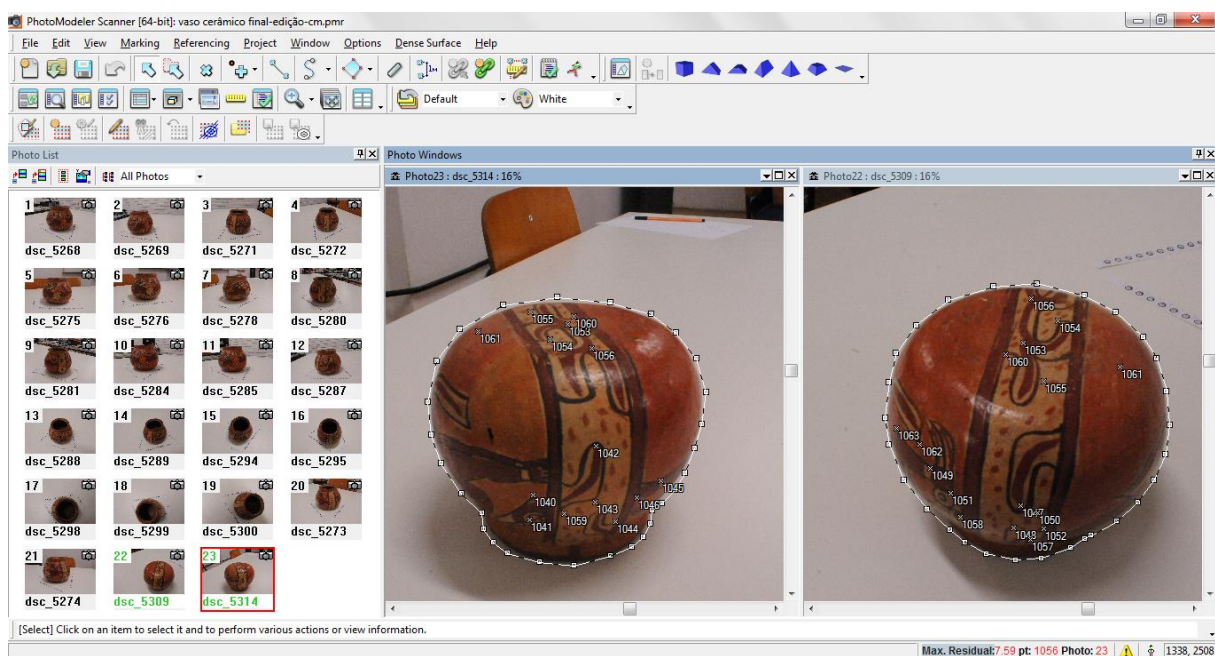
Figura 251 - "Nuvem de pontos": (a) com valores pré-configurados; (b) com valores alterados



Fonte: elaboração da autora.

Foram adicionadas novas fotografias de modo a permitir a cobertura completa do vaso cerâmico, inclusive duas fotos tomadas da parte inferior do mesmo (Figura 252), chegando-se a um total de 23 fotos. Como foi necessário movimentar o vaso para a tomada fotográfica de sua base, perdeu-se a referência dos alvos, sendo necessário identificar interativamente pontos na textura do mesmo e associá-los nas outras fotografias, de modo a permitir a orientação das novas fotos.

Figura 252 - Inclusão de duas fotos da base do vaso cerâmico



Fonte: elaboração da autora.

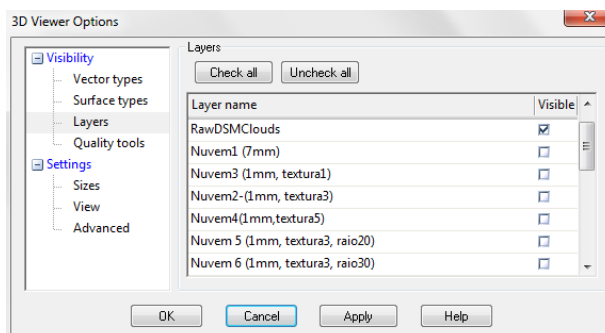
Depois de vários testes, foram identificados os parâmetros/configurações mais adequados para a produção de "nuvens de pontos" mais densas e completas. Dentre os que tiveram

maior influência, para além da densidade da malha (*Sampling interval*), da abrangência da "nuvem de pontos" (*Depth range*) e da inclusão de novas fotos, destacam-se:

- A extensão da foto (*Extents from*) deve ser, preferencialmente, a partir de uma área delimitada pelo *trim* (e não considerando toda a imagem), produzindo "nuvem de pontos" mais densa, com menos ruído, sendo específica ao trecho de interesse. Entretanto, a delimitação do *trim* (ver contornos do vaso nas fotos 22 e 23 da Figura 252) demanda um tempo considerável do operador, que deve traçar o contorno de interesse em todos os pares a serem processados para criação das "nuvens de pontos".
- A área de busca (*Matching region radius*) com valores maiores tendem a gerar "nuvens de pontos" mais densas e com menos ruído, principalmente quando as texturas apresentam um padrão com maiores dimensões. A desvantagem de valores elevados é o aumento no tempo de processamento, uma vez que os conjuntos de *pixels* a serem comparados são maiores. Nesse experimento foi utilizado o valor de raio 30, perfazendo uma área de busca de 59 x 59 *pixels*.
- Valores mais baixos do tipo de textura (*Texture type*) também permitem gerar uma quantidade maior de pontos na "nuvem de pontos", com menos vazios, principalmente em texturas não repetitivas e de maiores dimensões. Nesse caso, adotou-se o menor valor, o tipo 1 de textura.

Para facilitar a comparação de resultados em função de diferentes parâmetros é interessante a criação e utilização de *layers* (Figura 253), para melhor controle da visualização das "nuvens de pontos" geradas e sua associação às principais configurações utilizadas, como densidade, valores do tipo de textura e raio da área de busca.

Figura 253 - Utilização de layers para separação e comparação dos diferentes produtos gerados



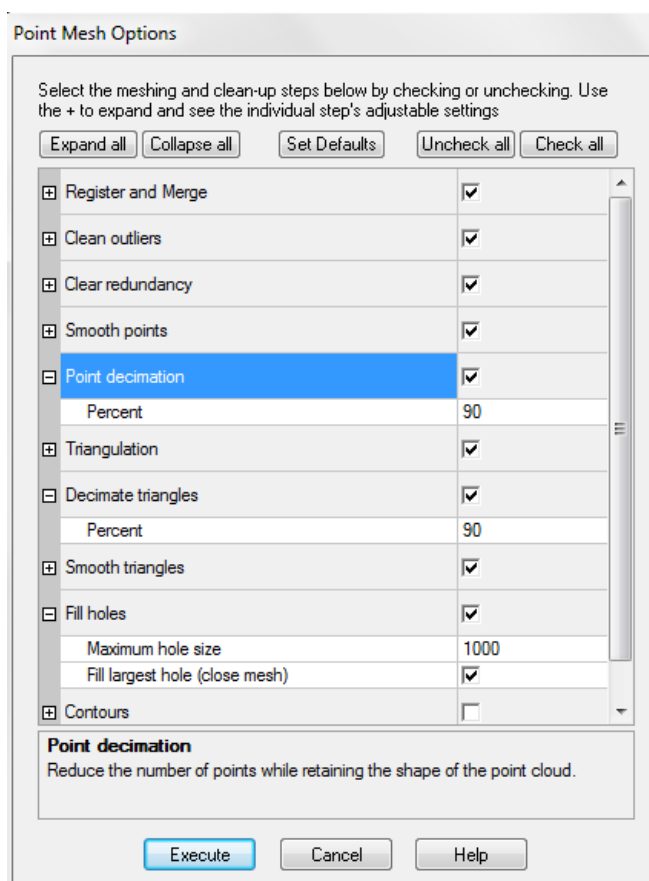
Fonte: elaboração da autora.

Foi gerado um modelo formado por nove "nuvens de pontos" a partir da associação de nove pares de fotografias.

d) Geração da malha triangular e operações de otimização da mesma

Depois da criação das diversas "nuvens de pontos" pela escolha dos pares de fotografias já orientadas no PhotoModeler, partiu-se para a etapa de criação da malha triangular. Gerou-se inicialmente um modelo formado por 931.676 triângulos (baseada em 474.817 pontos), sendo bastante lenta a sua manipulação. Decidiu-se realizar a decimação da malha (*decimate triangles*) em 90%, para gerar um arquivo bem mais leve. Além disso, foram realizadas outras operações para otimização da "nuvem de pontos" e da malha TIN, como limpeza, suavização da malha, preenchimento de vazios, como pode ser visto na Figura 254.

Figura 254 - Operações para otimização da "nuvem de pontos" e da malha TIN

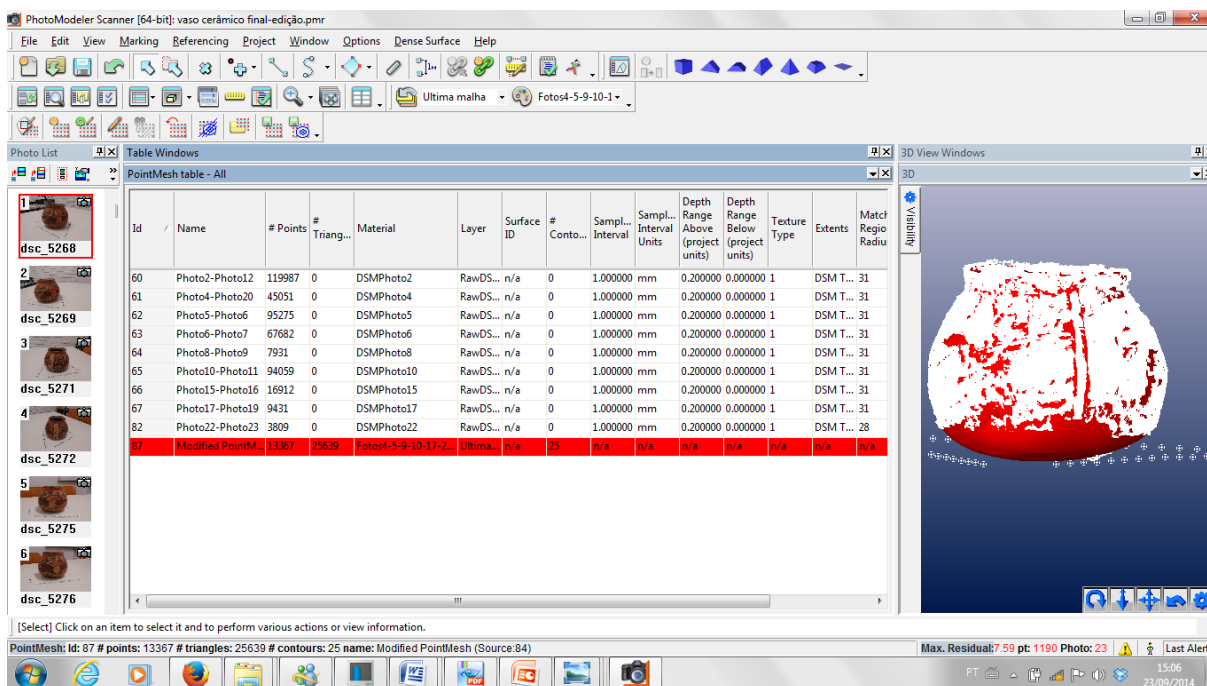


Fonte: elaboração da autora.

Obteve-se uma malha com 25.639 triângulos, conforme ilustrado na *PointMesh table* (Figura 255). O uso dessa tabela é interessante, pois permite selecionar e verificar os parâmetros básicos determinados nas diferentes "nuvens de pontos" (inclusive a especificação dos pares

de fotos e a quantidade de pontos) e/ou os modelos em malhas triangulares gerados. Pode-se observar que a quantidade total (somada) de pontos gerada nos diferentes modelos de "nuvens de pontos" é 460.137 pontos, bastante superior ao da malha triangular modificada, que permite uma visualização mais completa (e contínua, com o preenchimento de vazios) e fotorrealística do objeto.

Figura 255 - Tabela contendo os modelos de "nuvens de pontos" e malhas triangulares (*PointMesh table*)



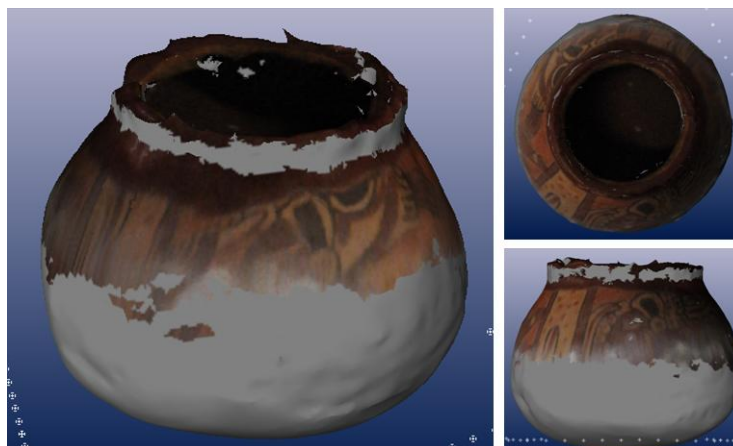
The screenshot shows the PhotoModeler Scanner interface. On the left, there is a 'Photo List' with thumbnails of photos. The main area is a 'Table Windows' titled 'PointMesh table - All'. It contains a table with columns: Id, Name, # Points, # Triang..., Material, Layer, Surface ID, # Conto..., Sampl... Interval, Sampl... Interval Units, Depth Range Above (project units), Depth Range Below (project units), Texture Type, Extents, and Match Regio Radiu. The last row is highlighted in red and contains the following data: 87, Modified PointM..., 13367, 25639, Fotos4-5-9-10-17-2..., Ultima..., n/a, 25, n/a, n/a, n/a, n/a, n/a, n/a, n/a. To the right of the table is a '3D View Windows' showing a 3D model of a vase with a red and white point cloud texture. At the bottom, a status bar displays: 'PointMesh: Id: 87 # points: 13367 # triangles: 25639 # contours: 25 name: Modified PointMesh (Source:84) Max. Residual: 7.59 pt: 1190 Photo: 23'.

Id	Name	# Points	# Triang...	Material	Layer	Surface ID	# Conto...	Sampl... Interval	Sampl... Interval Units	Depth Range Above (project units)	Depth Range Below (project units)	Texture Type	Extents	Match Regio Radiu
60	Photo2-Photo12	119987	0	DSMPhoto2	RawDS...	n/a	0	1.000000	mm	0.200000	0.000000	1	DSM T...	31
61	Photo4-Photo20	45051	0	DSMPhoto4	RawDS...	n/a	0	1.000000	mm	0.200000	0.000000	1	DSM T...	31
62	Photo5-Photo6	95275	0	DSMPhoto5	RawDS...	n/a	0	1.000000	mm	0.200000	0.000000	1	DSM T...	31
63	Photo6-Photo7	67682	0	DSMPhoto6	RawDS...	n/a	0	1.000000	mm	0.200000	0.000000	1	DSM T...	31
64	Photo8-Photo9	7931	0	DSMPhoto8	RawDS...	n/a	0	1.000000	mm	0.200000	0.000000	1	DSM T...	31
65	Photo10-Photo11	94059	0	DSMPhoto10	RawDS...	n/a	0	1.000000	mm	0.200000	0.000000	1	DSM T...	31
66	Photo15-Photo16	16912	0	DSMPhoto15	RawDS...	n/a	0	1.000000	mm	0.200000	0.000000	1	DSM T...	31
67	Photo17-Photo19	9431	0	DSMPhoto17	RawDS...	n/a	0	1.000000	mm	0.200000	0.000000	1	DSM T...	31
82	Photo22-Photo23	3809	0	DSMPhoto22	RawDS...	n/a	0	1.000000	mm	0.200000	0.000000	1	DSM T...	28
87	Modified PointM...	13367	25639	Fotos4-5-9-10-17-2...	Ultima...	n/a	25	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

Fonte: elaboração da autora.

Quando o modelo foi visualizado com a aplicação de textura (Figura 256), verificou-se que este apresentava problemas. Isso ocorre toda vez que a superfície é contínua, pois, a opção padrão do PhotoModeler é utilizar a textura de uma única foto por superfície.

Figura 256 - Modelo do vaso em malha triangular, com problemas na textura



Fonte: elaboração da autora.

Para resolver esse problema é necessário criar um "material"¹⁹⁴ associado a um conjunto de fotos mais apropriadas para textura. Em *Edit Photo Sets*, foram escolhidas as fotos de melhor qualidade e as mais características, de modo cobrir todos os trechos do objeto. Foi possível a criação de um modelo texturizado contemplando todos os trechos do vaso, conforme ilustrado na Figura 111.

A obtenção da malha TIN é um processo totalmente automatizado no 123D Catch, bastando o operador realizar o *download* do arquivo. Depois, é possível realizar algumas operações, como: (1) seleção de trecho para maior refinamento (maior densidade da malha); (2) limpeza da malha, apagando pontos desnecessários e, (3) determinação da escala do modelo.

¹⁹⁴ A aplicação das texturas sobre as superfícies geradas é feita pelo PhotoModeler através da associação de materiais. Por padrão, o programa aplica as texturas obtidas através da correção das fotografias referentes a cada superfície. É possível criar novos materiais, como cores sólidas, e aplicar às superfícies selecionadas.

APÊNDICE B - CONJUNTO DE OPERAÇÕES PARA PROCESSAMENTO NO GEOMAGIC STUDIO

As operações possíveis de serem realizadas no Geomagic Studio estão ilustradas nas telas capturadas do programa. Cada conjunto de operações é sensível ao tipo de modelo existente em determinada fase.

A Figura 257 ilustra as operações disponíveis para o modelo do tipo "nuvem de pontos" como: redução de ruído, filtragem, preenchimento de vazios (ou furos) e triangulação (*Wrap*).

Figura 257 - Operações possíveis com o modelo do tipo "nuvem de pontos"



Fonte: interface do Geomagic Studio 2012.

Na Figura 258 estão representadas as operações possíveis para o modelo do tipo "malha poligonal" como: decimação (reduzir), suavização (relaxar), preenchimento de vazios e conversão da malha em "nuvem de pontos".

Figura 258 - Operações possíveis com o modelo do tipo "malha poligonal"



Fonte: interface do Geomagic Studio 2012.

Os comandos disponíveis para criação de modelo do tipo "NURBS" estão presentes na aba "Superfícies exatas" (Figura 259) como: criação automatizada desse tipo de modelo (AutoSuperfície), detecção de contornos, criação de *patches* (construir correções), geração da malha, finalização da operação com a criação do modelo NURBS (Ajustar superfícies) ou conversão para malha poligonal.

Figura 259 - Operações para geração do modelo do tipo "NURBS"



Fonte: interface do Geomagic Studio 2012.

As operações disponíveis para geração de superfícies paramétricas estão ilustradas na Figura 260. Dentre as principais operações, pode-se citar: detectar regiões, editar contornos, classificar regiões, exportar o modelo para programas CAD (troca paramétrica) ou convertê-lo novamente em malha poligonal.

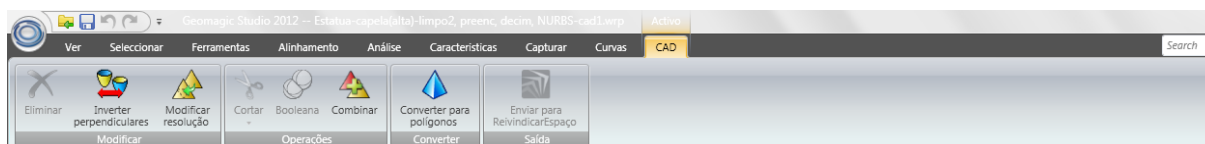
Figura 260 - Operações para geração de superfícies paramétricas



Fonte: interface do Geomagic Studio 2012.

E, finalmente, os comandos para manipulação de modelos do tipo "CAD", como: modificar a resolução, operações booleanas ou conversão para malha poligonal (Figura 261).

Figura 261 - Operação para manipulação de modelos do tipo "CAD"



Fonte: imagens capturadas da interface do Geomagic Studio 2012.