

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE MAPAS DE DANOS
DE FACHADAS A PARTIR DE FOTOGRAFIAS OBTIDAS
POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO E
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

CARLOS MARIANO MELO JÚNIOR

ORIENTADOR: ANTÔNIO ALBERTO NEPOMUCENO

COORIENTADOR: LENILDO SANTOS DA SILVA

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.TD – 4A/16

BRASÍLIA/DF: 25 DE AGOSTO DE 2016

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M4A/16 m	Melo Júnior, Carlos Mariano Metodologia para geração de mapas de danos de fachadas a partir de fotografias obtidas por veículo aéreo não tripulado e processamento digital de imagens / Carlos Mariano Melo Júnior; orientador Antônio Alberto Nepomuceno; co-orientador Lenildo Santos da Silva. -- Brasília, 2016. 376 p. Tese (Doutorado - Doutorado em Estruturas e Construção Civil) -- Universidade de Brasília, 2016. 1. Mapa de danos de fachadas. 2. Fotogrametria digital. 3. Dense stereo matching. 4. Processamento digital de imagens. 5. Manifestações patológicas. I. Nepomuceno, Antônio Alberto, orient. II. Silva, Lenildo Santos da, co-orient. III. Título.
-------------	---

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MELO JÚNIOR, C. M. (2016). Metodologia para geração de mapas de danos de fachadas a partir de fotografias obtidas por veículo aéreo não tripulado e processamento digital de imagens. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 376 p.

CESSÃO DE DIREITOS

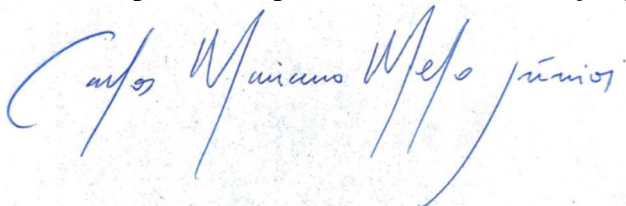
AUTOR: Carlos Mariano Melo Júnior.

TÍTULO: Metodologia para geração de mapas de danos de fachadas a partir de fotografias obtidas por veículo aéreo não tripulado e processamento digital de imagens.

GRAU: Doutor

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Carlos Mariano Melo Júnior

Rua Alferes José Pedro de Brito, 100, Ed. Marilda, ap. 901, Bairro Farolândia, CEP: 49032-010. Aracaju - SE - Brasil.

A Deus.

Aos meus pais, meu irmão e minhas sobrinhas.

Aos meus avós (em memória).

Aos meus tios e tias, primos e primas.

A toda minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Antônio Alberto Nepomuceno, por, primeiramente, estender-me a mão no momento em que precisei e me aceitar como aluno, confiando nos meus esforços e minha capacidade para levar à frente este trabalho. Pela sua orientação, pelos seus conselhos, pelos seus ensinamentos e sugestões ao longo destes anos de trabalho.

Ao professor e coorientador Lenildo Santos da Silva, o meu agradecimento por seus conhecimentos compartilhados, orientação, incentivo, sugestões valiosas e participação efetiva e indispensável neste trabalho.

Ao amigo e professor Francisco Evangelista Junior pelo apoio, pela amizade, pelos valiosos ensinamentos e orientação imensurável na realização deste trabalho.

Ao piloto Rodolpho Gondim, pelo esforço, competência e destreza na operação do VANT para os trabalhos em campo.

Ao professor Evangelos Christakou, pelas orientações e pelas importantes contribuições para a pesquisa.

Ao amigo e professor Cláudio Pereira, que sempre nos trouxe uma palavra de coragem e nos agradeceu com seus conhecimentos nas diversas áreas do conhecimento.

À professora Helena Carasek, que jamais poderia deixar de agradecer, pois sempre me incentivou e acreditou na minha capacidade, fazendo com que eu traçasse o caminho acadêmico. Será sempre referência para mim. Obrigado pelos ensinamentos. Meu muito obrigado por tudo.

Ao professor Arivaldo Amorim e à professora Natalie Groetelaars, que proporcionaram conhecimentos na área da fotogrametria digital, principalmente através do curso ministrado em 2013, no Programa de Documentação do Patrimônio Arquitetônico do Estado da Bahia.

Aos meus pais (Carlos e Luíza) que sempre se dedicaram e realizaram esforços para que eu pudesse me dedicar aos estudos. À minha tia Lígia, que sempre me deu apoio, assim como aos demais tios, especialmente Luiz Mário (em memória). Aos meus avós que sempre tiveram palavras de carinho e incentivo (em memória), às minhas sobrinhas (Isabelli e Giovanna) que sempre me deram carinho e alegria, e aos meus primos pelo apoio. Enfim, à toda minha família, pelo carinho, dedicação, confiança, estímulo e apoio permanente.

Aos demais professores do PECC, pelos conhecimentos transmitidos e esforços em buscar sempre o melhor para o programa.

Aos amigos, em ordem alfabética, Gelson Alves, João Uchoa, Marcus Vinícius, Maria Cláudia e Marília Marcy, pelo carinho, companheirismo, cumplicidade, amizade, dedicação, pois, sem vocês, a caminhada e realização desta pesquisa seriam árduas.

Aos amigos Newton Fonseca e Sidney Moreira, pelas colaborações prestadas e amizade.

Aos amigos Thiago Faria, Leiliane Santana e Fabiola Lima, pelo apoio e incentivo nos diversos momentos.

Aos amigos Silvano, Vitor, Alejandro, Lorena, Jéssica, Fabiano, Agno, Eduardo e todos os outros alunos do PECC, pelo companheirismo.

Aos amigos e colegas de trabalho do Instituto Federal de Sergipe.

Aos secretários do PECC, Eva Veloso e Ricardo, pela atenção, respeito e carinho.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro indispensável para a realização desta pesquisa.

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

*“A menos que modifiquemos a nossa
maneira de pensar, não seremos capazes
de resolver os problemas causados pela
forma como nos acostumamos a ver o
mundo.”*

Albert Einstein

“A vida é um sopro.”

Oscar Niemeyer

RESUMO

Autor: Carlos Mariano Melo Júnior

Orientador: Antônio Alberto Nepomuceno

Coorientador: Lenildo Santos da Silva

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 2016

Metodologia para geração de mapas de danos de fachadas a partir de fotografias obtidas por veículo aéreo não tripulado e processamento digital de imagens

O estudo sistêmico das manifestações patológicas em fachadas baseado em mapas de danos e, conseqüentemente, na suposição das causas e compreensão dos mecanismos favorece a elaboração de instrumentos preditivos ou corretivos. As técnicas de inspeção em edificações podem se basear, prioritariamente, em métodos experimentais e empíricos. A inspeção visual é um método empírico e também o primeiro passo para a avaliação contínua, para que decisões sejam tomadas quanto à necessidade de procedimentos de intervenções em edificações na fase de uso. A visão estereoscópica é uma das técnicas que compõe a ciência do processamento digital de imagens (PDI) e seus princípios são utilizados na fotogrametria digital, em particular na obtenção de modelos de superfícies (produtos fotogramétricos) por nuvem de pontos ou DSM (*Dense Stereo Matching*). Em outro segmento do PDI encontra-se a obtenção automática de padrões, que se baseia em várias etapas, como a segmentação e classificação. Este trabalho visou o desenvolvimento de metodologia para a aplicação de técnicas e métodos baseados em PDI para geração de mapas de danos de fachadas de edifícios por imagens (fotografias) capturadas por VANTs. Algumas imagens foram usadas para a obtenção de modelos de superfícies e, posteriormente, de ortoimagens, ou seja, projeções ortográficas das fachadas. As edificações usadas nos experimentos foram escolhidas em função do valor histórico e da presença de manifestações patológicas, modeladas pela técnica de DSM a fim de avaliar os procedimentos, os programas e os resultados. Alguns programas de fotogrametria digital foram usados, dando destaque ao PhotoScan para a obtenção das ortoimagens e, a partir do planejamento e cálculos da sobreposição e do número de fotos, foram obtidos resultados satisfatórios. Com a finalidade de gerar automaticamente mapas de danos em, principalmente, ortoimagens, dois programas foram utilizados: Tyche (2015) e Detecta Fissura (2016). O Tyche (2015), baseado em análise estatística visando a segmentação, foi utilizado para gerar mapas de danos de manchas escuras, eflorescência, destacamento de revestimento cerâmico e alteração cromática. O Detecta Fissura (2016) baseou-se em dois operadores principais: Sobel e Canny, objetivando exclusivamente a detecção de fissuras. Além dos bons resultados, constatou-se que a interação de profissionais na geração dos mapas de danos por PDI ainda se faz importante para se chegar nos resultados esperados. Os métodos empregados demonstraram também potencialidades para o monitoramento da evolução de danos em fachadas.

Palavras-chave: Mapa de danos de fachadas. Fotogrametria digital. *Dense stereo matching*. Processamento digital de imagens. Manifestações patológicas.

ABSTRACT

Author: Carlos Mariano Melo Júnior

First Advisor: Antônio Alberto Nepomuceno

Second Advisor: Lenildo Silva do Santos

**Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
Brasília, 2016**

Methodology for generating of maps of damages in façades from photos obtained from unmanned aerial vehicle and digital image processing

The systemic study of damages in facades through maps of damage and, consequently, on the assumption of causes and understanding of the mechanisms contributes the development of predictive or corrective instruments. The inspection techniques on buildings can be based, priority, on experimental and empirical methods. Visual inspection is an empirical method and also the first step for continuous evaluation, for decisions are taken on the need for intervention procedures in buildings in the period of use. Stereoscopic vision is one of the techniques of digital image processing (DIP) and its principles are used for digital photogrammetry, in particular in obtaining surface models (photogrammetric products) by cloud points or DSM (Dense Stereo Matching). In another DIP segment, is the automatic patterns recognition, which is based on several stages, as the segmentation and classification. This work aimed at the development of methodology for the application of techniques and methods based on DIP to generate maps of damages of building façades from images (photographs) taken from UAVs. Some images were used to obtain surface models and, after, orthoimages or orthographic projections of façades. Some of the buildings used in the experiments were also chosen due to the historical value and the presence of pathological manifestations, modeled by DSM technique to assess the procedures, programs and results. Some digital photogrammetry programs were used, highlighting the PhotoScan to obtain the orthoimages and from planning and calculations of the overlap and the number of photos, satisfactory results were obtained. In order to automatically generate maps of damages on, mainly, orthoimages, two programs were used: Tyche (2015) and Detecta Fissura (2016). The Tyche (2015), based on statistical analysis aimed the segmentation, was used to generate maps of damages of staining, efflorescence, detachment of ceramic tiling and color change. The Detecta Fissura (2016) was based on two main operators: Sobel and Canny, aiming the detection of cracks. Beyond the good results, it was found that the interaction of professional in generating of maps of damages from DIP also becomes important to get the expected results. The methods also demonstrated potential for monitoring the evolution of damages in façades.

Keywords: Map of damages of façades. Digital photogrammetry. Dense stereo matching. Digital image processing. Damages.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capela de Nossa Senhora da Escada: (a) fotografia frontal; (b) modelo geométrico; (c) ortoimagem.	5
Figura 2 - (a) Modelos de nuvem de pontos da Casa Rosa no Revit Architecture. (b) Detalhe da malha triangular gerada no 123D Catch da Casa Rosa.	6
Figura 3 - (a) Plataforma para inspeções de fissuras em pontes. (b) Inspeção auxiliada por VANT no viaduto <i>Saint Cloud</i>	7
Figura 4 - (a) Captura de imagens para uma edificação ao nível do solo. (b) Captura de para uma edificação alta em vários níveis.....	8
Figura 5 - (a) Museu Nacional Honestino Guimarães. (b) Fissuras observadas na fachada do Museu Nacional Honestino Guimarães.....	9
Figura 6 - Registro gráfico da fachada. Imagem obtida no ARCGIS®.....	9
Figura 7 - Parte da metodologia da pesquisa representada esquematicamente.	15
Figura 8 - Exemplo de desenho esquemático com indicações escritas complementares.	28
Figura 9 - Registro fotográfico de anomalias em fachadas. Para determinadas ocorrências de fissuras (menores aberturas) e em distâncias específicas, a técnica mostrou-se pouco eficiente.	28
Figura 10 - Registro desenhado das anomalias em fachadas, correspondente à Figura 2. Registros de fissuras em função da localização, extensão, configuração, padrão e abertura.....	29
Figura 11 - Formação de sujidades em elementos ornamentais de fachada.....	37
Figura 12 - Crescimento de microrganismos. (a) Líquens. (b) Algas. (c) Musgos.	39
Figura 13 - Manchas de fantômes na região da alvenaria de vedação.	40
Figura 14 - Formação de eflorescência.....	41
Figura 15 - Manchas de eflorescência ocasionadas pela precipitação de sais.....	42
Figura 16 - Alteração cromática sobre superfície de pintura.....	43
Figura 17 - Regiões da fachada com destacamento de revestimento cerâmico.....	43
Figura 18 - Estudo de Caso 27.....	48
Figura 19 - Modelo de mapa de danos.	49
Figura 20 - Mapa de identificação de danos.....	50

Figura 21 - Ficha de identificação de danos elaborada por Rodolpho Henrique Correa, 2011. Arquivo Gcor-Arquitetura UNICAMP.	51
Figura 22 – (a) Esquema de mapeamento de danos. (b) Sobreposição de malha nos mapeamentos das fachadas analisadas com detalhe de uma unidade de área de dano.	52
Figura 23 - Mapa dos danos em imagem panorâmica da etapa 1 da fachada Leste.	53
Figura 24 - Relação entre tamanho do objeto e precisão por diferentes métodos de medição.	56
Figura 25 - Fases do desenvolvimento da fotogrametria, como.	58
Figura 26 – (a) Sistema fotogramétrico analógico. (b) Sistema fotogramétrico digital.	62
Figura 27 – (a) Os três grupos de grandeza. (b) Espaço-objeto (tridimensional) e a relação com o espaço-imagem.	64
Figura 28 - Correspondência de pontos.	66
Figura 29 - Modelo de câmera <i>pinhole</i>	69
Figura 30 – Antiga Biblioteca Pública situada na Praça Municipal, Salvador - BA. (a) Fotografia original; (b) Foto retificada.	71
Figura 31 - Fotografia vertical.	74
Figura 32 - Fotografia oblíqua alta.	75
Figura 33 - Fotografia oblíqua baixa.	75
Figura 34 - Voo fotogramétrico.	77
Figura 35 – Ilustração do voo de VANT e da sobreposição longitudinal.	77
Figura 36 - Nuvem de pontos da Igreja de São Francisco, Salvador – BA.	89
Figura 37 – Edificação de quatro pavimentos. (a) Fachada de um edifício obtida por nuvem de pontos sem atributo de cor. (b) nuvem de pontos com atributos da cor natural da edificação pelo programa PhotoModeler Scanner	91
Figura 38 - Cena mostrando os parâmetros envolvendo a visão estereoscópica.	94
Figura 39 – Identificação de pontos correspondentes em imagens obtidas de pontos distintos.	95
Figura 40 - Modelo com a identificação dos pontos correspondentes.	96
Figura 41 - (a) <i>Multi-sheet calibration</i> . (b) <i>Single-sheet calibration</i>	97
Figura 42 - Nuvem de pontos de baixa densidade com ruídos de um edifício.	99
Figura 43 - (a) Modelo com ruídos. (b) Modelo com a aplicação do filtro estatístico. (c) Modelo com a aplicação do filtro estatístico e de vizinhança.	99

Figura 44 – Imagem da fachada de um edifício processada em um programa de fotogrametria digital: (a) Superfície com fraca textura. (b) Poucos <i>matches</i> sobre o modelo geométrico.	101
Figura 45 – Modelo do edifício Welfenschloss: (a) Ortoimagem de parte do edifício Welfenschloss obtida por fotografia terrestre. (b) Ortoimagem de parte do edifício Welfenschloss obtida por fotografia aérea.	102
Figura 46 – Corpo de prova modelado no programa PhotoScan: (a) Modelo de reconstrução por nuvem de pontos densa. (b) Aproximação da visualização do modelo e a visão dos vazios.	103
Figura 47 - Modelo de malhas triangulares gerado em um corpo de prova.	105
Figura 48 – Exemplos de tomada fotográfica. (a) Monorrestituição. (b) Estereorrestituição.	107
Figura 49 – Experimento realizado em imagem de uma edificação: (a) Foto original. (b) Ortoimagem retificada em escala.	108
Figura 50 - Levantamento fotográfico indicado para a restituição a partir de várias fotos (vista superior).	110
Figura 51 - Posicionamento das câmeras e erros de precisão.	110
Figura 52 - Posicionamento das câmeras para tomadas fotográficas de formas simples (vista superior).	111
Figura 53 - Posicionamento das câmeras para tomadas fotográficas de fachadas planas (vista superior).	111
Figura 54 - Posicionamento das câmeras para edificações com reentrâncias (vista superior).	112
Figura 55 - Posicionamento das câmeras com estações altas e baixas.	112
Figura 56 – Posicionamento das tomadas fotográficas: (a) Posicionamento correto para aquisição de fotografias de fachadas. (b) Posicionamento incorreto para aquisição de fotografias de fachadas, sem sobreposição.	113
Figura 57 – Posicionamento das tomadas fotográficas: (a) Posicionamento correto para aquisição de fotografias em torno de um edifício. (b) Posicionamento incorreto para aquisição de fotografias em torno de um edifício.	113
Figura 58 – Modelos de uma edificação – Casa Rosa. (a) Processamento interativo. (b) Processamento automático (nuvem de pontos).	114

Figura 59 - Desenhos de levantamento <i>in situ</i> que associados à imagens fotogramétricas possibilitam, entre outros produtos, a desenhos em CAD das elevações em escala, de edifícios de grandes dimensões. Abaixo, imagem de alta definição, sem deformações, obtida por meio de retificação fotográfica a partir de procedimentos relacionados à fotogrametria terrestre.	116
Figura 60 – Produto final: mapa de danos das ruínas do monumento da Casa da Torre Garcia D’Ávila – Praia do Forte.	116
Figura 61 - Imagem digital e intensidade de alguns tipos de píxeis.....	120
Figura 62 – Histograma de imagem monocromática.	122
Figura 63 – Modelo HSV. (a) Representação gráfica do modelo. (b) Variação dos parâmetros no modelo HSV.	124
Figura 64 – Imagem inicial. (a) Resultado obtido com $\sigma = 1$. (b) Resultado obtido com $\sigma = 3$	129
Figura 65 - Segmentação de uma amostra de <i>peller feed</i> (a) Imagem de <i>pelled feed</i> adquirida ao microscópio ótico (500x). (b) Imagem binária da fase hematita.	130
Figura 66 – (a) derivada em relação a x . (b) derivada em relação a y	131
Figura 67 - Classificação de partículas de hematitas pela sua forma.	132
Figura 68 – (a) Imagem original e o histograma. (b) Imagem com manipulação de contraste e o histograma.	133
Figura 69 – Dilatação de uma imagem binária.	135
Figura 70 - Segmentação da ortoimagem da Biblioteca Central da UnB.	137
Figura 71 - (a) Mapa de danos da fachada da Biblioteca Central da UnB para as manchas maiores que 12 cm^2 . (b) Mapa de danos da fachada da Biblioteca Central da UnB para as manchas maiores que $0,6 \text{ cm}^2$	138
Figura 72 - (a) Imagens com fissuras. (b) Fissura detectada por operador Sobel.	139
Figura 73 – Palácio Amra.	139
Figura 74 – (a) Ortoimagem do Palácio Amra. (b) Mapa de borda binário das fissuras extraído pelo operador Canny. (c) Mapa de borda binário da região de interesse.	140
Figura 75 – Posicionamento das câmeras em relação ao edifício. (a) Planta esquemática sem escala da posição da câmera em relação ao plano da fachada. (b) Posicionamento da câmera em relação ao vértice do edifício.	147
Figura 76 - Relações entre triângulos para cálculo do tamanho do objeto na imagem.	148

Figura 77 – Gráfico da relação entre a distância focal (mm) e valor de <i>R</i> . Distância de 5 m e sobreposição de 80%, 70%, 60%, 50% e 40%.....	150
Figura 78 - Determinação dos pontos de voo vertical para o VANT.....	151
Figura 79 - VANTs multirrotores (quadricópteros). (a) Multirrotor com carga embarcada de 500 g. (b) Multirrotor com carga embarcada de 600 g.....	152
Figura 80 – Photosynth: seleção de imagens.....	155
Figura 81 – Photosynth: biblioteca de modelos pessoais.....	155
Figura 82 – 123D Catch: seleção de imagens.....	156
Figura 83 – Opções de escolha da malha.	157
Figura 84 – (a) Malha TIN do corpo de prova e (b) modelo de superfície com textura gerado no 123D Catch.....	157
Figura 85 – Interface de trabalho do VisualSfM.....	158
Figura 86 – Interface de trabalho do MeshLab.	159
Figura 87 – Erro detectado no vértice do modelo.	159
Figura 88 – Interface de trabalho do PhotoScan.	160
Figura 89 – Etapa de alinhamento das fotos.....	161
Figura 90 – Caixa delimitadora da área de interesse para o processamento da nuvem densa.	161
Figura 91 – (a) Modelo em malha poligonal com 26.860 faces e 15.226 vértices - <i>low</i> . (b) Modelo em malha poligonal com 80.580 faces e 42.781 vértices - <i>medium</i> . (c) Modelo em malha poligonal com 241.742 faces e 123.950 vértices - <i>high</i>	162
Figura 92 – Especificação de marcas para orientação externa absoluta no PhotoScan.....	163
Figura 93 – Exportação de ortoimagens.....	164
Figura 94 – Corpo de prova.....	166
Figura 95 – Modelo de nuvem de pontos gerado no	167
Figura 96 – Imagem do corpo de prova após a orientação.....	167
Figura 97 – (a) Malha TIN do corpo de prova. (b) Modelo de superfície com textura gerado no 123D Catch.....	168
Figura 98 – Corpo de prova pelo VisualSfM. (a) Modelo de nuvem de pontos esparsa e (b) Modelo de nuvem de pontos densa.	169
Figura 99 – Corpo de prova pelo MeshLab. (a) Modelo de superfície e (b) modelo de superfície com textura.	169

Figura 100 – Modelo 2_CP pelo programa PhotoScan. (a) Nuvem de pontos esparsa. (b) Nuvem de pontos densa. (c) Padrão <i>shaded</i> da malha TIN. (d) Posição das câmeras no momento da fotografia.	171
Figura 101 – Sequência de três imagens utilizadas na construção dos modelos do Edifício A.	177
Figura 102 – Edifício A pelo 123D Catch. (a) Modelo de nuvem de pontos esparsa e (b) Modelo de nuvem de pontos densa.	177
Figura 103 – Modelo geométrico pelo VisualSfM do Edifício A. (a) Modelo de nuvem de pontos esparsa e (b) Modelo de nuvem de pontos densa.	178
Figura 104 – Fases do processo de criação do modelo fotogramétrico no MeshLab. Modelo de malhas poligonais em (a) e (b). Modelo com aplicação da textura em (c) e (d).	179
Figura 105 – Refinamento da malha poligonal da Edificação A. (a) Janela com a opção <i>Octree Depth</i> . (b) Modelo com <i>Octree Depth: 8</i> . (c) Modelo com <i>Octree Depth: 10</i> (d) Modelo com <i>Octree Depth: 12</i>	180
Figura 106 – Posicionamento das câmeras.	181
Figura 107 – Modelo 1-EdA pelo programa PhotoScan. (a) Nuvem de pontos densa. (b) Nuvem de pontos densa após exclusão de parte dos ruídos. (c) Padrão <i>shaded</i> da malha TIN.	183
Figura 108 – Modelo 1-EdA pelo programa PhotoScan em (a) e (b).	184
Figura 109 – Modelo do Edifício A gerado no PhotoScan.	188
Figura 110 – (a) Fotografia da Edificação A. (b) Ortoimagem do Edifício A gerado no PhotoScan.	189
Figura 111 – Sequência de três imagens de fotografia terrestre utilizadas na construção dos modelos do Edifício B.	190
Figura 112 – Nuvem de pontos do modelo 2-EdB.	191
Figura 113 – Modelos do Edifício B pelo PhotoScan. Últimos pavimentos do modelo 1- EdB e modelo 3-EdB, respectivamente, em (a) e (b). Primeiros pavimentos do modelo 1-EdB e modelo 3-EdB, respectivamente, em (c) e (d).	194
Figura 114 – Edifício B modelado no 123D Catch. (a) Fachada da Edificação B. (b) Detalhe dos pavimentos superiores. (c) Detalhes dos pavimentos inferiores.	195

Figura 115 – Sequência de três imagens capturadas por VANT utilizadas na construção dos modelos do Edifício B.....	195
Figura 116 – Nuvens de pontos do Edifício B modeladas no PhotoScan. (a) Modelo 4-EdB. (b) Modelo 1-EdB.	197
Figura 117 – Nuvens de pontos e ruídos do Edifício B modeladas no PhotoScan. (a) Modelo 1-EdB. (b) Modelo 4-EdB.....	197
Figura 118 – Modelos do Edifício B pelo PhotoScan. Últimos pavimentos do modelo 4-EdB e modelo 5-EdB, respectivamente, em (a) e (b). Primeiros pavimentos dos modelo 4-EdB e modelo 5-EdB, respectivamente, em (c) e (d).	199
Figura 119 – Ortoimagem do modelo 5-EdB. (a) Ampliação de parte da ortoreimagem com resolução de 3.310 x 4.096. (b) Ampliação de parte da ortoreimagem com resolução de 13.242 x 16.384.....	201
Figura 120 – Prédio da Biblioteca Central da UnB.....	201
Figura 121 – Imagens da Biblioteca Central da UnB capturadas com VANT.....	202
Figura 122 – Biblioteca Central pelo programa 123D Catch.....	202
Figura 123 – Biblioteca Central pelo programa VisualSfM. (a) Nuvem de pontos esparsa. (b) Nuvem de pontos densa.....	203
Figura 124 – (a) Nuvem de pontos densa importada do VisualSfM e visualizada no MeshLab. (b) Malha poligonal gerada no MeshLab. (c) Pontos obtidos no processo de construção da malha. (d) Modelo com exclusão de parte dos pontos.....	204
Figura 125 – Malha poligonal gerada no MeshLab em (a) e (b). (c) Modelo de superfície com aplicação de textura. (d) Modelo de superfície com baixa qualidade e regiões de oclusão.....	204
Figura 126 – Modelo 1-BC pelo programa PhotoScan, 67 fotografias. (a) Nuvem de pontos esparsa. (b) Nuvem de pontos densa. (c) Malha TIN. (d) Modelo de superfície com textura.....	206
Figura 127 – Modelo 2-BC pelo programa PhotoScan, 193 fotografias. (a) Nuvem de pontos esparsa. (b) Nuvem de pontos densa. (c) Malha TIN. (d) Modelo de superfície com textura.....	207
Figura 128 – Ampliação de parte da fachada da Biblioteca Central.	208
Figura 129 – Biblioteca Central pelo programa PhotoScan. (a) Ortoimagem gerada. (b) Ortoimagem após edição no Adobe Photoshop CC.....	208

Figura 130 – Fissura presente na fachada da Biblioteca Central.....	209
Figura 131 – Biblioteca Central pelo programa MeshLab. (a) Nuvem de pontos importada para o MeshLab. (b) Eliminação de ruídos da nuvem de pontos.	210
Figura 132 – Malha TIN da Biblioteca Central. (a) Modelo gerado sobre os ruídos da nuvem de pontos. (b) Modelo da malha gerado sem ruídos. (c) Modelo de superfície <i>shaded</i>	211
Figura 133 – Prédio da ANTAQ, fachada norte.....	212
Figura 134 – Linha de voo 4 do prédio da ANTAQ, fachada norte.....	213
Figura 135 – Nuvem de pontos densa do prédio do ANTAQ, fachada norte.....	215
Figura 136 – Malha TIN do prédio do ANTAQ da fachada norte.	216
Figura 137 – Modelos de superfície do prédio do ANTAQ da fachada norte.....	217
Figura 138 – Modelos de superfície com textura do prédio do ANTAQ da fachada norte. (a) Modelo 1-ANT-N. (b) Modelo 2-ANT-N. (c) Modelo 3-ANT-N.	218
Figura 139 – Modelo 3-ANT-N (a) Posicionamento das câmeras no momento do registro fotográfico. (b) Modelo de nuvem de pontos esparsa. (c) Modelo de nuvem de pontos densa. (d) Modelo de superfície com textura.	219
Figura 140 – Ortoimagem do modelo 3-ANT-N.....	220
Figura 141 – Modelo 4-ANT-N. (a) Posicionamento das câmeras no momento do registro fotográfico. (b) Modelo de nuvem de pontos. (c) Modelo de superfície. (d) Modelo com textura.	221
Figura 142 – Modelo 5-ANT-N. (a) Nuvem de pontos esparsa. (b) Malha TIN. (c) Ampliação da malha TIN. (d) Modelo com textura.....	223
Figura 143 – Ortoimagem do modelo 5-ANT-N.....	223
Figura 144 – Modelos de superfície com textura do prédio do ANTAQ da fachada norte. (a) Modelo 3-ANT-N. (b) Modelo 5-ANT-N.....	224
Figura 145 – Modelo 6-ANT-S: fachada sul prédio da ANTAQ. (a) Ortoimagem. (b) Ampliação da ortóimagem.	224
Figura 146 – Modelo 6-ANT-S pelo PhotoScan: (a) ortóimagem gerada. (b) ortóimagem após edição no Adobe Photoshop CC.....	225
Figura 147 – Alvos aplicados na fachada do ANTAQ.....	226
Figura 148 – Valor obtido no modelo na fachada do ANTAQ.	227

Figura 149 – Forma de captura das imagens no Museu Nacional Honestino Guimarães e suas dimensões.	228
Figura 150 – (a) Museu Nacional Honestino Guimarães. (b) imagem do VANT sobrevoando a cúpula.	228
Figura 151 – Imagens do Museu Nacional Honestino Guimarães capturadas com VANT.	229
Figura 152 – Fotografia da fachada do museu com a formação de sombra.	230
Figura 153 – Modelo geométrico de novem de pontos criado pelo Photosynth. (a) Vista em perspectiva. (b) Vista superior. (c) Visualização tridimensional do museu.	231
Figura 154 – Parte da cúpula modelada no programa 123D Catch.	232
Figura 155 – Modelo 1-MN. (a) Nuvem de pontos esparsa. (b) Nuvem de pontos densa. (c) Modelo geométrico. (d) Vista superior.	233
Figura 156 – Modelo 1-MN do Museu Nacional Honestino Guimarães. (a) Malha TIN. (b) Ampliação de parte da malha TIN. (c) Modelo de superfície <i>shaded</i>	234
Figura 157 – Modelo 2-MN e o modelo 3-MN no PhotoScan. (a) Modelo 2-MN, com a opção de máxima intensidade. (b) Modelo 3-MN, com a opção de mínima intensidade.	234
Figura 158 - (a) Modelo 4-MN, com a opção <i>spherical</i> . (b) Modelo 5-MN, com a opção <i>orthophoto</i>	235
Figura 159 – Parte da cúpula com maior luminosidade.	236
Figura 160 – Parte da cúpula com maior luminosidade.	237
Figura 161 – Aparelho digital DJCK-2 <i>Crack Width Meter</i>	238
Figura 162 – (a) Fachada do Museu Nacional Honestino Guimarães. (b) Medição da fissura com o aparelho DJCK-2 <i>Crack Width Meter</i>	238
Figura 163 – (a) Fachada do Museu Nacional Honestino Guimarães. (b) Medição da fissura com DJCK-2 <i>Crack Width Meter</i>	239
Figura 164 – Fotografias da linha do Anexo do Senado Federal, primeira linha de voo.	241
Figura 165 – Modelo 1-CN-S-O, modelado no PhotoScan. Nuvem de pontos esparsa em (a) e (b). Nuvem de pontos densa em (c) e (d). Malha triangular em (e) e (f).	243
Figura 166 – Orientação externa do modelo 1-CN-S-O, no PhotoScan. (a) Parte superior do prédio. (b) Etapa de especificação das marcas orientação externa absoluta.	243

Figura 167 – Etapas da construção do modelo 2-CN-S-E no PhotoScan. (a) Nuvem de pontos esparsa e posição da câmera. (b) Nuvem de pontos densa. (c) Malha triangular. (d) Modelo de superfície com aplicação de textura.	244
Figura 168 – Modelo 2-CN-S-E no PhotoScan. (a) Fraturas do mármore nos pavimentos superiores. (b) Fraturas do mármore nos pavimentos inferiores.	245
Figura 169 – Modelo 3-CN-CD-O. (a) Modo <i>generic</i> . (b) Modo <i>adaptive orthophoto</i>	246
Figura 170 – Modelo 1-CN-S-O gerado no PhotoScan. (a) Exportado com resolução máxima de 4096 píxeis. (b) Exportado com resolução máxima de 8192 píxeis.	247
Figura 171 – Modelagem do Anexo I do Congresso Nacional, Senado, fachada oeste, pelo PhotoScan. (a) Exportado com resolução máxima de 4096 píxeis. (b) Exportado com resolução máxima de 8192 píxeis.	247
Figura 172 – Torre de TV Digital.	248
Figura 173 – Imagens capturadas pelo VANT da Torre de TV Digital.	249
Figura 174 – Modelo 1-TD no PhotoScan, <i>accuracy: high</i> . (a) Nuvem de pontos esparsa. (b) Modelo com aplicação da textura. (c) Malha TIN.	250
Figura 175 – Modelo 2-TD no PhotoScan, <i>accuracy: low</i> . (a) Nuvem de pontos esparsa. (b) Modelo com aplicação da textura. (c) Malha TIN.	251
Figura 176 – Modelagem da Torre de TV Digital pelo PhotoScan. (a) <i>High precision</i> . (b) <i>Low Precision</i>	252
Figura 177 – Modelo 2-TD. Modo <i>accuracy: low</i>	253
Figura 178 – Modelo 1 da Torre de TV Digital. Cúpula do espaço de exposição.	253
Figura 179 – Modelo 1 da Torre de TV Digital. Cúpula do espaço de exposição.	254
Figura 180 - (a) Fotografia de uma fachada em concreto aparente com formação de manchas escuras e a caixa de seleção. (b) Ampliação da seleção da amostra realizada no Tyche (2015).	262
Figura 181 – Densidade normal univariada com média μ e variância σ^2	263
Figura 182 – Densidade normal bivariada (duas variáveis).	264
Figura 183 – Imagem segmentada de uma fachada com formação de manchas.	265
Figura 184 – Imagem segmentada.	266
Figura 185 – Ambiente do programa de detecção de fissuras.	267
Figura 186– Elemento de vedação de fachada com	270

Figura 187 – Distribuições de frequência de píxeis para mancha escura: (a) espaço R; (b) espaço G; (c) espaço B; (d) espaço escalas de cinza.....	271
Figura 188 – Distribuições de frequência de píxeis para mancha escura: (a) espaço H; (b) espaço S; (c) espaço V.	271
Figura 189 – Segmentação das imagens com distintas resoluções da fachada com manchas escuras: (a) resolução: 2584 x 2768. (b) resolução: 1292 x 1384. (c) resolução: 826 x 923. (d) resolução: 646 x 692. (e) resolução: 517 x 554.....	275
Figura 190 – Fachada com revestimento cerâmico e manchas de eflorescência, e seleção da amostra.	276
Figura 191 – Distribuições de frequência de píxeis para eflorescência: (a) espaço R; (b) espaço G; (c) espaço B; (d) espaço escalas de cinza.....	276
Figura 192 - Distribuições de frequência de píxeis para eflorescência: (a) espaço R; (b) espaço G; (c) espaço B; (d) espaço escalas de cinza.....	277
Figura 193 – Classificação de eflorescência para o espaço RGB e $k = 1$	278
Figura 194 – Região da seleção da amostra.	279
Figura 195 – Distribuições de frequência de píxeis para o segundo experimento de mancha de eflorescência: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V.....	280
Figura 196 – Região da seleção da amostra.	284
Figura 197 – Distribuições de frequência de píxeis para destacamento de revestimento cerâmico: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V.	285
Figura 198 – Classificação de destacamento de revestimento	288
Figura 199 – Fachada com revestimento em textura e alteração cromática, e seleção da amostra.	289
Figura 200 – Distribuições de frequência de píxeis para alteração cromática: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V.	290
Figura 201 – Classificação da alteração cromática para áreas maiores que 1.000 píxeis. (a) Segmentação. (b) Classificação.	292
Figura 202 - (a) Imagem original. (b) Fissuras detectadas com operador Sobel e sem dilatação. (c) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 5x5. (d) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 7x7.	293

Figura 203 - (a) Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 20% e $\sigma = 1$. (b) Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 30% e $\sigma = 3$.	294
Figura 204 - Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 20%, limiar mínimo de 15% e $\sigma = 0,5$.	295
Figura 205 - (a) Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 1$. (b) Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 5$.	296
Figura 206 - Fissuras detectadas com operador Canny, dilatação 5x5, limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 20%, $\sigma = 1$.	297
Figura 207 - Fissuras detectadas com operador Canny, sem dilatação, limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 20% $\sigma = 1$ e remoção dos ruídos.	297
Figura 208 - (a) Imagem original. (b) Fissuras detectadas com operador Sobel e sem dilatação. (c) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 5x5. (d) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 7x7.	298
Figura 209 - Fissuras detectadas com operador Sobel, sem dilatação e remoção dos ruídos.	299
Figura 210 - Fissuras detectadas com operador Canny sem dilatação. (a) Limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 0,5$. (b) Limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 20% e $\sigma = 1$. (c) Limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 1$. (d) Limiar máximo de 90%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 3$.	300
Figura 211 - Fissuras não detectadas.	301
Figura 212 - Fissuras detectadas com operador Canny, Limiar máximo de 90%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 3$, dilatação 5x5.	301
Figura 213 - Fissuras detectadas com operador Canny, dilatação 5x5 e remoção de ruídos.	302
Figura 214 - (a) Imagem original. (b) Fissuras detectadas com operador Sobel e sem dilatação. (c) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 5x5. (d) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 7x7.	303
Figura 215- Fissuras detectadas com operador Canny sem dilatação. (a) Limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 20% e $\sigma = 1$. (b) Limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 0,5$. (c) Limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 1$. (d) Limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 3$.	304

Figura 216 - Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10%, $\sigma = 1$ e dilatação 5×5 .	305
Figura 217 - Fissuras detectadas com operador Canny, sem dilatação, Limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 1$ e remoção de ruídos.	305
Figura 218 – Distribuições de frequência de píxeis para manchas escuras da Biblioteca Central: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza.	310
Figura 219 - Distribuições de frequência de píxeis para manchas escuras da Biblioteca Central: (a) H; (b) S; (c) V.	310
Figura 220 – Biblioteca Central: mapa de danos criado por usuário em programa CAD.	313
Figura 221 – Fachada da ANTAQ. (a) Imagem sem a manipulação de contraste e seleção da amostra, e (b) imagem com manipulação de contraste.	314
Figura 222 – Mapa de danos do prédio da ANTAQ. (a) Mapa de danos do espaço RGB, área mínima de 100.000 píxeis e área máxima de 200.000 píxeis, $k = 5$ e com manipulação de brilho e contraste. (b) Mapa de danos criado por usuário em programa CAD.	322
Figura 223 – Ortoimagem e seleção da amostra no edifício B.	323
Figura 224 - Distribuições de frequência de píxeis das manchas escuras do edifício B: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V.	324
Figura 225 – Segmentação (a) e classificação (b) das manchas escuras em ortoreimagem do edifício B.	325
Figura 226 – Sacadas do edifício B e seleção da amostra.	325
Figura 227 - Distribuições de frequência de píxeis para manchas da sacada do edifício residencial: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V.	326
Figura 228 – Fachada oeste do Anexo I do Congresso Nacional e seleção da amostra.	329
Figura 229 - Distribuições de frequência de píxeis das manchas escuras do Anexo I do Congresso Nacional: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V.	330
Figura 230 - Distribuições de frequência de píxeis das manchas escuras do Anexo I do Congresso Nacional, com manipulação de contraste e brilho: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V.	334

Figura 231 – Resultados da classificação do Congresso Nacional, Anexo I, com valor de $k = 5$. (a) Imagem sem manipulação de brilho e contraste. (b) Imagem com manipulação de brilho e contraste.	337
Figura 232 – (a) Resultados da classificação do Congresso Nacional, Anexo I, com valor de $k = 4$ em imagem com manipulação de brilho e contraste. (b) Classificação realizada por usuário em programa CAD em imagem sem manipulação de brilho e contraste.	337
Figura 233 - (a) Imagem original. (b) Fissuras detectadas com operador Sobel e sem dilatação. (c) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 5×5 . (d) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 7×7	339
Figura 234 – Fissuras detectadas com operador Canny sem dilatação. (a) Limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 0,5$. (b) Limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 30% e $\sigma = 1$. (c) Limiar máximo de 20%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 1$. (d) Limiar máximo de 20%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 3$	340
Figura 235 – Fissuras detectadas com operador Canny. (a) Dilatação 5×5 , limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 0,5$. (b) Dilatação 7×7 , limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 0,5$. (c) Dilatação 5×5 , limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 5$. (d) Dilatação 5×5 , limiar máximo de 20%, limiar mínimo de 15% e $\sigma = 5$	341
Figura 236 – Fissuras detectadas com operador Canny. (a) Dilatação 5×5 , limiar máximo de 10%, limiar mínimo de 5% e $\sigma = 5$. (b) Sem dilatação, limiar máximo de 10%, limiar mínimo de 5% e $\sigma = 5$	342
Figura 237 – Museu Nacional: mapa de fissuras realizado em programa CAD por usuário.	343
Figura 238 – Biblioteca Central. (a) Fissuras detectadas com operador Sobel e sem dilatação. (b) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 5×5	344
Figura 239 - Fissuras detectadas com operador Sobel, dilatação 5×5 e remoção de ruídos... ..	345
Figura 240 – Biblioteca Central. (a) Fissuras detectadas com operador Canny, sem dilatação, limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 25% e $\sigma = 1$. (b) Fissuras detectadas com operador Canny, dilatação 5×5 , limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 25% e $\sigma = 1$	346
Figura 241 – Imagem da Biblioteca Central. (a) Operador Sobel. (b) Operador Canny.	346

Figura 242 – Fissuras detectadas com operador Canny, dilatação 5x5, limiar máximo de 30% e limiar mínimo de 25% e remoção de ruídos.....	347
Figura 243 – Biblioteca Central: mapa de fissuras realizado em programa CAD por usuário.	347

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de fissuras e causas da fissuração.....	33
Quadro 2 - Níveis de severidade da fissuração (função da abertura).....	35
Quadro 3 - Ilustração de vários tipos de destacamento ou perda de coesão de rebocos de edifícios.....	45
Quadro 4 - Histórico da fotogrametria.	60
Quadro 5 - Critérios, classificações e descrições da fotogrametria.....	72
Quadro 6 - Classificação por peso próprio dos VANTs.....	80
Quadro 7 - Classificação de VANTs pela UVS <i>International</i>	80
Quadro 8 - Classificação das superfícies.....	100
Quadro 9 - Classificação para ferramentas de nuvem de pontos.....	106
Quadro 10 – Câmeras fotográficas e especificações técnicas.	143
Quadro 11 - Valores de TP em função das distâncias.	146
Quadro 12 - Valores de L em função de B para câmera Sony RX 100, em função de α (75°) e sobreposição de 80% ou $R = 0,3$	149
Quadro 13 – Tipos de aplicação de textura do PhotoScan.	163
Quadro 14 – Parâmetros utilizados no PhotoScan para o corpo de prova.....	170
Quadro 15 – Opções de quantidades de faces para geração da malha TIN no PhotoScan para o corpo de prova.	171
Quadro 16 – Malha triangular irregular (TIN) dos modelos 1, 2 e 3 do corpo de prova gerado no programa PhotoScan.....	172
Quadro 17 – Ruídos dos modelos 1, 2 e 3 do corpo de prova gerado no programa PhotoScan.	173
Quadro 18 – Partes ampliadas do corpo de prova dos modelos 1, 2 e 3 geradas no programa PhotoScan.	174
Quadro 19 – Ruídos dos modelos 1, 2 e 3 do corpo de prova gerado no programa PhotoScan.	175
Quadro 20 – Valores de <i>octree depth</i> , faces e vértices.....	180
Quadro 21 – Modelo 1-EdA: parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 1 do Edifício A.	181

Quadro 22 – Parâmetros utilizados no PhotoScan para os modelos 2, 3 e 4 do Edifício A...	185
Quadro 23 – Malha triangular irregular (TIN) do Edifício A gerados no programa PhotoScan.	186
Quadro 24 – Modelos geométricos com textura do Edifício A gerados no programa PhotoScan.	187
Quadro 25– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 1-EdB, modelo 2-EdB e modelo 3-EdB, a partir das 14 fotos.	190
Quadro 26 – Malha triangular irregular (TIN) do modelo 1-EdB, modelo 2-EdB e modelo 3- EdB gerados no programa PhotoScan.	192
Quadro 27 – Ortoimagens do modelo 1-EdB, modelo 2-EdB e modelo 3-EdB gerados no programa PhotoScan.	193
Quadro 28– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 4-EdB, modelo 5-EdB e modelo 6-EdB, a partir das 209 fotos.	196
Quadro 29 – Malha TIN e ortimagens do modelo 4-EdB, modelo 5-EdB e modelo 6-EdB gerados no programa PhotoScan.	198
Quadro 30 – Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 1-BC, a partir das 67 fotos.	205
Quadro 31– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 2-BC, a partir das 193 fotos.	206
Quadro 32 – Número da linha de voo e quantidade de fotos por linha.	212
Quadro 33– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 1-ANT-N, modelo 2-ANT-N e modelo 3-ANT-N, a partir das 272 fotos.	214
Quadro 34– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 4-ANT-N, a partir das 272 fotos.	220
Quadro 35– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 5-ANT-N, a partir das 272 fotos.	222
Quadro 36 – Modelo 1-MN: parâmetros utilizados no PhotoScan.	232
Quadro 37 – Número da linha de voo e quantidade de fotos	241
Quadro 38 – Modelo 1-CN-S-O: parâmetros utilizados no PhotoScan.....	242
Quadro 39 – Modelo 1-TD: parâmetros utilizados no PhotoScan.....	249
Quadro 40 – Modelo 2-TD: parâmetros utilizados no PhotoScan.....	251

Quadro 41 – Fachada com manchas escuras: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação.	273
Quadro 42 - Classificação de manchas em escuras em fachada de concreto aparente.....	274
Quadro 43 – Fachada com manchas de eflorescência: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação.	277
Quadro 44 - Classificação de eflorescência em fachada para valores de $k = 1$, $k = 3$ e $k = 5$, espaço de cores RGB.	278
Quadro 45 - Classificação do segundo experimento com manchas de eflorescência no espaço RGB. Valores de $k = 1$, $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$	281
Quadro 46 - Classificação do segundo experimento com manchas de eflorescência no espaço escalas de cinza. Valores de $k = 2$ e $k = 3$	282
Quadro 47 - Classificação do segundo experimento com manchas de eflorescência nos espaços H, S e V. Valores de $k = 1$ e $k = 5$	283
Quadro 48 - Fachada com destacamento de revestimento cerâmico: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação.....	286
Quadro 49 – Classificação de destacamento de revestimento cerâmico para valores de $k = 1$, $k = 3$ e $k = 5$	287
Quadro 50 – Alteração cromática: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação.	291
Quadro 51 – Quadro-resumo das manifestações patológicas detectadas em imagens no programa Tyche (2015).	307
Quadro 52 – Quadro-resumo das fissuras detectadas em imagens no programa Detecta Fissura (2016).	308
Quadro 53 – Biblioteca Central: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação de manchas escuras.	311
Quadro 54 - Biblioteca Central: percentual de classificação de manchas escuras para $k = 3$ e $k = 5$	312
Quadro 55 - Distribuições de frequência de píxeis em ortoimagem original e com manipulação de contraste para manchas escuras da ANTAQ: R, G, B e escalas de cinza. Eixo vertical corresponde a frequência de píxeis.	315

Quadro 56 – Distribuições de frequência de píxeis em ortoimagem original e com manipulação de contraste para manchas escuras da ANTAQ: H, S e V. Eixo vertical corresponde a frequência de píxeis.....	315
Quadro 57 - ANTAQ: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação.....	317
Quadro 58 – ANTAQ. Percentual de classificação nos espaços de cores RGB, escalas de cinza, H, S e V.....	318
Quadro 59 – ANTAQ. Segmentação e classificação nos espaços RGB e escalas de cinza em ortoimagem com manipulação de contraste.	318
Quadro 60 – ANTAQ. Espaços de cores, valor de k , área mínima e máxima, percentual de classificação, segmentação e classificação em ortoimagem sem manipulação de contraste.....	320
Quadro 61 - ANTAQ. Espaços de cores, valor de k , área mínima e máxima, percentual de classificação, segmentação e classificação em ortoimagem com manipulação de contraste.....	321
Quadro 62 – Edifício B. Espaços de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação em ortoimagem sem manipulação de contraste.....	327
Quadro 63 – Edifício B: segmentação e classificação para valores de $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$, espaço RGB.....	328
Quadro 64 – Anexo I do Congresso Nacional. Espaços de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação em ortoimagem sem manipulação de contraste.	331
Quadro 65 – Anexo I do Congresso Nacional: segmentação e classificação para valores de $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$	333
Quadro 66 – Anexo I do Congresso Nacional. Espaços de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação em ortoimagem com manipulação de contraste.....	335
Quadro 67 – Anexo I do Congresso Nacional. Percentual de classificação no espaço de cor RGB, para $k = 1$, $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$	336
Quadro 68 - Quadro-resumo das manifestações patológicas detectadas em ortoimagens no programa Tyche (2015).	348
Quadro 69 - Quadro-resumo das fissuras detectadas em ortoimagens no programa Detecta Fissura (2016).	350

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

μ VANTs	Micro Veículos Aéreos Não Tripulados
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ASP	<i>American Society of Photogrammetry</i>
BMP	<i>Bit Map</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Auxiliado por Computador)
CCD	<i>Charged Couple Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-oxide Semiconductor</i>
CMY	<i>Cyan, Magenta, Yellow</i>
CMYK	<i>Cyan, Magenta, Yellow, Black</i>
DSM	<i>Dense Stereo Matching</i>
EXIF	<i>Exchangeable image file format</i>
GIF	<i>Graphics Interchange Format</i>
HDS	<i>High Definition Survey</i>
HSI	<i>Hue, Saturation, Intensity</i>
HSV	<i>Hue, Saturation, Value</i>
IBAPE	Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISPRS	<i>International Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
JPEG ou JPG	<i>Joint Pictures Experts Group</i>
MVS	<i>Multi-View Stereo</i>
PNG	<i>Portable Network Graphics</i>
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
SFM	<i>Structure from Motion</i>
STM	<i>Structure From Motion</i>
TIFF ou TIF	<i>Tagged Image File Format</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>

TOF	<i>Time of Flight</i>
UNSW	<i>Unmanned Aerial Vehicle-based Mapping</i>
UVS	<i>Unmanned Vehicle Systems</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>B</i>	Distância entre a posição das estações na tomada fotográfica
<i>d</i>	Distância da câmera ao objeto ou cena (m)
<i>f</i>	Distância focal (mm)
<i>k</i>	Kappa
<i>L</i>	Distância das estações para o objeto fotografado
<i>NP</i>	Número de píxeis (píxel)
<i>s</i>	Dimensão do sensor da câmera (mm)
<i>TP</i>	Tamanho do píxel (píxel)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	1
1.2	MOTIVAÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DA PESQUISA	4
1.3	HIPÓTESE	10
1.4	OBJETIVOS	11
1.4.1	<i>Objetivo geral</i>	11
1.4.2	<i>Objetivos específicos</i>	11
1.5	CONTRIBUIÇÃO DA TESE	12
1.6	METODOLOGIA	13
1.7	DELIMITAÇÃO DO ESCOPO	16
1.8	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	DESEMPENHO, MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E MAPAS DE DANOS DE FACHADAS	19
2.1	DESEMPENHO DE FACHADAS DE EDIFÍCIOS	19
2.2	TÉCNICAS DE INSPEÇÃO	22
2.2.1	<i>Métodos experimentais de inspeção</i>	22
2.2.1.1	<i>Ensaio in situ</i>	22
2.2.1.2	<i>Ensaio em laboratórios</i>	23
2.2.2	<i>Métodos empíricos de inspeção</i>	24
2.3	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM FACHADAS DETECTÁVEIS POR INSPEÇÃO VISUAL	29
2.3.1	<i>Fissuras</i>	32
2.3.2	<i>Manchas</i>	35
2.3.2.1	<i>Manchas oriundas de sujidade</i>	36
2.3.2.2	<i>Manchas por crescimento de microrganismos</i>	38
2.3.2.3	<i>Manchas pelo fenômeno da termoforese</i>	40
2.3.2.4	<i>Manchas por precipitação de eflorescência</i>	41
2.3.2.5	<i>Manchas por alteração cromática ou descoloração</i>	42

2.3.3	<i>Destacamento de revestimentos cerâmicos e em reboco</i>	43
2.4	MAPA DE DANOS DE FACHADAS	45
2.4.1	<i>Tipologias de mapas de danos</i>	47
2.4.2	<i>Representação de mapa de danos</i>	48
2.5	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CAPÍTULO 2	53
3	FOTOGRAMETRIA DIGITAL	55
3.1	FOTOGRAMETRIA	55
3.1.1	<i>Fases evolutivas da fotogrametria</i>	57
3.1.2	<i>Princípios da fotogrametria</i>	63
3.1.3	<i>Resseção, Interseção e Triangulação</i>	67
3.1.4	<i>Orientação interna e externa</i>	68
3.1.5	<i>Retificação de imagens</i>	70
3.2	AEROFOTOGRAMETRIA	71
3.2.1	<i>Fotografias aéreas</i>	73
3.2.2	<i>Determinação do número de fotografias para cobertura</i>	75
3.2.3	<i>Recobrimentos Aerofotogramétricos</i>	76
3.2.4	<i>Veículos aéreos não tripulados – VANTs</i>	79
3.3	IMAGENS DIGITAIS	82
3.3.1	<i>Características de câmeras digitais</i>	83
3.3.2	<i>Resolução de imagens digitais</i>	85
3.3.3	<i>Métodos de aquisição de imagens digitais</i>	85
3.4	TIPOS DE PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO	86
3.5	NUVEM DE PONTOS	87
3.5.1	<i>Laser Scanning</i>	88
3.5.2	<i>Digitalização tridimensional baseada em fotografias (DSM)</i>	90
3.5.3	<i>Processamento por nuvem de pontos (DSM)</i>	93
3.5.3.1	Pontos correspondentes	93
3.5.3.2	Nuvem de pontos esparsa	98
3.5.3.3	Nuvem de pontos densa	103
3.5.3.4	Processamento de malhas (<i>mesh</i>) ou pós-processamento	104
3.5.4	<i>Ferramentas para DSM</i>	105
3.6	RESTITUIÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DIGITAL	106

3.6.1	<i>Monorrestituição digital</i>	107
3.6.2	<i>Estereorrestituição</i>	108
3.6.3	<i>Restituição a partir de várias fotografias</i>	109
3.6.3.1	Para o processamento interativo de imagens digitais	109
3.6.3.2	Para o processamento semiautomático ou automático de imagens digitais	112
3.7	FOTOGRAMETRIA COMO MÉTODO DE GERAÇÃO DE MAPAS DE DANOS	114
3.8	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CAPÍTULO 3	117
4	PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	118
4.1	IMAGENS NO PDI	119
4.1.1	<i>Coordenadas de píxeis</i>	120
4.1.2	<i>Tipos de imagens processadas</i>	121
4.1.3	<i>Formatos de imagens</i>	122
4.1.4	<i>Histograma</i>	122
4.2	ESPAÇOS DE CORES	123
4.3	ETAPAS DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	125
4.3.1	<i>Aquisição de imagens</i>	126
4.3.2	<i>Pré-processamento</i>	126
4.3.3	<i>Segmentação</i>	127
4.3.4	<i>Pós-processamento</i>	131
4.3.5	<i>Extração de atributos</i>	131
4.3.6	<i>Reconhecimento e classificação</i>	131
4.4	REALCE DE IMAGENS	132
4.4.1	<i>Brilho e contraste</i>	132
4.4.2	<i>Filtragem</i>	133
4.5	APLICAÇÕES DE PDI NA EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES	136
4.6	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CAPÍTULO 4	140
5	EXPERIMENTOS DA GERAÇÃO DE MODELOS POR DSM	142
5.1	PLANEJAMENTO	142
5.2	EQUIPAMENTOS	143
5.2.1	<i>Câmeras fotográficas</i>	143
5.2.1.1	Posição da câmera pela distância à edificação	144

5.2.1.2	Posição da câmera pela distância entre as tomadas – sobreposição de imagens	147
5.2.1.3	Cálculo do número de fotografias	151
5.2.2	<i>Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)</i>	152
5.2.3	<i>Hardware</i>	153
5.3	PROCESSAMENTO	154
5.3.1	<i>Photosynth</i>	154
5.3.2	<i>123D Catch</i>	156
5.3.3	<i>VisualSfM</i>	157
5.3.4	<i>MeshLab</i>	158
5.3.5	<i>PhotoScan</i>	160
5.4	APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS NA GERAÇÃO DE MODELOS POR DSM	165
5.4.1	<i>Corpo de prova</i>	166
5.4.2	<i>Edifícios residenciais</i>	176
5.4.2.1	Edifício A	176
5.4.2.2	Edifício B	189
5.4.3	<i>Prédio da Biblioteca Central da Universidade de Brasília – BCE</i>	201
5.4.4	<i>Prédio da ANTAQ</i>	212
5.4.5	<i>Museu Nacional Honestino Guimarães</i>	227
5.4.6	<i>Prédio do Congresso Nacional, Anexo I</i>	239
5.4.7	<i>Torre de TV Digital</i>	247
5.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA GERAÇÃO DOS MODELOS POR DSM	254
5.5.1	<i>Utilização de VANTs</i>	254
5.5.2	<i>Geração de modelos por DSM</i>	255
6	EXPERIMENTOS DA GERAÇÃO DE MAPAS DE DANOS POR PDI	261
6.1	MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO DO TYCHE	262
6.1.1	<i>Seleção da amostra</i>	262
6.1.2	<i>Análise estatística da amostra por distribuição normal univariada e bivariada</i>	263
6.1.3	<i>Segmentação a partir da análise estatística</i>	265
6.1.4	<i>Classificação a partir da etapa de segmentação</i>	265
6.1.5	<i>Extração de atributos</i>	266
6.2	MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO DO DETECTA FISSURA	267
6.2.1	<i>Dilatação de imagens</i>	267

6.2.2	<i>Limiarização para o operador Canny</i>	268
6.2.3	<i>Remoção de ruídos</i>	268
6.2.4	<i>Demais procedimentos realizados pelo programa</i>	268
6.3	RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES EM IMAGENS DE FACHADAS	269
6.3.1	<i>Manchas escuras</i>	269
6.3.2	<i>Eflorescências</i>	275
6.3.3	<i>Destacamento de revestimento cerâmico</i>	283
6.3.4	<i>Alteração cromática</i>	289
6.3.5	<i>Fissuras</i>	292
6.3.6	<i>Quadros-resumo das manifestações patológicas classificadas em imagens</i>	306
6.4	MAPAS DE DANOS DAS ORTOIMAGENS DE FACHADAS	309
6.4.1	<i>Mapas de danos gerados no Tyche (2015)</i>	309
6.4.1.1	Biblioteca Central da UnB	309
6.4.1.2	ANTAQ	313
6.4.1.3	Edifício B	322
6.4.1.4	Congresso Nacional – Anexo I	328
6.4.2	<i>Mapas de danos gerados no Detecta Fissura (2016)</i>	338
6.4.2.1	Museu Nacional Honestino Guimarães	338
6.4.2.2	Biblioteca Central da UnB	343
6.4.3	<i>Quadros-resumo das manifestações patológicas classificadas em ortoimagens</i>	348
6.5	DISCUSSÃO DA GERAÇÃO DE MAPAS DE DANOS	350
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	354
7.1	CONCLUSÕES	354
7.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	357
	REFERÊNCIAS	358

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresentará os aspectos que buscam trazer a fundamentação e contextualização do trabalho, direcionados a introduzir o leitor à proposta da pesquisa. A abrangência e importância do tema serão apresentadas, assim como a sua motivação, a hipótese, os objetivos, a delimitação do trabalho e como se apresentará a divisão da tese no todo, ou melhor, as divisões dos capítulos.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

Os requisitos de desempenho devem ser, inicialmente, estabelecidos na fase de projeto (vida útil de projeto) e, após a ocupação, o edifício deve possuir capacidade de resposta aos agentes de degradação por um tempo pré-determinado ou previsto. Cumprindo ou não o período de vida útil, atividades de manutenção, recuperação ou reparação são necessárias para reestabelecer os requisitos mínimos.

As intervenções em edificações, visando o restabelecimento de requisitos mínimos de desempenho, fazem-se relevantes para garantir, dentre outros fatores, mas não menos importantes, a segurança dos usuários. As fachadas são elementos que estão sujeitos ao processo de degradação decorrente da exposição aos agentes extrínsecos e das particularidades do próprio sistema construtivo (ou fatores intrínsecos) e que, a depender da intensidade, podem acelerar o surgimento de manifestações patológicas, reduzindo, assim, a vida útil.

O levantamento cadastral é um instrumento que visa obter informações das edificações por meio de processos de medição e registro das dimensões e formas do edifício com a finalidade de sua representação gráfica, quando não se possuem documentações. Os mapas de danos¹ são representações gráficas do levantamento de manifestações patológicas identificadas em uma

¹ Neste trabalho, optou-se também por utilizar o termo mapa de danos para designar a representação das manifestações patológicas ocorridas em fachadas, em referência à língua inglesa e citações de trabalhos científicos (GASPAR; BRITO, 2008) que usaram a palavra, em inglês, *damage*. A ABNT NBR 14653-1 (2001) também utiliza o termo dano, e conceitua-a como prejuízo causado por ocorrência de vícios, defeitos, sinistros, delitos e entre outros.

edificação, como: fissuras, formação de manchas, eflorescências, deformações, destacamento de revestimento, corrosão, alteração cromática, dentre outras.

A representação de uma edificação em escala é denominada forma real, que se apresenta em forma teórica e efetiva. A forma teórica é a obtida pela concepção da arquitetura ainda na fase de projeto, enquanto que a forma efetiva busca representar o atual estado do edifício, com todos os tipos de problemas decorrentes da vida em serviço, permitindo também que manifestações patológicas sejam descritas. Assim, os mapas de danos representam a forma efetiva de um edifício no momento do levantamento das manifestações patológicas existentes e podem ser gerados em meios digitais.

No âmbito dos trabalhos voltados à identificação e quantificação de danos em fachadas de edifícios no Brasil, podem ser citados os trabalhos desenvolvidos por Antunes (2010), Melo Júnior (2010), Bauer e colaboradores (2011), Bauer e colaboradores (2012), Tirello e Correa (2012), Costa (2014), Silva (2014), Melo Júnior e Carasek (2014) e Carvalho *et al.* (2014). Estas pesquisas têm relevância porque contribuem com a compreensão dos aspectos que envolvem os fenômenos de deterioração das fachadas. Internacionalmente, a identificação e a sistematização dos processos de ocorrência de manifestações patológicas também são estudadas com afinco e em alguns casos com resultados representados também por mapas de danos (FLORES-COLEN e colaboradores; 2006, FLORES-COLEN, 2009; GASPAR, 2009).

Tirello e Correa (2012) discorrem que os mapas de danos de fachadas são instrumentos eficazes para o planejamento das diretrizes projetuais de restauro, de previsões orçamentárias e de ações de monitoramento preventivo para auxiliar à boa conservação ao longo do tempo. Os autores ainda comentam que estes mapas costumam ser representados em elevações e as especificidades das manifestações patológicas presentes são ilustradas com a sobreposição de elementos gráficos, tais como: hachuras, cores, símbolos e números que, juntos ou separados, sintetizam as informações relacionadas às características do material, dos agentes e causas da degradação.

As técnicas empregadas para inspeção visual de danos em fachadas podem se diferenciar ou caracterizar por vários aspectos, como: localização e extensão do edifício, forma de apresentação dos resultados, tempo para realização, viabilidade de recursos humanos e financeiros, e precisão requerida. Dentre os métodos empregados para levantamentos de

edificações, podem-se citar: a medição direta, os métodos 3D *Laser Scanning*, *Global Positioning System* (GPS) e a fotogrametria terrestre e à curta distância.

A fotogrametria terrestre e à curta distância permitem representar por meio das ortoimagens ou ortofotos² a forma efetiva das fachadas de um edifício. Isto é possível uma vez que as ortoimagens das faces externas possibilitam criar as representações de fachadas pela projeção ortográfica, ou seja, a representação gráfica da fachada. Torna-se também a forma efetiva porque o modo de captura é a fotografia. Assim, as propriedades físicas dos materiais empregados na construção, as deformações, as manifestações patológicas, enfim, o estado de conservação da fachada no instante do registro fotográfico é representado nas ortoimagens.

Trabalhos e pesquisas voltados à quantificação de manifestações patológicas em edificações a partir da fotogrametria digital têm sido realizados recentemente e, por meio de vetorizações sobre as ortoimagens em programas CAD (*Computer Aided Design* ou Desenho Auxiliado por Computador), mapas de danos são gerados (COSTA; AMORIM, 2009). Alguns destes estudos aplicam o processamento fotogramétrico manual, onde a correlação de pontos homólogos é realizada interativamente pelo usuário.

A evolução da Ciência da Computação e, principalmente, da visão computacional³ tem possibilitado o desenvolvimento de novos métodos, como a correspondência estéreo (*stereo matching*) que é empregada na técnica *Dense Stereo Matching* (DSM) na fotogrametria digital. A técnica DSM permite que por meio de duas ou mais fotografias modelos geométricos de objetos ou cenas possam ser gerados por processamento automático e encontro de píxeis correspondentes nas imagens, convertendo as posições bidimensionais em posições tridimensionais, resultando em modelos por nuvens de pontos (SZELISKI, 2010). Atualmente, este método automático vem sendo muito difundido e aplicado em pesquisas direcionadas à obtenção de modelos geométricos constituídos de nuvens de pontos.

² As ortoimagens ou ortofotos são produtos fotogramétricos bidimensionais obtidos pela ortorretificação ou projeção ortográfica dos modelos geométricos, obtidos nas etapas de exportação de modelos de superfície.

³ Visão computacional é uma área da Ciência Computacional dedicada ao desenvolvimento de métodos para a extração de informações contidas em imagens de maneira automática. Segundo Szeliski (2010), a visão computacional vem sendo usada numa grande variedade de aplicações, como a construção totalmente automatizada de modelos 3D de edificações a partir de fotografias (fotogrametria digital).

As pesquisas envolvendo a obtenção de modelos geométricos de edificações por meio de nuvem de pontos (*Dense Stereo Matching*) ainda são recentes, mas estudos têm ressaltado a grande qualidade dos produtos fotogramétricos sob condições apropriadas de iluminação, assim como pelo emprego de *hardware* e *software* adequados aos produtos que se almejam (KOUTSOUDIS *et al.*, 2012). Esta técnica tem demonstrado ser uma excelente ferramenta auxiliadora na elaboração de mapas de danos, pois permitem gerar as ortoimagens, como instrumento inicial e de suporte para a criação das representações dos problemas em fachadas.

Em outro segmento da visão computacional, encontra-se a extração de atributos, ou seja, reconhecimento e classificação de características ou atributos de um objeto. A aplicação de técnicas de extração automática de características é uma realidade em várias áreas da ciência, como na engenharia biomédica, onde o processamento digital de imagens é utilizado para diversos propósitos, como o reconhecimento de componentes do sangue e de partes de órgãos do corpo, visando auxiliar nas atividades de diagnósticos de doenças e na tomada de decisões clínicas (FARIA, 2013; SIQUEIRA, 2010; VALE *et al.*, 2014).

Na área da engenharia civil, arquitetura ou construção civil, trabalhos vêm sendo desenvolvidos recentemente com o objetivo de extrair informações acerca de manifestações patológicas em elementos de fachadas por meio do processamento digital de imagens (ROQUE *et al.*, 2012; MELO JÚNIOR *et al.*, 2014; PEREIRA, 2015).

1.2 MOTIVAÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DA PESQUISA

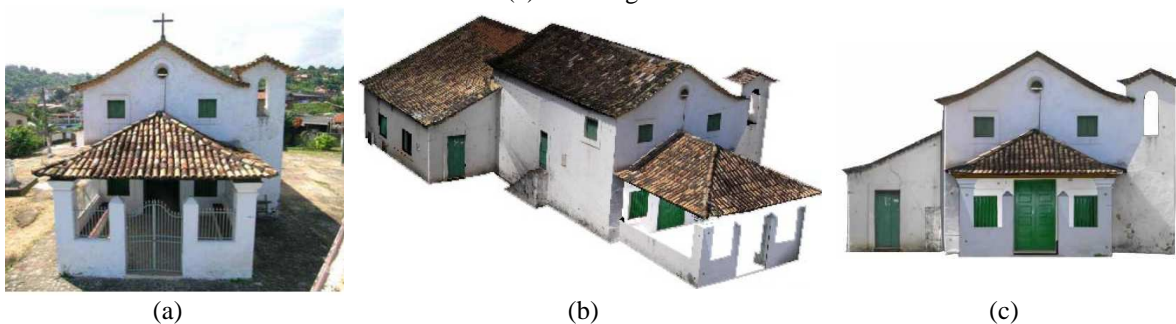
Apesar da necessidade de maiores estudos no Brasil envolvendo a metodologia da inspeção, investigação e representação de manifestações patológicas, os mapas de danos têm revelado a sua importância como documento ilustrativo capaz de agrupar um grande número de informações referentes à quantidade, qualidade e intensidade dos problemas surgidos em edificações.

Os mapas de danos são importantes para diversos propósitos, citando-se: listar os possíveis agentes e causas da manifestação patológica, sintetizar as informações do estado atual da conservação da edificação, embasar as informações necessárias para as atividades de intervenção para os projetos de conservação e restauro de prédios históricos, e avaliar os efeitos ambientais sobre as fachadas. Estas são algumas das possibilidades que enfatizam a relevância

dos mapas de danos e que incentivam a busca por metodologias que aprimorem as técnicas envolvidas para geração destes instrumentos.

As ortoimagens vêm sendo utilizadas para diversas finalidades e uma destas é a representação de mapa de danos. A ortoimagem é um instrumento promissor porque a partir dos procedimentos fotogramétricos consegue representar ortograficamente (sem efeito de perspectiva) a fachada das edificações com sua forma efetiva. Um dos primeiros trabalhos realizados no Brasil usando a fotogrametria digital foi desenvolvido por Groetelaars (2004), em que por meio de fotografias gerou-se o modelo geométrico da Capela de Nossa Senhora da Escada e, posteriormente, a ortoimagem da fachada principal, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Capela de Nossa Senhora da Escada: (a) fotografia frontal; (b) modelo geométrico; (c) ortoimagem



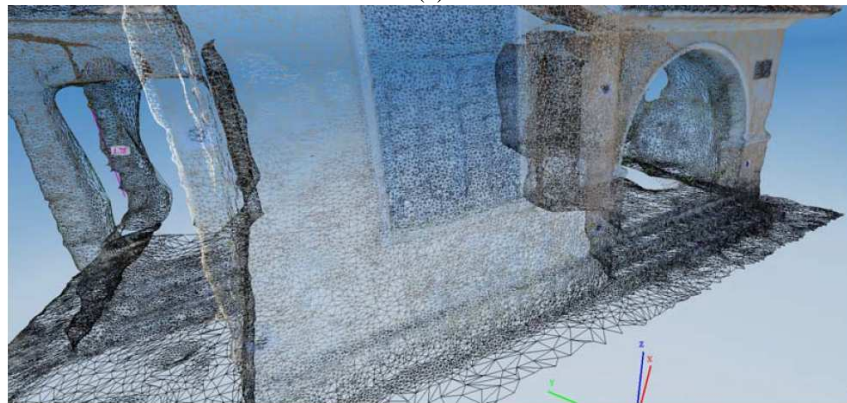
Fonte: Groetelaars (2004).

O tipo de processamento usado no experimento desta capela foi semi-automático, em que a identificação de pontos homólogos é realizada pelo usuário, já que neste período ainda não havia a técnica por DSM. Recentemente, trabalhos têm sido desenvolvidos com o uso da tecnologia DSM com diferentes propósitos. A Figura 2 apresenta a representação de modelos geométricos por nuvem de pontos e malha triangular da Casa Rosa na FAUBA, desenvolvidos por Brito e colaboradores (2012), visando o levantamento cadastral da edificação. É importante salientar que o modelo geométrico por malha triangular é gerado após a etapa de obtenção da nuvem de pontos, ou seja, o procedimento inicial e preponderante é obter as coordenadas geográficas dos pontos da nuvem por *stereo matching*.

Figura 2 - (a) Modelos de nuvem de pontos da Casa Rosa no Revit Architecture; (b) Detalhe da malha triangular gerada no 123D Catch da Casa Rosa



(a)



(b)

Fonte: Brito e colaboradores (2012).

A obtenção de modelos geométricos por DSM permite uma automatização no processo de reconhecimento dos pontos homólogos em que nuvens de pontos são geradas, criando modelos geométricos por meio de imagens fotográficas. Trabalhos vêm sendo realizados a partir da técnica por DSM, obtendo-se ótimos resultados. Porém, há ainda a necessidade de maiores estudos que se aprofundem nos métodos e técnicas, e que resultem num acervo de conhecimentos para a contribuição com o estado da arte e da prática desta técnica.

Uma das prerrogativas da técnica de obtenção de modelos geométricos por nuvem de pontos é que as imagens sejam obtidas perpendicularmente ao plano dos objetos e de pontos distintos. Os edifícios altos são objeto de estudo deste trabalho e a captura de imagens das partes mais altas de um ponto ao nível do solo contraria a prerrogativa citada. Além deste aspecto, sabe-se que as inspeções em edificações com muitos pavimentos são tarefas complexas e dispendiosas devido à dificuldade de acesso às partes mais altas.

A aplicação de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) como ferramenta de inspeção de pontes e viadutos é uma realidade recente, logo que, com câmeras embarcadas, permite o registro fotográfico ou em vídeo de todo o objeto de interesse, incluindo das regiões de difícil acesso, como ilustrado na Figura 3 (b) (METNI; HAMEL, 2007). A aplicação de VANTs como ferramenta de inspeção de edifícios altos ainda é pouco explorada no Brasil, mas com algumas aplicações práticas em outros países.

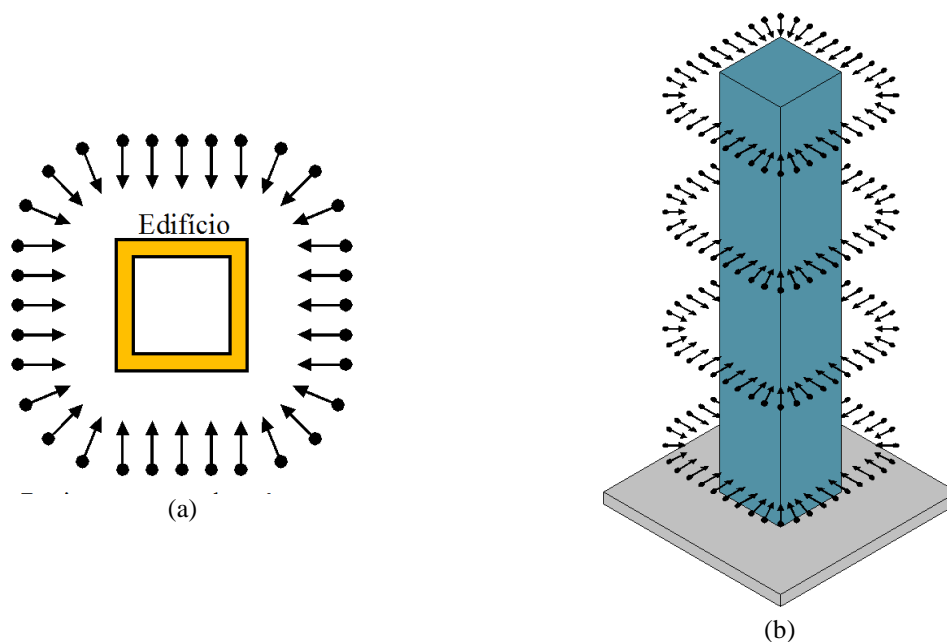
Figura 3 – (a) Plataforma para inspeções de fissuras em pontes; (b) Inspeção auxiliada por VANT no viaduto *Saint Cloud*



Fonte: Metni e Hamel (2007).

Sobre todos estes aspectos, há ainda a importância da realização de pesquisas que abordem o uso do VANT para captura de imagens a serem utilizadas para obtenção de modelos por DSM de altas edificações, porque não há trabalhos que abordam a técnica mencionada. O VANT de asa rotativa traz a solução para a captura de imagens perpendicularmente ao plano da fachada para serem processadas nos programas de fotogrametria digital por meio da técnica de DSM. A Figura 4 é uma ilustração dos procedimentos de captura de imagens, em planta, para serem aplicadas em programas de fotogrametria digital, particularmente para esta técnica. A Figura 4 (b) representa esquematicamente o posicionamento da câmera em relação aos planos da fachada de um edifício com muitos pavimentos. Outros aspectos importantes devem ser explicados, como a sobreposição entre as fotografias, mas estas abordagens serão trazidas no Capítulo 3.

Figura 4 - (a) Captura de imagens para uma edificação ao nível do solo; (b) Captura de para uma edificação alta em vários níveis



Fonte: (a) Agisoft LLC (2014). (b) próprio autor.

O agrupamento de conhecimentos técnicos e científicos sobre o uso de VANT como equipamento de suporte para os registros fotográficos - de fachadas de altos edifícios - a serem empregados em procedimentos específicos da técnica de DSM são ainda raros, necessitando-se de mais experimentos para se criar referencial científico e das práticas sobre os principais aspectos que corroboram para a sua aplicabilidade, como em referência aos parâmetros a serem definidos nas câmeras digitais, quanto às questões de sobreposição entre imagens, e a versatilidade na geração de modelos geométricos e de ortoimagens a serem utilizadas como instrumento para a posterior geração de mapas de danos.

As fachadas de edificações são sistemas que estão predispostos ao surgimento de manifestações patológicas por vários fatores e muitos trabalhos sobre a temática são realizados com a finalidade de compreender os mecanismos de degradação, estudar soluções para o aumento da vida útil, direcionar as atividades de recuperação sistematizando informações, dentre outros aspectos. Prédios reconhecidos pela UNESCO como Patrimônio da Humanidade, como o Museu Nacional Honestino Guimarães (Figura 5), têm apresentado na sua vida recente manifestações patológicas, o que leva à necessidade de atividades de recuperação, baseando-se, preponderantemente, no levantamento dos danos.

Figura 5 – (a) Museu Nacional Honestino Guimarães; (b) Fissuras observadas na fachada do Museu Nacional Honestino Guimarães

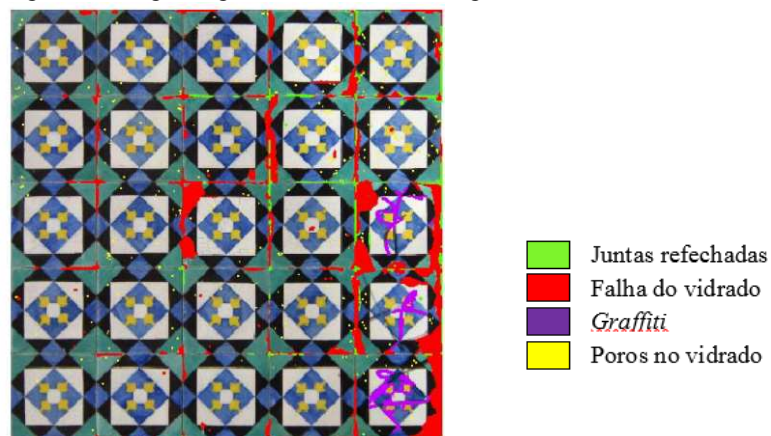


Fonte: Próprio autor.

A aplicação das técnicas de extração de informações pelo processamento digital de imagens é uma realidade e acredita-se ser plausível sua aplicação no mapeamento de danos de fachadas. Entretanto, são escassos os trabalhos desenvolvidos para a geração automática de mapas de danos de fachadas de edificações históricas por meio de processamento digital de imagens (PDI), visando auxiliar nas atividades de recuperação e restauro destes edifícios.

Roque e colaboradores (2012) aplicaram técnicas de PDI em registros fotográficos de fachadas azulejadas de edificações do século XIX e XX em Portugal com a finalidade de avaliar a aplicabilidade da detecção automática de danos, como a falta de vidro (camada vitrificada da peça cerâmica), ilustrado na Figura 6. Os autores afirmam que uma das maiores limitações é o grande número de objetos que são classificados sem serem realmente danos, levando o operador a realizar tarefas de edição nos resultados de classificação. Porém, são enfáticos ao afirmarem que esta tarefa de edição é menos onerosa e mais rápida que a digitalização ou vetorização manual por um usuário.

Figura 6 – Registro gráfico da fachada. Imagem obtida no ARCGIS®



Fonte: Roque e colaboradores (2012).

Melo Júnior e colaboradores (2014) realizaram uma das primeiras pesquisas no Brasil visando à extração de informações por técnicas de PDI sobre a formação de manchas escuras em fachadas, por meio da geração de mapas de danos em ortoimagens criadas a partir de fotografias capturadas com VANT. Os resultados permitiram quantificar a percentagem de manchas em função da área da fachada, assim como criar mapas de danos da manifestação patológica de maneira automática.

Em estudo realizado por Pereira (2015), foram implementados dois algoritmos para a indicação da presença de fissuras em alvenaria, utilizando-se também de VANTs para se ter acesso às partes mais altas das edificações. As implementações elaboradas, em MATLAB, basearam-se, em síntese, em filtragem de imagens e limiarização. Os algoritmos implementados foram desenvolvidos para serem embarcados em VANTs e não para a geração de mapas de danos a partir de ortoimagens de fachadas criadas com fotografias capturadas por este tipo de veículo e também pela técnica de DSM.

Finalizando, diante da contextualização, é importante destacar que a motivação desta pesquisa é a aplicação de métodos para geração de mapas de danos de fachadas a partir de técnicas e ferramentas que proporcionem uma forma automatizada de obtenção destes mapas e também a não existência de trabalhos direcionados à geração de mapas por meio dos seguimentos da visão computacional, utilizando-se de fotografias capturadas por VANT e emprego de processamento fotogramétrico automático (nuvem de pontos) no Brasil, embasando a originalidade da pesquisa. Por fim, destaca-se que este trabalho envolve a aplicação de conhecimentos das áreas da tecnologia e da informática, com o propósito de aplicar métodos para a geração de mapas de danos automáticos ou semiautomáticos por meio da multidisciplinaridade.

1.3 HIPÓTESE

As ortoimagens de fachadas geradas a partir dos modelos geométricos pela fotogrametria digital podem tornar versátil o processo de criação dos mapas de danos, principalmente pelo processamento automático, ou melhor, correlação automática dos pontos homólogos entre as imagens para modelagem de nuvem de pontos e modelos de superfície.

Acredita-se que, para as edificações altas, o emprego de VANTs é uma ferramenta adequada devido a procedimentos necessários para a captura da imagem para o processamento automático.

As técnicas de visão computacional podem auxiliar na obtenção de resultados precisos e práticos, no intuito do reconhecimento dos padrões de interesse, como as manifestações patológicas em fachadas, reconhecendo e extraindo informações das ortoimagens criadas na etapa fotogramétrica, gerando, assim, mapas de danos que são imprescindíveis para as atividades de manutenção, recuperação, intervenção ou restauro de diversos tipos de edificações, incluindo os patrimônios históricos.

1.4 OBJETIVOS

A seguir, serão apresentados os objetivos traçados para o alcance dos resultados deste trabalho, divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.4.1 Objetivo geral

O presente trabalho visa o desenvolvimento de uma metodologia para a inspeção de fachadas e geração de mapas de danos a partir da integralização dos seguintes métodos e técnicas: utilização de VANT para captura de imagens, geração de ortoimagens de fachadas pelo emprego da fotogrametria digital e classificação de danos por processamento digital de imagens.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são listados a seguir:

- traçar as diretrizes para os procedimentos de captura de imagens das fachadas para a técnica de obtenção de modelos por nuvem de pontos (correspondência estéreo), baseando-se nos aspectos de planejamento, cálculo de número de fotos, sobreposição, distância do edifício e parâmetros de câmera fotográfica;
- avaliar a eficiência da utilização de VANTs como meio de captura de imagens a serem processadas por meio dos resultados obtidos nos programas de fotogrametria digital;

- avaliar alguns programas de fotogrametria digital utilizados na geração de modelos geométricos (nuvem de pontos e malhas triangulares): tipo via *web*, livres gratuitos e comerciais;
- analisar qualitativamente os resultados de modelos gerados pela obtenção de nuvem de pontos de fachadas, assim como os avaliar comparativamente modelos gerados com parâmetros (modos) distintos, ou seja, alternando as opções de alto, médio e baixo desempenho do programa PhotoScan;
- gerar mapas de danos de fachadas, quantificando as manifestações patológicas em imagens e ortoimagens de fachadas por meio da aplicação de programas em linguagem computacional; e
- avaliar qualitativamente os resultados dos mapas de danos, atribuindo classificações pelo aspecto visual, como: muito satisfatório (MS), resultado satisfatório (RS) e não satisfatório (NS), para os espaços de cores RGB, escalas de cinza, H, S e V. Avaliar também os resultados obtidos pelo programa de detecção de fissuras, analisando os operadores Sobel e Canny.

1.5 CONTRIBUIÇÃO DA TESE

A tese tem como contribuição o desenvolvimento de metodologia para otimização e racionalização das inspeções visuais em edificações com o uso do VANT nas tomadas fotográficas e a utilização de técnicas de processamento digital de imagens para a extração de informações para classificação e quantificação de manifestações patológicas em, principalmente, ortoimagens obtidas por DSM.

Enfatizando, ainda por serem poucos os trabalhos desenvolvidos com o emprego de VANT para captura de imagens para obtenção de modelos geométricos por DSM e exportação de ortoimagens de fachadas de edifícios, este estudo auxiliará na compreensão e geração de conhecimentos sobre a técnica DSM, pois ainda é uma técnica recente e necessita de maior aprofundamento, principalmente quanto ao uso de VANTs como ferramenta de suporte.

Esta pesquisa enquadra-se na linha de pesquisa referente à Patologia no Ambiente Construído, do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC/UnB).

1.6 METODOLOGIA

Metodologia é descrita como o estudo dos caminhos a serem percorridos para a realização da pesquisa científica. Os métodos são os procedimentos ou as técnicas em direção aos objetivos (UFRGS, 2009). Esta pesquisa foi desenvolvida a partir, inicialmente, da revisão bibliográfica sobre os assuntos que direcionaram o emprego das ferramentas e técnicas no desenvolvimento dos experimentos práticos para alcance dos objetivos propostos, e que serão melhores descritos a seguir.

a) Obtenção do conhecimento sobre os métodos e ferramentas a serem utilizadas nas etapas da pesquisa:

- estudo das principais manifestações patológicas detectadas por inspeção visual em fachadas, trazendo, também, conceitos de desempenho, durabilidade e vida útil;
- pesquisa sobre a importância dos mapas de danos como ferramenta para as atividades de investigação dos problemas em fachadas, abordando de forma sucinta as suas tipologias e as representações;
- revisão bibliográfica sobre a fotogrametria, descrevendo primeiramente suas fases, princípios e classificação, dando destaque também a aerofotogrametria por ser a técnica fundamental para os propósitos específicos desta pesquisa;
- estudo da fotogrametria digital, que é a atual fase da fotogrametria e que se utiliza de imagens digitais e estações fotogramétricas digitais;
- estudo da operacionalização de alguns programas utilizados na fotogrametria digital (programas via *web*, livres gratuitos e comerciais), dando ênfase ao processo automático e à obtenção de modelos geométricos por nuvem de pontos (correspondência estéreo), às técnicas e procedimentos de captura das imagens;
- pesquisa sobre a extração de atributos (informações) por processamento digital de imagens, as etapas do processamento de imagens e as ferramentas computacionais.

b) Geração de modelos geométricos pelos programas de fotogrametria:

- elaboração da etapa de planejamento, analisando o entorno da edificação a ser fotografada e determinando, por meio de equações específicas, a quantidade de fotos

para se alcançar a sobreposição necessária para o processamento nos programas fotogramétricos, em função da distância do edifício e parâmetros da câmera;

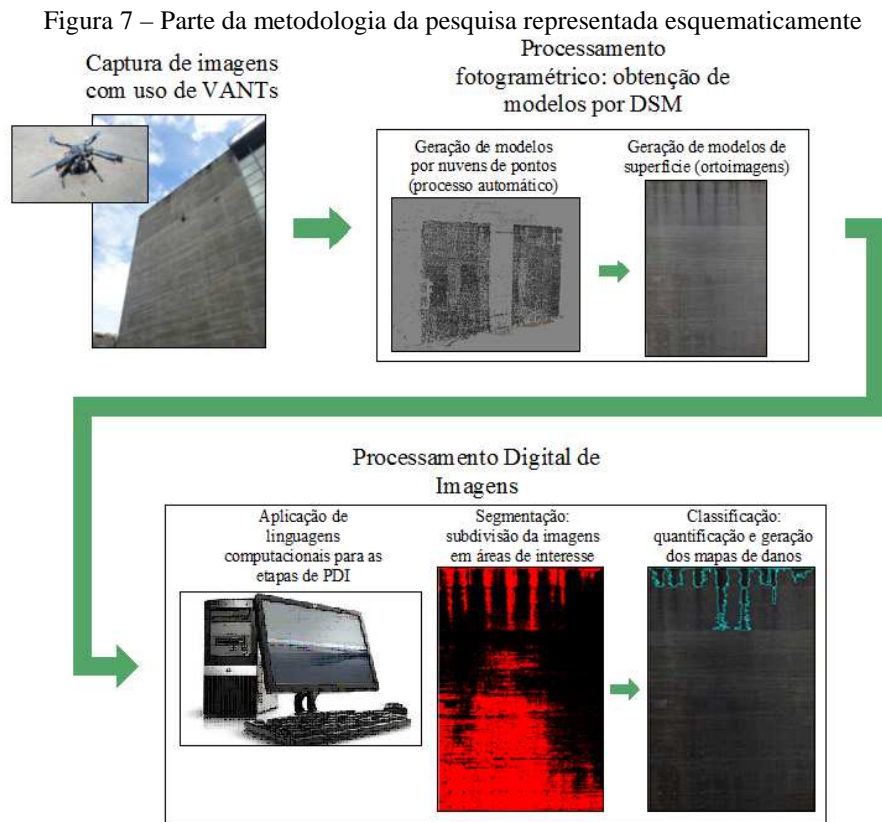
- determinação do *TP* (tamanho do píxel) para avaliar a possibilidade de visualização de fissuras nas fachadas, em função da distância da câmera ao edifício e dos parâmetros da câmera;
- estudo dos programas de fotogrametria digital para criação de modelos geométricos por fotografias de um corpo de prova, com a finalidade de comparar os processos e produtos gerados;
- realização dos voos com VANT para registro fotográfico das edificações, baseando-se nos métodos citados anteriormente;
- geração, por meio dos programas de fotogrametria (via *web*, livre e gratuito e comercial), de modelos geométricos das edificações, obtendo nuvens de pontos e malha triangular irregular (*Triangular Irregular Network - TIN*);
- geração das ortoimagens das fachadas dos edifícios por meio dos recursos de exportação do programa específico PhotoScan, para serem utilizadas na geração dos mapas de danos;
- avaliação dos programas utilizados na obtenção dos modelos geométricos, ponderando sobre os resultados obtidos.

c) Geração dos mapas de danos por processamento digital de imagens:

- geração de mapas de danos em imagens de fachadas com manifestações patológicas de manchas escuras, eflorescências, destacamento de revestimento cerâmico, alteração cromática e fissuras, para criação de conhecimentos para serem aplicados nas ortoimagens;
- avaliação da influência das resoluções de imagens na classificação de danos em imagens de fachadas;
- análise dos histogramas das distribuições de frequência de píxeis, com a finalidade de compreender o comportamento para os diferentes tipos de danos;
- geração dos mapas de danos em ortoimagens de fachadas com manifestações patológicas de manchas escuras, eflorescências, destacamento de revestimento cerâmico, alteração cromática e fissuras, visando alcançar o objetivo maior desta tese;

- avaliação dos resultados obtidos nos espaços de cores RGB, escalas de cinza, H, S e V das imagens e ortoimagens, para averiguar qual espaço apresenta melhor resultado para as manifestações patológicas avaliadas;
- avaliação dos resultados por operadores Sobel e Canny na detecção de fissuras, assim como os resultados obtidos com aplicação de outros operadores, como a conectividade e remoção de ruídos;
- realização do comparativo qualitativo entre os mapas de danos gerados por processamento digital de imagens e técnicas de processo manual por usuários em programas CAD;
- avaliação qualitativa dos resultados gerados pelos programas em linguagem de programação.

A Figura 7 apresenta em síntese e de forma ilustrativa as etapas dos métodos empregados para obtenção dos mapas de danos, que envolveram a captura das imagens por VANTs, o processamento em programas de fotogrametria digital e o processamento das imagens para a extração de atributos.



Fonte: Próprio autor.

1.7 DELIMITAÇÃO DO ESCOPO

A pesquisa delimita-se à aplicação de métodos para geração de mapas de danos de fachadas de edifícios baseados em técnicas de processamento digital de imagens e o emprego da fotogrametria digital e de VANTs para a captura de imagens. Os métodos aplicados visam enquadrar-se nas técnicas de inspeção visual, como método de auxílio às técnicas existentes.

Como resultado final deste trabalho, serão gerados os mapas de danos da formação de manchas escuras, destacamento de revestimento cerâmico, alteração cromática, formação de eflorescência e fissuras em, principalmente, ortoimagens de fachadas. Outro aspecto importante é que não será abordada neste trabalho a gravidade da patologia, ou seja, não se fará qualquer menção quanto ao nível de severidade ou também procedimentos para recuperação, reabilitação ou restauração das fachadas. Também não foi finalidade desta pesquisa criar ou utilizar padrões existentes de métodos propostos por outros pesquisadores para a representação dos mapas de danos.

As avaliações dos resultados obtidos nos mapas de danos, quando realizadas, foram meramente qualitativas, não se atendo a comparações entre os resultados quantitativos, devido às suas particularidades. Deste modo, a qualificação dos mapas de danos foi atribuída, genericamente, quanto à satisfatoriedade dos resultados. Assim, para os resultados em que quase todo o dano foi classificado, tendo pequenas partes de danos não classificados, será atribuído o termo **resultado satisfatório (RS)**, por método de análise visual (método empírico baseado na percepção). Para os resultados em que todo o dano foi classificado, resultado **muito satisfatório (MS)** e para os resultados em que nenhum dano, partes não relacionadas ao dano ou toda a fachada foi classificada, o termo **não satisfatório (NS)**. Estas foram as soluções adotadas para qualificar os resultados, pois não é possível mensurar localmente os danos, devido a vários fatores, como às formas dos danos, muitas vezes orgânicas.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do presente capítulo, introdutório, com abrangência e relevância do tema, motivação para realização da pesquisa, hipótese, objetivos e delimitação da pesquisa, este trabalho é constituído por mais três capítulos de revisão da literatura, dois capítulos de resultados e um capítulo final que descreve as conclusões.

No Capítulo 2, é trazida uma breve contextualização sobre desempenho, as ocorrências de manifestações patológicas e as técnicas de inspeção visual em fachadas. Após a breve descrição das principais manifestações patológicas em fachadas, é descrito o que são os mapas de danos e as suas tipologias e formas de representação.

O Capítulo 3 apresenta a revisão da literatura sobre fotogrametria, discorrendo, inicialmente, sobre as suas fases e seus princípios. Este capítulo contém a abordagem sobre a aerofotogrametria, que é uma das classificações da fotogrametria e também fundamental para a elaboração desta pesquisa. Por conseguinte, será dada ênfase às técnicas, ferramentas e métodos voltados à fotogrametria digital, principalmente para a técnica de DSM (*Dense Stereo Matching*), que é a obtenção de modelos geométricos e de superfícies por correspondência estéreo e nuvem de pontos, a técnica mais recente da atual fase da fotogrametria. De maneira abrangente, serão tratados os temas referentes às imagens digitais, a restituição fotogramétrica digital e o emprego dos produtos fotogramétricos como recurso para a geração de mapas de danos.

O Capítulo 4 traz a revisão bibliográfica sobre processamento digital de imagens, buscando, principalmente, apresentar as etapas que envolvem esta técnica, importantes para a geração dos mapas de danos. Neste capítulo também são apresentados: aspectos que envolvem a imagem, voltados às coordenadas de píxeis, histogramas, dentre outros, os espaços de cores; e algumas técnicas de realce. Ainda, são trazidos e neste capítulo algumas aplicações destes métodos em outros trabalhos e estudos.

O Capítulo 5 apresenta os resultados dos experimentos realizados na obtenção de modelos geométricos por meio de DSM. Neste capítulo, são apresentadas as equações para cálculo de tamanho de píxel (*TP*), número de fotos para alcançar a sobreposição das imagens e distância entre as imagens para obter a sobreposição de acordo com distância ao edifício e os parâmetros da câmera. Foram feitos experimentos com alguns tipos de programas, a fim de avaliar qual o mais adequado para a geração de ortoimagens a serem usadas na geração de mapas de danos. Inicialmente neste capítulo foram feitos testes com um corpo de prova e posteriormente modelos a partir das imagens de edificações obtidas com o VANT, e em alguns casos com fotos obtidas de pontos em solo.

No Capítulo 6, são apresentados os resultados dos mapas de danos realizados, primeiramente, a partir de imagens de fachadas com manifestações patológicas como forma de avaliar a técnica e, em seguida, sobre as ortoimagens obtidas pela fotogrametria digital, exclusivamente por *Dense Stereo Matching*. As manifestações patológicas submetidas à etapa de mapeamento foram: manchas escuras, destacamento de revestimento cerâmico, manchas de eflorescência, alteração cromática e fissuras. As ferramentas utilizadas foram programas desenvolvidos em linguagens computacionais ou de programação (MATLAB e C#).

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões resultantes de todo o estudo, trazendo uma breve análise final e propostas para trabalhos a serem desenvolvidos no futuro.

2 DESEMPENHO, MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E MAPAS DE DANOS DE FACHADAS

Este capítulo terá como finalidade abordar os aspectos que envolvem os mapas de danos e a sua importância para o levantamento e quantificação de manifestações patológicas em fachadas. Serão apresentados os métodos empregados na inspeção de edifícios, onde será dada uma atenção maior aos métodos empíricos e aos danos que permitem ser identificados pela inspeção visual: fissuras, manchas e destacamento de revestimentos. Os danos existentes em edifícios necessitam de ferramentas que possibilitem a sua quantificação como parte precedente dos processos de manutenção e recuperação, elevando, novamente, a vida útil das fachadas.

Complementarmente, alguns conceitos serão apresentados neste capítulo, como: desempenho, durabilidade e vida útil de fachadas, assim como uma contextualização sobre os tipos de problemas em fachadas e o uso da fotogrametria como ferramenta de inspeção de danos em fachadas.

2.1 DESEMPENHO DE FACHADAS DE EDIFÍCIOS

Inicialmente, a conceituação de desempenho, assim como de durabilidade e vida útil, faz-se necessária para se contextualizar a edificação e suas partes na temática que envolve o surgimento de problemas patológicos ou, simplesmente, danos. O conceito de desempenho remete-se à prática de se pensar e proceder em termos de fins e não de meios, ou melhor, relacionar com as funções exigidas aos edifícios e seus elementos, e não como esses são prescritos para a sua construção. Em suma, são os requisitos que a edificação deve atender independente da forma como será construída.

Para Flores-Colen (2009), desempenho na construção civil surge associado ao mecanismo de garantir a inovação, globalização e harmonização desse setor, destacando-se, ainda, a importância da atividade do CIB, *International Council for Research and Innovation in Building and Construction*, desde 1953, em particular da sua comissão W60 - *Performance Concept in Buildings*, criada em 1970.

A palavra desempenho encontra-se, também, associada ao termo comportamento do produto, entendido como desempenho em serviço ao longo do tempo (HERMANS, 1995; CIB, 1975). Fechando o pensamento, a avaliação do desempenho de um material, elemento ou sistema de construção é realizada em função das exigências de desempenho pré-estabelecidas, por intermédio da definição de requisitos mínimos a cumprir ou de limites máximos para as condições de funcionamento (FOLIENSTE *et al.*, 1998).

A ASTM E 632-82: 1996 define a durabilidade como a capacidade de um produto, componente, montagem ou construção em manter-se em serviço ou utilização ou, ainda, a capacidade desses em desempenharem as funções para os quais foram projetados durante determinado período. A durabilidade pode ser expressa em função do tempo em vida ou em função da capacidade de resistência a agentes que levam o edifício à deterioração, estando ligada à agressividade do meio ambiente, às propriedades dos elementos e dos seus componentes e à interação entre esses ao longo do tempo.

A durabilidade não é uma característica específica do elemento, produto ou material, mas a capacidade de manter adequados os níveis de desempenho durante a vida útil (BSI, 2003). Como requisitos de durabilidade, o edifício deve manter a capacidade funcional durante a vida útil prevista em projeto sem os sinais de desgaste, desde que realizadas as intervenções periódicas de manutenção e conservação (ABNT NBR 15575: 2013).

De acordo com a ISO 15686-1: 2000, vida útil é o período de tempo após finalização da construção ao qual o edifício ou seus elementos igualam ou ultrapassam os requisitos de desempenho. Além desse termo, na ISO 15686-1: 2000 estão especificados seis tipos de vidas úteis dos edifícios, que dependem do tipo de avaliação que é feito e dos objetivos da análise (RUDBECK, 1999), nomeadamente: vida de projeto, vida econômica, vida funcional, vida social e legal, vida técnica e vida tecnológica. Por fim, a vida útil dos edifícios e dos seus sistemas é entendida como o período de tempo durante o qual os mesmos mantêm o desempenho esperado, quando submetidos apenas às atividades de manutenção pré-definidas em projeto (ABNT NBR 15575: 2013).

As fachadas de um edifício estão sujeitas a diversas solicitações inerentes à sua função. Este sistema conforma a imagem do edifício inserido na paisagem e no espaço urbano, delimitando o espaço interno e protegendo os usuários e os ambientes internos das ações dos agentes de

deterioração, tendo-se, como exemplo, os elementos do clima (vento, chuva, insolação, umidade, entre outros). Esse sistema é fundamental por contribuir com o desempenho do edifício que está exposto aos processos de degradação, deterioração e danos que se manifestarão em decorrência dos fatores intrínsecos e extrínsecos.

Dorfman e Petrucci (1989) afirmam que a queda do desempenho funcional de uma fachada pelo surgimento de uma manifestação patológica soma um prejuízo de natureza estética, representado pela deterioração visual da edificação. Pela natureza das fachadas, os autores afirmam, ainda, que as partes constituintes apresentam uma grande incidência de manifestações patológicas.

Por Flores-Colen (2009), a avaliação do desempenho em serviço de fachadas é o processo que permite estimar a capacidade que cada elemento constituinte tem em responder às funções para as quais foi concebido, durante o período de vida útil. Neste sentido, faz-se necessário avaliar o comportamento de cada elemento constituinte e, posteriormente, analisar de forma global a fachada. Um dos aspectos que corroboram com os valores reduzidos de vida útil é devido ao sistema fachada ser constituído por vários elementos e, porque não afirmar também, que vários desses elementos possuem características e propriedades diferentes. Pela autora, esses fatores associados irão exigir diferentes ações de manutenção periódica para garantir o bom desempenho global durante o seu ciclo de vida.

O estudo sistêmico dos danos ou manifestações patológicas em fachadas baseado em mapas de identificação de problemas e, conseqüentemente, na suposição das causas e compreensão dos mecanismos, favorece a elaboração de ferramentas ou instrumentos preditivos ou corretivos, ou, em outras palavras, as ações de manutenção ou recuperação do invólucro do edifício.

A preocupação com o sistema fachada é relevante, pois a estética exterior da arquitetura define o aspecto visual de um edifício e parte do entorno físico e histórico em que está inserido. A sua integridade diz respeito à permanência do edifício que, para ser vivido, necessita cumprir o tempo previsto para a sua duração sem perdas funcionais ou estéticas (CARRIÓ, 1985).

Neste propósito, pesquisas têm-se estendido a compreender desde os fatores que influenciam para o surgimento dos danos em fachadas, sejam por agentes climáticos ou em decorrência das

solicitações dos seus sistemas, até métodos capazes de mensurar a vida útil dos sistemas de revestimentos (PETRUCCI, 2000; FLORES-COLEN, 2009).

Alguns desses trabalhos apoiam-se metodologicamente na criação de mapas de danos para fachadas, por meio da inspeção visual, seguida da quantificação de manifestações patológicas globais do elemento considerado. Para alcançar resultados, Gaspar (2009) afirma que se faz necessária a descrição detalhada dos danos nos diferentes mecanismos, causas prováveis e métodos de mensuração para cada tipo de anomalia do invólucro de edifícios.

2.2 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO

A finalidade das técnicas de inspeção é a determinação das falhas, anomalias ou manifestações patológicas consequentes do uso, operação ou manutenção que possam afetar algum dos aspectos relevantes à vida útil de uma edificação (GOMIDE *et al.*, 2006). A Norma de Inspeção Predial Nacional do IBAPE (2012) define inspeção predial como a vistoria da edificação para avaliar suas condições técnicas, funcionais e de conservação, objetivando orientar as atividades de manutenção.

Em trabalho realizado em Portugal, Flores-Colen (2009) aponta que as técnicas de inspeção de edificações podem possuir, prioritariamente, métodos experimentais e empíricos de inspeção. A autora mencionada descreve um terceiro método, dito como teórico de inspeção, que tende a permitir uma análise completa da combinação de fatores relevantes e a simulação de vários cenários, como o apoiado por programas de modelação numérica.

2.2.1 Métodos experimentais de inspeção

Os métodos experimentais de inspeção caracterizam-se por incluir vários tipos de ensaios e seus respectivos empregos de equipamentos e instrumentos, e podem ser diferenciados em ensaios *in situ* e ensaios em laboratório.

2.2.1.1 Ensaios *in situ*

De acordo com Flores-Colen e colaboradores (2006), os ensaios *in situ* auxiliam no diagnóstico em termos de degradação, mas limitam-se por não estabelecer, em muitos casos, relações diretas com os requisitos mínimos de desempenho.

Os ensaios *in situ* constituem um importante meio auxiliar para a inspeção visual, permitindo uma melhor caracterização de: mecanismos de degradação presentes em paramentos, variações das propriedades dos materiais relacionadas diretamente com o desempenho, das condições *in situ* e outros, reduzindo a subjetividade das inspeções visuais, assim como avaliar as efetivas necessidades de manutenção. Porém, Flores-Colen (2009) afirma que esses ensaios apresentam algumas condições particulares, visto que:

- aumentam o tempo de inspeção e produzem resultados confusos e de difícil interpretação;
- possuem limitações, dependendo da técnica utilizada. Por vezes, a pouca precisão da técnica utilizada permite apenas uma análise qualitativa. São poucas e normalmente onerosas as técnicas de ensaio *in-situ* que permitem informação confiável, de carácter quantitativo, para qualquer grau de degradação (BRANCO; BRITO, 2005). No entanto, a utilização conjunta de várias técnicas de ensaio pode facilitar a interpretação dos resultados e minimiza as limitações referidas.

As técnicas para ensaios *in situ*, de acordo com Flores-Colen *et al.* (2006), podem ser baseadas em: procedimentos normalizados e critérios de avaliação consensuais no meio técnico, procedimentos técnicos de apoio à sua aplicação, procedimentos normalizados no diagnóstico em serviço de elementos de construção e procedimentos que são referidos somente em manuais de equipamentos.

Os ensaios *in situ* podem ser classificados de acordo com características específicas, citando-se: o grau de destruição da técnica aplicada, os princípios em que se baseiam e os objetivos principais.

2.2.1.2 Ensaios em laboratórios

Os ensaios em laboratório podem ter dois objetivos: caracterização dos materiais e elementos, e estudo da variação das características ao longo do tempo por meio de ensaios de

envelhecimento acelerado. Nesta abrangência, os ensaios são aplicados em corpos de prova, modelos reduzidos ou em escala real (FLORES-COLEN *et al.*, 2006).

As amostras recolhidas em serviço permitem obter informações sobre parâmetros, importantes para o desempenho e que não podem ser analisadas diretamente pelas técnicas de ensaio *in situ*. A escolha do ensaio a ser aplicado nas amostras obtidas e o número de amostras depende do tipo de análise e dos recursos técnicos e econômicos necessários. Entretanto, a obtenção de amostras tem algumas limitações, pois possui caráter intrusivo. Em determinadas investigações, não se é capaz de garantir uma representatividade por quantidade significativa de amostras e, dessa forma, é o cruzamento de informações entre a inspeção visual e as técnicas de ensaio *in situ* que permitem a escolha da localização, do número e da dimensão das amostras a serem recolhidas.

De acordo com Valença (2011), para os ensaios laboratoriais há certas limitações para caracterização do padrão de fissuração, pois a velocidade dos ensaios é incompatível com a medição da abertura das fissuras, quando se utiliza a lupa de aumento graduada ou com o fissurômetro e, também, pelo instante de formação das fissuras e a sua evolução. O autor relata que a maioria dos métodos tradicionais para caracterizar e monitorizar fissuras é lenta e subjetiva porque depende fortemente da formação e experiência do técnico, podendo os resultados não serem totalmente confiáveis.

2.2.2 Métodos empíricos de inspeção

Conforme definido por Flores-Colen (2009), as inspeções possuem a finalidade de verificar o surgimento de anomalias, assim como o comportamento em serviço em condições de severa exposição ou mesmo após intervenções ou de examinar eventuais não funcionalidades e o envelhecimento dos elementos.

Os métodos empíricos de inspeção são baseados em experiências adquiridas sobre determinado comportamento em serviço e são fundamentados, exclusivamente, na inspeção visual com auxílio de dados históricos sobre manutenções anteriores, entrevistas com usuários e outras informações que venham a trazer subsídios relevantes à compreensão dos problemas encontrados.

Flores-Colen (2009) destaca que a inspeção visual é uma das atividades mais antigas do setor industrial, cabendo mencionar que talvez em referência às técnicas de inspeção e é o primeiro ensaio não destrutivo aplicado em qualquer tipo de peça ou componente. Segundo Bertrand e colaboradores (2003), essa técnica é o primeiro passo para a avaliação contínua em edifícios, pois permite que decisões sejam tomadas quanto à necessidade de procedimentos de intervenções em fase de uso. Este tipo de método de verificação caracteriza-se pelo empirismo, pelas experiências adquiridas sobre comportamento e pela coleta de informações em serviço.

Valença (2011) relata que as inspeções visuais na engenharia civil têm um papel cada vez mais significativo e por esse motivo os processos de levantamento de anomalias e do estado de conservação das edificações recorrem a representações detalhadas. Conforme o autor citado, o emprego de imagens no passado servia para auxiliar e documentar as inspeções visuais e que, atualmente, o objetivo dos registros fotográficos não se pode limitar à documentação e arquivo do estado dos edifícios, pois a elevada qualidade das câmaras fotográficas digitais disponíveis no mercado a baixo custo, associada à existência de poderosas ferramentas de cálculo, possibilitaram o desenvolvimento de novos métodos, assim como a aplicação de ferramentas de processamento de imagem existentes, ao serviço da Engenharia Civil e de outras áreas.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas possui documento normativo direcionado à manutenção das edificações, intitulado ABNT NBR 5674: 2012. Este documento não discorre sobre a avaliação técnica qualitativa da manutenção e sua aplicação direta na gestão do patrimônio. O Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia (IBAPE) criou a Norma de Inspeção Predial Nacional (2012), que classifica não conformidades constatadas na edificação quanto à origem e grau de risco, indicando orientações técnicas necessárias para a melhoria da manutenção dos elementos e sistemas construtivos.

Entretanto, estes aspectos não são relacionados diretamente aos eventuais danos que possam ser encontrados em edifícios, ficando, por exemplo, subjetivo ao profissional responsável pela inspeção avaliar o grau de risco ao qual se encontra a edificação. Outro aspecto importante é que a norma trata da inspeção da edificação como um todo, não apresentando como a inspeção deve ser realizada em função de seus subsistemas: fundação, estrutura, fachada e outros.

A norma americana ASTM E2270: 2005, *Standard Practice for Periodic Inspection of Building Facades for Unsafe Conditions*, descreve os requisitos e procedimentos para a realização de

inspeção em fachadas. A norma citada descreve que as inspeções em fachadas podem ser de dois tipos:

- inspeções gerais ou correntes: observação visual dos elementos a partir de uma distância igual ou maior que 1,80 m, com ou sem meios auxiliares de ampliação ótica;
- inspeções detalhadas: observação visual a menos de 1,80 m da fachada com avaliação tátil dos elementos da fachada, incluindo a coleta de amostras ou ensaios não destrutivos.

Em pesquisa desenvolvida em Portugal, Flores-Colen (2009) afirma que a metodologia de avaliações *in-situ* de fachadas são baseadas, essencialmente, em inspeções exclusivamente por observação visual de anomalias de vários elementos da fachada e confirma que as inspeções visuais permitiram a aquisição do conhecimento sobre o comportamento em serviço por meio da identificação das anomalias e suas possíveis causas. Por outro lado, o tipo de avaliação *in-situ* tem algumas limitações, destacando-se:

- a) a subjetividade da avaliação, que depende da experiência do inspetor;
- b) as informações do edifício e intervenções anteriores, que podem ser escassas;
- c) a ausência de meios de acesso permanentes no edifício, conduzindo a inspeções da fachada à longa distância ou a partir do pavimento térreo (FLORES-COLEN *et al.*, 2008).

Este tipo de inspeção possui suas limitações porque, em alguns casos, as edificações podem possuir peculiaridades que dificultam o acesso ou alturas consideráveis, dificultando a visualização de todas as suas partes, como, por exemplo, os edifícios multipavimentos. Isso se deve, usualmente, porque as inspeções visuais são geralmente realizadas no nível do piso térreo. Conforme Flores-Colen (2009), as inspeções apresentam as seguintes vantagens:

- a) o baixo custo quando comparadas à rapidez da execução;
- b) a não utilização de equipamentos complexos ou onerosos, assim como de outros meios complementares de diagnóstico (ensaio *in situ*, ensaios em laboratórios, etc.);
- c) o aspecto de permitir avaliar a necessidade de recorrer a testes complementares.

Barthel e colaboradores (2009) afirmam que é necessário que sejam investigadas as causas das manifestações patológicas para que se evite a repetição dos futuros erros, assim como, também, realizar as etapas de manutenção e recuperação de sistemas. Para Flores-Colen (2009), antes da

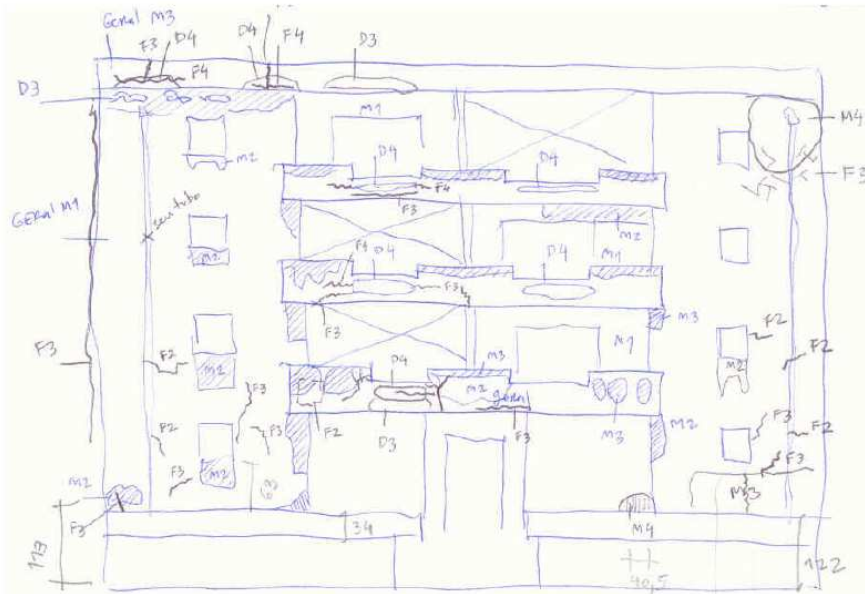
realização da inspeção deve ser realizado um levantamento dos elementos que caracterizem o edifício, relatórios de anomalias e intervenções, uma vez que a análise prévia permite direcionar e preparar a inspeção a ser realizada. A subjetividade, mencionada anteriormente, aparecerá neste instante e será determinada pela capacidade do profissional em diagnosticar, que também estará voltada à sua formação técnica, experiência para distinguir e validar-se de informações realmente relevantes.

Flores-Colen (2009) ressalta que existe outro aspecto importante, que está relacionado à vantagem em se proceder, para cada tipo de situação, a implementação de procedimentos que normalizem a forma de inspecionar as construções e, por fim, reduzir a subjetividade associada ao fator humano, conduzindo a diagnósticos otimistas, que podem ser prejudiciais à segurança dos usuários ou pessimistas, que podem conduzir ao desperdício de recursos econômicos.

A inspeção visual é etapa preponderante para mapeamento de danos em fachadas, apoiando-se sobre instrumentos que possam auxiliar no trabalho de campo, como: representação em desenho das fachadas a serem vistoriadas; instrumentos de auxílio para visualização (binóculos, lupas, dentre outros); e equipamentos de registros (máquinas fotográficas). A quantificação dos danos deve ser realizada junto à caracterização e comentários pertinentes aos mesmos, e identificados nas representações das fachadas.

Em pesquisa realizada por Gaspar (2009), a fase de levantamento dos danos, dentre outras, envolveu a técnica de desenho à mão para representar as anomalias em fachadas. Por meio de esboços esquemáticos, vantagens adicionais do uso da técnica são apontadas pelo autor, como: maior capacidade do inspetor em memorizar o estudo de caso, facilidade em inserir comentários sobre o edifício e os danos no desenho esquemático e organização prévia antes do início dos registros fotográficos (Figura 8).

Figura 8 - Exemplo de desenho esquemático com indicações escritas complementares



Fonte: Gaspar (2009).

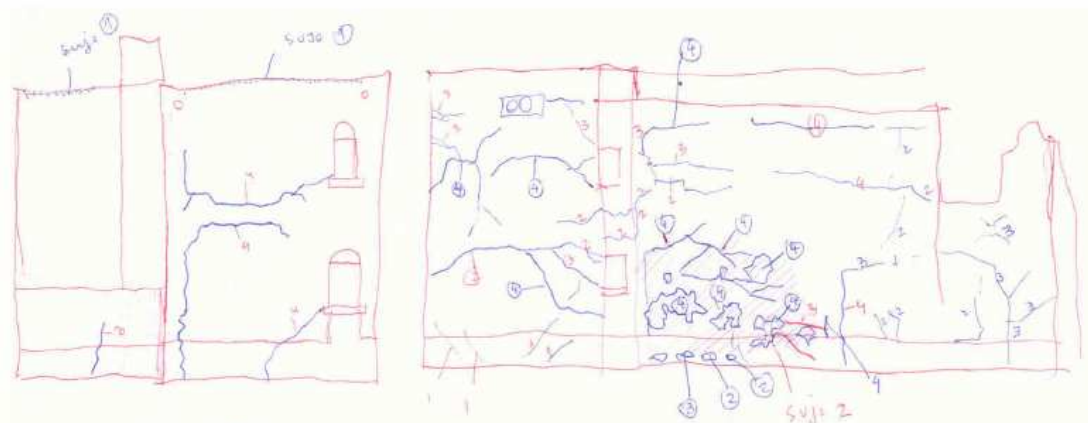
A tentativa é bastante válida na intenção de acelerar a etapa de inspeção, porque em alguns casos não se possui, no instante da atividade, a representação em planta para fazer a reprodução dos danos de forma esquemática, apesar da possibilidade de realizar registros fotográficos. Para determinados danos, como as fissuras, especificar quanto à extensão da abertura por meio de comentários escritos o nível de degradação, assim como, para outras manifestações patológicas, o uso de desenhos à mão livre torna-se imprescindível para a inspeção. Em contrapartida, as etapas posteriores (construção de mapa de danos) necessitarão da presença ou auxílio dos responsáveis pela inspeção para interpretação dos apontamentos por causa da qualidade da representação e da falta de padrão gráfico, pois, como é visto na representação da Figura 9 e Figura 10, há uma variação na forma de representação vista na simbologia das fissuras.

Figura 9 - Registro fotográfico de anomalias em fachadas; Para determinadas ocorrências de fissuras (menores aberturas) e em distâncias específicas, a técnica mostrou-se pouco eficiente



Fonte: Gaspar (2009).

Figura 10 - Registro desenhado das anomalias em fachadas, correspondente à Figura 9; Registros de fissuras em função da localização, extensão, configuração, padrão e abertura



Fonte: Gaspar (2009).

Apesar de todas as tentativas e avanços voltados à inspeção de fachadas de edifícios, percebe-se alguns limites decorrentes de especificidades das edificações e técnicas de levantamentos dos danos. As técnicas mencionadas apresentariam, quando empregadas, algumas limitações para os edifícios multipavimentos, pois como as inspeções são realizadas, em muitos casos, no nível térreo, registrar as anomalias presentes nos últimos pavimentos é quase que uma tarefa impossível sem o uso de equipamentos ou instrumentos de auxílio. Outro aspecto é o fato de que a precisão alcançada por representações realizadas em desenho à mão livre não é grande, necessitando de registros fotográficos e, talvez, de procedimentos de representação gráfica por meio de programas CAD ou similares para os objetivos almejados.

2.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM FACHADAS DETECTÁVEIS POR INSPEÇÃO VISUAL

Conforme Flores-Colen (2009), os conceitos de degradação, vida útil, manutenção, custos globais e níveis de desempenho ou, respectivamente, perda de desempenho, duração do ciclo de vida, diversos tipos de ações, custos envolvidos e nível de desempenho aceitável para um determinado instante, encontram-se diretamente associados e são cruciais para caracterizar o desempenho em serviço do edifício e seus elementos.

Necessariamente, deve ser levado em consideração que as condições de exposição são determinantes para o surgimento de manifestações patológicas em fachadas e que estas podem variar para um mesmo componente devido às condições climáticas e até pelas condições de uso (LERSCH, 2003). O autor citado ainda enfatiza que se deve observar que a importância dos

fatores varia de acordo com o material, características e propriedades intrínsecas, bem como a função que desempenha. Considera ainda que os diversos tipos de danos dificilmente apresentam uma única causa, e é geralmente o resultado da associação e da inter-relação existente entre diversos fatores que promovem a manifestação patológica.

Conforme dito por Valença (2011), antes de definir a intervenção a ser realizada numa edificação, torna-se necessário obter informações sobre os danos do edifício, assim como conhecer o sistema construtivo e os materiais empregados na sua construção.

A inspeção visual insere-se no levantamento de informações sobre a edificação e o estado de conservação por meio de vistoria. Existem danos que podem ser avaliados e detectados por inspeção visual e outros que necessitam de outras medidas investigativas, como a extração e análise de testemunhos, que também são tidas como ensaios destrutivos.

Das anomalias que são representativas quanto ao surgimento em fachadas de edifícios detectáveis por inspeção visual, destacam-se: as fissuras; as manchas, que podem ser decorrentes de vários fatores ou mecanismos de deterioração; e os destacamentos de revestimento cerâmico e em reboco, dentre uma gama maior de incidências de danos possíveis.

O levantamento da presença de fissuras em fachadas é realizado visualmente, podendo-se utilizar instrumentos de apoio. De acordo com Gaspar (2009), para que se possa realizar a localização e identificação das fissuras, os instrumentos ou equipamentos adequados são: binóculos, lupa ou luneta, fissurômetro, fissurômetro elétrico e ultrassom, e para verificar quanto ao parâmetro de abertura, os instrumentos ou equipamentos são: régua graduada, lupa ou luneta, fissurômetro, extensímetro, fissurômetro elétrico e paquímetro. Ainda há outros parâmetros importantes também para identificação, registro e monitoramento, como: profundidade, impermeabilização, detecção de movimento, identificação de ações mecânicas e resistência superficial.

Valença (2011) destaca que, na generalidade dos casos, as fissuras são sintomas visíveis da ocorrência de falhas, abordando o problema em relação ao seu estudo (danos em estruturas) e que o padrão de fissuração registra-se usualmente por meio de esquemas desenhados à mão *in situ*, isto é, com base em inspeções visuais e desenhos feitos posteriormente a partir da observação de imagens fotográficas. Para a medição da abertura de fissuras é utilizado

habitualmente o fissurômetro, que consiste em uma régua com linhas que aumentam gradualmente de abertura e que serve como referência para comparação com a fissura e obtenção estimada da abertura.

Por ser mais perceptível que a presença de fissuras, Gaspar (2009) afirma que a inspeção visual das anomalias por manchas, geralmente, é realizada ao nível do piso térreo, usando-se, ou não, de binóculos. A inspeção visual é a técnica eficiente e simples para o levantamento também das manifestações patológicas decorrentes de destacamento de revestimentos, sejam cerâmico ou em reboco, pois a ocorrência desses problemas torna-se visível facilmente pela diferenciação do revestimento de acabamento. Para a inspeção técnica, Flores-Colen e colaboradores (2005) apresenta uma metodologia detalhada para fachadas, que inclui os seguintes pontos:

- registro da localização das manchas e sempre que possível com recurso de fotografias das áreas afetadas;
- quantificação da áreas afetadas;
- quantificação da condição (estado de degradação) da área afetada;
- avaliação da evolução no tempo da anomalia e identificação de outras anomalias relacionadas com o problema em análise;
- utilização de técnicas de diagnóstico complementares (*in-situ* ou em laboratório) sempre que necessário;
- diagnóstico da situação, incluindo a escolha da estratégia de intervenção de acordo com os seguintes critérios: exigências a satisfazer; urgência de intervenção; efeitos da não intervenção; avaliação da vida útil remanescente; e custo das ações de reparação;
- intervenção e relatório final.

Contudo, conforme Gaspar (2009), a inspeção visual das anomalias causadas por manchas deve ser precedida também por um trabalho preparatório baseado em informações relativas ao contexto da obra, como condições em serviço, registo de reclamações, recolha de elementos de projeto, relatórios de intervenções, entre outras fontes e essas etapas são importantes para a correta caracterização do problema, a avaliação das possíveis causas, dado que muitos problemas decorrem, por exemplo, de roturas em canalizações e do entupimento de tubos ou de erros de projeto devido à ausência de pingadeiras, rufos e capeamentos, entre outros, e avaliar a necessidade de recorrer a testes complementares.

Por fim, tem-se a consciência da obviedade quanto aos resultados que se pode chegar com a inspeção visual para detecção dos danos citados anteriormente. No entanto, realizar as inspeções está além do simples fato de observar e apontar, pois inspecionar está relacionado intimamente com a compreensão dos fenômenos envolvidos no processo de perda de desempenho de edifícios, indicando quais elementos, regiões ou sistemas estão mais suscetíveis à deterioração e as respectivas análises quantitativas e qualitativas.

Nos próximos subitens, serão apresentadas as principais manifestações patológicas detectáveis por inspeção visual sem a pretensão de esgotar os temas abordados, porém sem classificá-las quanto ao tipo de revestimento, seja este acabamento em pintura, cerâmico, em pedras naturais ou em concreto aparente.



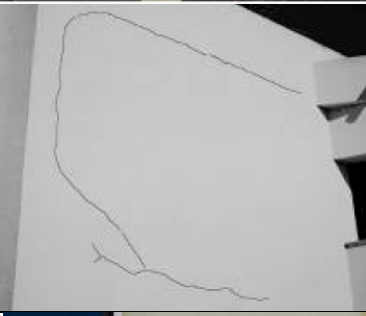


2.3.1 Fissuras

As fissuras são ocasionadas pelo surgimento de tensões que ultrapassam os limites de resistência dos materiais, ocasionadas por alterações dimensionais, deslocamentos ou variações de volumes em partes ou sistemas da edificação. Abrangentemente, as tensões podem surgir devido à: variação térmica, variação higroscópica, ação de cargas, ação da deformação excessiva da estrutura, recalque de fundação, retração de produtos a base de cimento e alteração química de materiais empregados na construção.

Gaspar (2009) explica o fenômeno de fissuração contribui também para a diminuição da durabilidade das construções por causa de fenômenos envolvidos, como a penetração de umidade, agravando e acelerando também o aparecimento de outros problemas, citando-se a corrosão de armaduras. A presença de fissuras pode resultar na perda de isolamento térmico e sonoro. O autor referido acima ressalta que a fissura tanto pode ser o resultado de uma causa, como a origem de outras anomalias, isto é, a fissuração é simultaneamente causa e fonte de anomalias na construção.

No Quadro 1, são ilustrados alguns tipos de fissuras com a descrição e as respectivas possíveis causas.

Quadro 1 - Tipos de fissuras e causas da fissuração

Ilustração	Descrição	Causas
	Fissura mapeada	Retração da argamassa ou absorção excessiva de umidade pela base.
	Fissura de topo	Variação volumétrica da laje de cobertura em função da temperatura.
	Fissura de transição entre sistemas	Comportamento diferencial do suporte, variação de temperatura em paredes ou deformação da estrutura.
	Fissura diagonal próxima a vãos	Concentração de tensões ou ausência de vergas ou contra-vergas.
	Fissura diagonal	Recalque diferencial de fundação.

Fonte: adaptado de Flores-Colen (2009).

Flores-Colen (2009) ressalta que estas anomalias podem não apresentar risco ou perigo para a segurança dos usuários e é uma consequência “natural” do comportamento em serviço dos edifícios, porém contribui gradativamente para a diminuição do desempenho ao longo do tempo

por permitir a penetração de agentes de degradação, como a água. As fissuras nas fachadas podem tanto ocorrer isoladamente sobre os elementos estruturais (pilares e vigas) ou de vedação (alvenaria), quanto simultaneamente entre estes sistemas, ou seja, transpassar de um sistema ao outro sobre o revestimento (argamassado ou cerâmico).

Para as fachadas de edifícios em concreto aparente e armado, o aparecimento de fissuras também pode decorrer da formação dos produtos da corrosão do aço (óxidos e hidróxidos de ferro) que, por ocuparem um volume superior ao volume original das armaduras, geram tensões internas, sujeitando o concreto a altas tensões de tração. As tensões ocasionam a fissuração e, posteriormente, o destacamento de camadas de cobertura do concreto.

Dentre as causas do fenômeno de corrosão de armaduras em elementos de concreto podem ser citadas: a penetração de íons de cloro (contaminação por cloretos), a carbonatação e a ação da umidade.

A contaminação do concreto por cloreto pode ser causada pelo emprego de aditivos à base de cloretos em concretos, penetração de cloretos presentes no meio ambiente (regiões próximas ao mar) ou, ainda, água contaminada com HCL (ácido muriático) utilizado em operações de limpeza. A carbonatação ocorre pela penetração de dióxido de carbono na rede de poros do concreto, que ao reagir com constituintes alcalinos da pasta de cimento, principalmente o hidróxido de cálcio, provocam a despassivação das armaduras, isto é, a capacidade de proteção do aço contra a corrosão. Em ambos os casos a presença de umidade provocará o desenvolvimento da corrosão das armaduras.

A ação de umidade pode ocorrer de duas maneiras: primeiramente pela penetração através das fissuras já existentes, assim como por nichos ou juntas de concretagem e outros, ou pela elevada porosidade do concreto e que, após ocasionar a corrosão das armaduras, levará à fissuração do concreto. Esta fissuração proporciona maior velocidade do processo de corrosão. A corrosão manifestar-se-á na superfície por meio de manchas marrom-avermelhadas ou esverdeadas dos produtos de corrosão.

Mehta e Monteiro (2008) destacam que outros fatores podem levar também à fissuração do concreto endurecido também por reações químicas que envolvem a formação de produtos

expansivos e aumento de tensões internas, em que são citadas: o ataque por sulfato, reação álcali-agregado, hidratação tardia de CaO e MgO livres, dentre outros.

Gaspar e colaboradores (2006) propuseram uma escala de classificação de nível de severidades das fissuras tanto quantitativa e qualitativamente para realização de trabalhos em campo, como ilustrado no Quadro 2. Parte da literatura considera fissuras e trincas como sinônimos, porém, alguns autores consideram fissuras aquelas com até 1 mm de abertura e acima deste valor pode ser denominada de trinca (SABBATINI, 1984).

Quadro 2 - Níveis de severidade da fissuração (função da abertura)

0	1	2	3	4
≤ 0,1 mm	0,1 a 0,25 mm	0,25 a 1,0 mm	1,0 a 2,0 mm	≥ 2,0 mm
Fio de cabelo	Limiar da visibilidade	Visível, localizada. Não visível em fotografias (exceto em detalhes de pormenor)	Bem definida. Tenuamente visível em fotografia a 3 m da fachada. Pode estar acompanhada de mais anomalias	Efeitos estruturais. Facilmente visível em fotografia
Microfissuras	Fissuras	Fissuras	Trincas	Trincas

Fonte: Gaspar e colaboradores (2006).

Para que trabalhos possam ser realizados com o objetivo de reestabelecer ou elevar o nível de vida útil do sistema fachada, detectar, mapear e quantificar as fissuras são atividades essenciais para o acompanhamento e determinação das tarefas de recuperação. Enfatizando que os padrões de fissuração, ou melhor, o formato de como essa se apresenta na superfície, fornece informações quanto à causa da ocorrência, mapeá-las torna-se imprescindível para posterior diagnóstico do dano. Conforme citado por Valença (2011), este processo é registrado frequentemente por meio de esquemas desenhados à mão *in situ*, ou seja, com base em inspeções visuais ou por meio de desenhos *a posteriori*, baseando-se em imagens fotográficas.

2.3.2 Manchas

Gaspar (2009) afirma que a formação de manchas manifesta-se em decorrência de uma grande variedade de sintomas, até mesmo quando surgem de uma mesma causa. A incidência de manchas sobre os elementos externos de um edifício com qualquer tipo de acabamento influi fortemente na qualidade visual da superfície.

Santa-Rita (1999 *apud* GASPARELLO, 2009) afirma que as manchas podem ser o resultado de um ou mais defeitos no edifício (escorrimento preferencial em superfícies de umidade, ausência de pingadeiras em janelas e coroamento em platibandas) ou de manifestações decorrentes de outras

anomalias (eflorescência e crescimento de microrganismos). Vilhena (2003) afirma que a formação de manchas em edifícios recentes está associada na maioria dos casos à presença de umidade.

As principais causas do surgimento de manchas em fachadas podem ser descritas em:

- acumulação e deposição de sujidades (VALLEJO, 1990a; CHEW; TAN, 2003);
- crescimento de microrganismos (CARASEK, 2007; SHIRAKAWA, 2009);
- precipitação de carbonato de cálcio sobre a superfície (HENRIQUES, 1992);
- diferenças de tonalidade por ação do sol, agentes físico-químicos;
- ações de vandalismo pelo homem (pichação).

2.3.2.1 Manchas oriundas de sujidade

Vários aspectos estão envolvidos no processo de formação de manchas por sujidade, que envolvem desde os aspectos urbanos e ambientais até construtivos do edifício. Abrangidos no mecanismo, podem-se listar: poluentes atmosféricos, deposição de partículas, adesão das partículas contaminantes, material empregado no revestimento e elementos do clima (vento, temperatura, condensação e chuva) (CARRIÉ; MOREL, 1975; ROBINSON; BAKER, 1975; VALLEJO, 1990b; SABBATINI, 1990; PETRUCCI, 2000).

As sujidades ocorrem frequentemente em áreas urbanas e industriais pela deposição de partículas de fuligem e poeiras na superfície da fachada. Estas partículas têm origem na poluição atmosférica, nos solos ou em função de atividades humanas e são transportadas pelo vento. As manchas ocasionadas por material particulado em suspensão no ar podem ocorrer de forma uniforme por meio da deposição na fachada ou acentuada, quando esse material é arrastado pela ação da água da chuva ou outra fonte de umidade (Figura 11).

Figura 11 - Formação de sujidades em elementos ornamentais de fachada



Fonte: Melo Júnior (2010).

Outro fator de forte influente, é que a formação de sujidades está diretamente relacionada ao comportamento da fachada, ou melhor, de suas partes e seus componentes, frente à ação da chuva. As regiões dos pavimentos superiores de um edifício estão mais expostas à ação da chuva dirigida (associação da chuva ao vento), que tende a escorrer ao longo da fachada e de demais elementos, levando consigo o material particulado depositado sobre as superfícies, principalmente as horizontais, que favorecem a deposição: platibandas, peitoris de janelas, varandas, elementos salientes e reentrantes, dentre outros. Assim, quando o volume de água da chuva é superior à quantidade absorvida por capilaridade pelos poros dos materiais ou quando também estes estão saturados de umidade, são formadas lâminas de água que começam a seguir trajetórias descendentes preferenciais na fachada por ação da gravidade em direção aos níveis inferiores da edificação.

Importante destacar que a presença de água por umidade ou condensação permite uma maior adesão de sujeira. Sob a ação do escoamento dessas superfícies muito sujas ocorre o lavado sujo, onde a água arrasta grandes quantidades de partículas, redepositando-as em planos verticais e inclinados, ficando visível (ROBINSON; BAKER, 1975).

Como reforçado por Gaspar (2009), nota-se que a água ao percorrer caminhos preferenciais em função das particularidades da fachada acumula partículas que arrasta em suspensão ou, em certos casos, promovendo uma limpeza da superfície do paramento (lavado limpo)

(ROBINSON; BAKER, 1975). A ação do lavado ou a redução da aderência das partículas de sujidades de uma superfície irá acontecer somente na presença de um escoamento de intensidade suficiente para envolver todas as partículas. A umidade ou a presença de um filme insuficiente aumenta a aderência entre partículas e paramentos, fazendo com que as gotas de água ajam como ligantes por bipolaridade e forças moleculares (CARRIÉ; MOREL, 1975).

Concluindo o pensamento sobre o surgimento das manchas de sujidade, ressalta-se que na fase inicial o seu aparecimento afeta somente a qualidade visual da fachada pela perda do caráter estético, todavia a permanência no revestimento ao passar do tempo, e na presença de umidade, pode contribuir com o agravamento da própria e de outras anomalias, acelerando a degradação do material de revestimento, com a provável perda de suas propriedades. Segundo Norvaisiene e colaboradores (2003), a perda de desempenho ocorre, na maioria dos casos, por causa da degradação química, física e mecânica.

Em pesquisa apresentada por Melo Júnior e colaboradores (2011), foram encontrados microrganismos nas manchas ditas como sujidade, que podem ocorrer devido à concentração de umidade, características dos materiais de revestimento que são fonte de alimento para determinadas espécies de microrganismos, radiação solar, temperatura, dentre outros fatores.

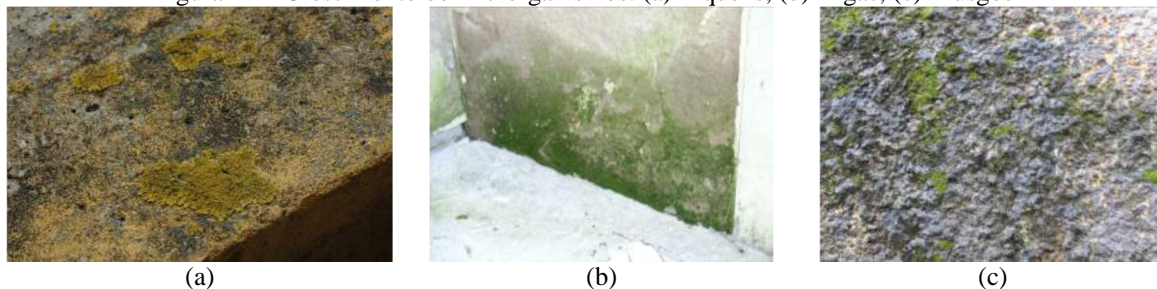
2.3.2.2 Manchas por crescimento de microrganismos

Alguns dos principais grupos de microrganismos citados em pesquisas que envolvem os mecanismos de degradação de edificações são: fungos; bactérias; algas e líquens.

Shirakawa e colaboradores (1995) afirmam que revestimentos inorgânicos são suscetíveis ao crescimento de fungos. Uemoto e colaboradores (1995) relatam que bactérias são muito encontradas em pinturas deterioradas e sobre as superfícies de concreto e argamassa podem ocorrer o desenvolvimento de bactérias nutrificantes cujos produtos metabolizados são agressivos ao cimento. Os autores ainda dizem que as algas, também conhecidas como cianobactérias, diferem de fungos e bactérias por não necessitarem dos constituintes dos revestimentos para obtenção do carbono para sua nutrição, no entanto, é indispensável a presença de luz para o crescimento das algas e, portanto, os ambientes externos favorecem ao seu desenvolvimento. Johansson e colaboradores (2005) afirmam que as fachadas, de maneira

geral, possuem substratos alcalinos, o que leva ao surgimento de líquenes adaptados a estas condições.

Figura 12 – Crescimento de microrganismos: (a) Líquens; (b) Algas; (c) Musgos



Fonte: Flores-Colen (2009).

De forma geral, os fatores abióticos devido aos aspectos físicos, químicos ou físico-químico do meio ambiente influenciarão no surgimento de danos em superfícies de edifícios, listando-os: luz, temperatura, umidade, vento, natureza da superfície, características físicas da superfície e seu pH, todos favoráveis ao crescimento de microrganismos.

Valença (2011) relata que o conceito de bioreceptividade está diretamente associado ao fenômeno de colonização biológica, que se refere à aptidão que os materiais possuem para serem colonizados por organismos vivos. O mesmo autor afirma que a quantificação das alterações biológicas torna-se importante no processo de avaliação do estado de conservação de estruturas.

Acredita-se que as manchas descritas como sujidades podem conter microrganismos e afirmar isoladamente que as sujidades são somente em decorrência do acúmulo de partículas de poluição pode ser um equívoco, haja vista alguns estudos apresentarem a presença de microrganismos nestas manchas (MELO JÚNIOR. *et al*, 2011). Às grandes distâncias, é mais difícil ainda determinar se algumas dessas manchas são devido ao crescimento microbiológico ou sujidade, porque alguns microrganismos têm coloração semelhante à sujidade. Nos resultados da tese, a fim de evitar equívocos, esses tipos de manchas a serem classificadas sobre as fachadas serão tratadas como manchas escuras, uma vez que os fenômenos podem estar associados. No entanto, alguns microrganismos são facilmente diferenciáveis das sujidades por causa de algumas das suas características, como a coloração esverdeada de algumas espécies de musgos e algas.

2.3.2.3 Manchas pelo fenômeno da termoforese

Este tipo de manifestação patológica é descrito por Logeais (1989) como fantômes (fantasmas), manchas que se formam desenhando as juntas de assentamento da alvenaria, nas diferenças entre elementos estruturais e nas situações de ponte térmica devida à termoforese, que é a diferença de temperatura superficial dos materiais que compõem o revestimento. A poeira deposita-se sobre as paredes com uma intensidade que é tanto maior quanto mais baixa for a temperatura da superfície da fachada.

Figura 13 - Manchas de fantômes na região da alvenaria de vedação



Fonte: Gaspar (2009).

Henriques (2002) dá outra explicação para o problema, colocando que corresponde a um fenômeno particular da presença de umidade na parede, sobretudo em situações de ausência ou insuficiência de isolamento térmico e quando são utilizados rebocos de reduzida espessura. As fachadas propícias ao fenômeno de termoforese são as que possuem menor temperatura pela manhã, pois favorecem a condensação e que, juntamente, não recebem suficientemente a radiação solar para favorecer a eliminação da umidade condensada.

Segundo Gaspar (2009), esta anomalia pode ser permanente ou verificada apenas em tempo de chuva.

2.3.2.4 Manchas por precipitação de eflorescência

Magalhães (2002) descreve a eflorescência como o resultado da migração para o exterior de água presente no interior dos elementos da construção, transportando consigo os sais solúveis presentes nos elementos da construção, ambiente ou solo (Figura 14). À medida que a água atravessa os poros do material e conforme se aproxima do exterior – em função das condições ambientais – dá-se a sua evaporação e a cristalização dos sais que transporta.

Figura 14 - Formação de eflorescência



Fonte: adaptado de Flores-Colen (2009).

A eflorescência, por vezes, manifesta-se pelo aparecimento de manchas com configurações variáveis e também em cor esbranquiçada e, a depender do tipo de acabamento superficial do edifício, com empolamento local da argamassa.

De acordo com Henriques (1992), localmente, a superfície pode apresentar-se coberta por flocos cristalinos de aspecto pulverulento e, com menor frequência, por películas de aspecto vítreo. Algumas vezes, as formas geométricas dos cristais assemelham-se a flores, daí a utilização da palavra florescência para designar qualquer tipo de cristalização de sais. Quando o fenômeno surge no interior do material, esse é denominado criptoflorescência.

As manchas de aparência esbranquiçada são, predominantemente, o resultado da reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono presente no ar e que se precipitam na superfície das fachadas em forma de carbonato de cálcio. Esse dano está, geralmente, associado à presença de fissuras nos componentes da edificação e, principalmente, fontes de umidade. Quanto ao aspecto visual do dano, a percepção será maior, quanto maior for o contraste entre o

revestimento e a aparência esbranquiçada do carbonato de cálcio, ou seja, as cores mais escuras dos revestimentos estarão mais suscetíveis ao diagnóstico (Figura 15).

Figura 15 – Manchas de eflorescência ocasionadas pela precipitação de sais



Fonte: (a) próprio autor; (b) Gaspar (2009).

2.3.2.5 Manchas por alteração cromática ou descoloração

Segundo Flores-Colen (2009), as alterações cromáticas ou descoloração são decorrentes da variação de cor devido à perda de brilho ou cor, ou seja, destruição total ou parcial da matéria corante sobre o acabamento das fachadas, como ilustrado na Figura 16.

Muitas destas manchas estão associadas à pintura, camada de proteção do reboco, mas existem soluções em que a pigmentação é dispersa na própria massa de acabamento e que, sobre a ação de radiação solar, umidade e outros agentes, estão suscetíveis ao processo de descoloração, perda de brilho, dentre outros aspectos. As variações de cor também podem ser ocasionadas por atividades de reparação em fachadas e que não se conseguiu obter a cor original (GASPAR, 2009).

Figura 16 – Alteração cromática sobre superfície de pintura



Fonte: Gaspar (2009).

2.3.3 Destacamento de revestimentos cerâmicos e em reboco

Para Silvestre e Brito (2011), destacamento é a anomalia que ocorre em placas de revestimentos cerâmicos, onde as placas não mais permanecem fixadas no sistema, afetando apenas a camada externa do sistema de revestimento. O destacamento ocorre sempre que a tensão atuante sobre o sistema supera a resistência de aderência entre as camadas. A Figura 17 apresenta a ilustração de uma fachada com destacamento de revestimento cerâmicos.

Figura 17 - Regiões da fachada com destacamento de revestimento cerâmico



Fonte: próprio autor.

O início do desenvolvimento desta manifestação patológica dá-se pela perda de aderência ou descolamento das placas cerâmicas do substrato ou da argamassa colante, quando as tensões no




revestimento cerâmico ultrapassam a capacidade de aderência das ligações entre a placa cerâmica e argamassa colante ou emboço (PADILHA JR. *et al.*, 2007). Neste primeiro momento, onde as placas ainda se encontram aderidas, a técnica de inspeção utilizada é a de percussão e o som cavo é o forte indício de falhas no sistema de revestimento.

Outro tipo de destacamento mencionado por Flores-Colen (2009) é referido às fachadas rebocadas com acabamento em pintura, onde a perda de aderência do reboco ao suporte ocorre pela perda de coesão do material constituinte do reboco. Essa anomalia, denominada também como perda de coesão, quando ocorrida, caracteriza o fim da vida útil do reboco, devido a:

- a) perda da função de proteção ao suporte, pois fica exposto às ações dos elementos do clima (chuva, vento, condensação e outros);
- b) eventual queda das partes do reboco com risco efetivo para a segurança e saúde dos usuários pela eventual queda de partes do reboco;
- c) perda da estética ou qualidade visual da fachada.

Finalizando o pensamento, Flores-Colen (2009) afirma que, diferentemente do que ocorre nos casos de fissuras e formação de manchas, os destacamentos ou as perdas de coesão de rebocos não ocorrem de forma isolada, mas também são resultantes do estado patológico, ou melhor, da combinação de anomalias e de agentes de deterioração. O Quadro 3 apresenta ilustrações de alguns tipos de destacamentos classificados por essa autora.

Quadro 3 - Ilustração de vários tipos de destacamento ou perda de coesão de rebocos de edifícios

Ilustração	Tipos de destacamento
	<p>Desprendimento: separação definitiva da argamassa em relação ao seu suporte por queda, provocando descontinuidades na superfície, que ocorre geralmente em rebocos fraturados ou descolados do suporte.</p>
	<p>Arenização ou desagregação granular: perda ou lavagem das partículas finas da argamassa caracterizada pelo fácil destaque de partículas de dimensão da areia mesmo com esforços mecânicos de fraca intensidade.</p>
	<p>Erosão: corresponde à perda localizada de massa de superfície do material por ação dos elementos do clima, podendo originar um efeito localizado de escavação da argamassa; este fenómeno, embora raro, registra-se no caso de argamassas antigas, muito espessas e com perda de ligante.</p>

Fonte: Flores-Colen (2009).

2.4 MAPA DE DANOS DE FACHADAS

Conforme citado por Tinoco (2009), mapa de danos é a representação gráfico-fotográfica, objetivando ilustrar e discriminar, rigorosamente, todas as manifestações de deterioração da edificação, sintetizando, deste modo, o resultado das investigações sobre as alterações de todos os sistemas e componentes do edifício. Enquanto o mesmo trata-se de documentos gráficos, o mapeamento de danos constitui os processos de investigação, levantamento e produção dos dados para a elaboração do mapa de danos.

Barthel e colaboradores (2009) definem este instrumento como a representação gráfica do levantamento dos danos identificados no edifício, relacionando-os com os possíveis agentes e causas, citando: fissura, degradação por umidade, destacamentos de revestimento, corrosão e outros.

Para Tirello e Correa (2012), estes mapas sintetizam informações do estado atual de conservação geral de um edifício por meio de representações das alterações sofridas pelos materiais e estruturas ao longo do tempo e que seu desenvolvimento é concretizado por meio do registro criterioso das alterações por meio de símbolos gráficos para representar os diversos tipos e níveis de degradação identificados.

Costa (2011a) enfatiza que o mapa de danos é um material ilustrativo contendo a representação dos componentes construtivos (parede, piso, esquadrias, telhado, etc.) e a deterioração manifestada, assim como as informações necessárias para embasar as atividades seguintes de intervenção e consolidação para os projetos de conservação e restauro. Para tanto, este tem como forma de apresentação a sobreposição de elementos gráficos, hachuras, fotografias, índices, cores, letras, e legendas contendo dados sobre a incidência dos danos no edifício e suas partes. Desta maneira, a identificação dos danos, geralmente, é apresentada em plantas ou elevações da edificação, estando os danos ou alterações representadas pelas: hachuras; cores; símbolos e números, de forma junta ou separada, sintetizando as informações relacionadas às características dos materiais, dos agentes e causas da degradação.

Os métodos de investigação do estado de conservação de uma edificação, classificados por Tinoco (2009), são:

- a) direto: onde por meio de explorações pelo contado e manipulação direta e pela elaboração de esboços e desenhos à mão livre;
- b) indireto: as investigações são realizadas de maneira analítica a partir da interpretação de documentos escritos, gráficos, iconográficos, testemunhos orais, emprego de tecnologias, instrumentação e outros;
- c) misto: a investigação é realizada com o emprego de recursos e tecnologias não destrutivas, garantindo a mínima invasão destrutiva dos elementos construtivos.

Barthel e colaboradores (2009) afirmam que o mapa de danos deverá conter a situação física, histórica e social do edifício, declaração de significância e a representação gráfica de seu estado de conservação, buscando trazer de forma correta a representação de suas patologias, causas, agentes e ações corretivas, a descrição dos métodos e equipamentos empregados na investigação, além das medidas corretivas e preventivas com base em fundamentação teórica e prática para as ações.

A não existência de um modelo para elaboração de mapas de danos é um aspecto que induz a sua criação, algumas vezes, de maneira equivocada ou incompleta, apesar da realização ser predominantemente representativa para as etapas posteriores: manutenção ou recuperação. Os trabalhos referenciando mapas de danos são elaborados de acordo com necessidades específicas dos objetos de estudo.

Tirello e Correa (2012) ressaltam ainda que, devida à falta de regras ou padrões de representação, há uma liberdade criativa na confecção de mapas de danos por diversos autores em suas tentativas em demonstrar os sistemas e suas avarias e por vezes os danos são apresentados graficamente por meio de manchas de cor (hachuras, por exemplo) em uma mesma superfície, tanto para o padrão de madeira em processo acentuado de decomposição, destacamento de revestimento em argamassa, descolorização de pinturas até a corrosão de peças metálicas, confusa e indiferentemente.

Por não existir este padrão de mapa de danos a ser seguido, Barthel e colaboradores (2009) são categóricos em afirmar que a elaboração deve seguir determinados cuidados que o direcionem à demonstração clara e compreensiva os danos em escala referente ao elemento em questão.

2.4.1 Tipologias de mapas de danos

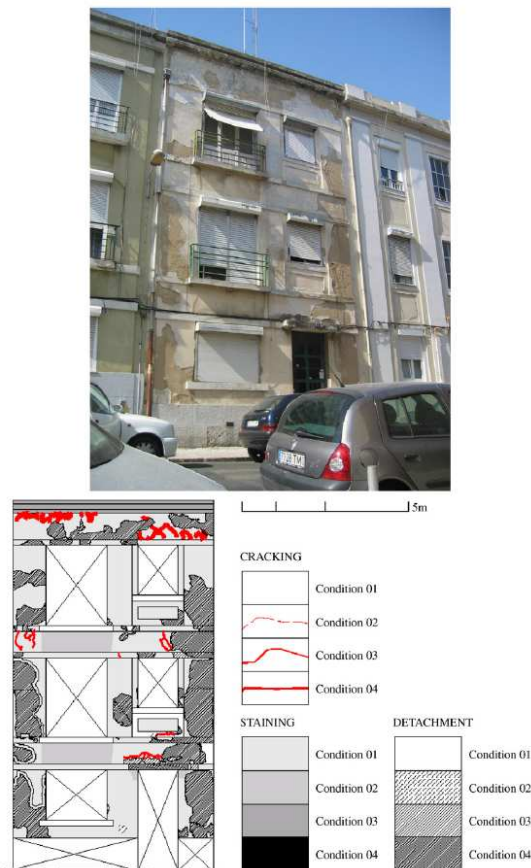
A tipologia de mapas de danos é descrita como a linguagem gráfica utilizada para representar o dano encontrado, abrangendo várias formas de representação, dentre as quais têm-se as mais usuais: símbolos, linhas, manchas de cores, manchas de texturas, índices de letras ou números, fotografias, mapas com fichas técnicas, ortoimagens ou textos descritivos, além de poder-se associar mais de uma linguagem gráfica num mesmo mapa de dano (COSTA, 2010).

A forma de representação do dano estará intimamente relacionada com vários aspectos, ou melhor, a maneira de representá-lo no mapa após a inspeção e a detecção pode ser direcionada pelo tipo de manifestação patológica (fissura ou mancha) ou pela forma da representação da edificação (fotografia ou representação gráfica de fachada).

Gaspar e Brito (2008), nas pesquisas desenvolvidas em Lisboa – Portugal, criaram mapas de danos de 19 fachadas, elaborados para avaliar os efeitos ambientais no surgimento de

manifestações patológicas, em que as fissuras foram representadas por meio de linhas e as manchas e destacamento de revestimentos representados com hachuras.

Figura 18 – Estudo de Caso 27



Fonte: Gaspar e Brito (2008).

2.4.2 Representação de mapa de danos

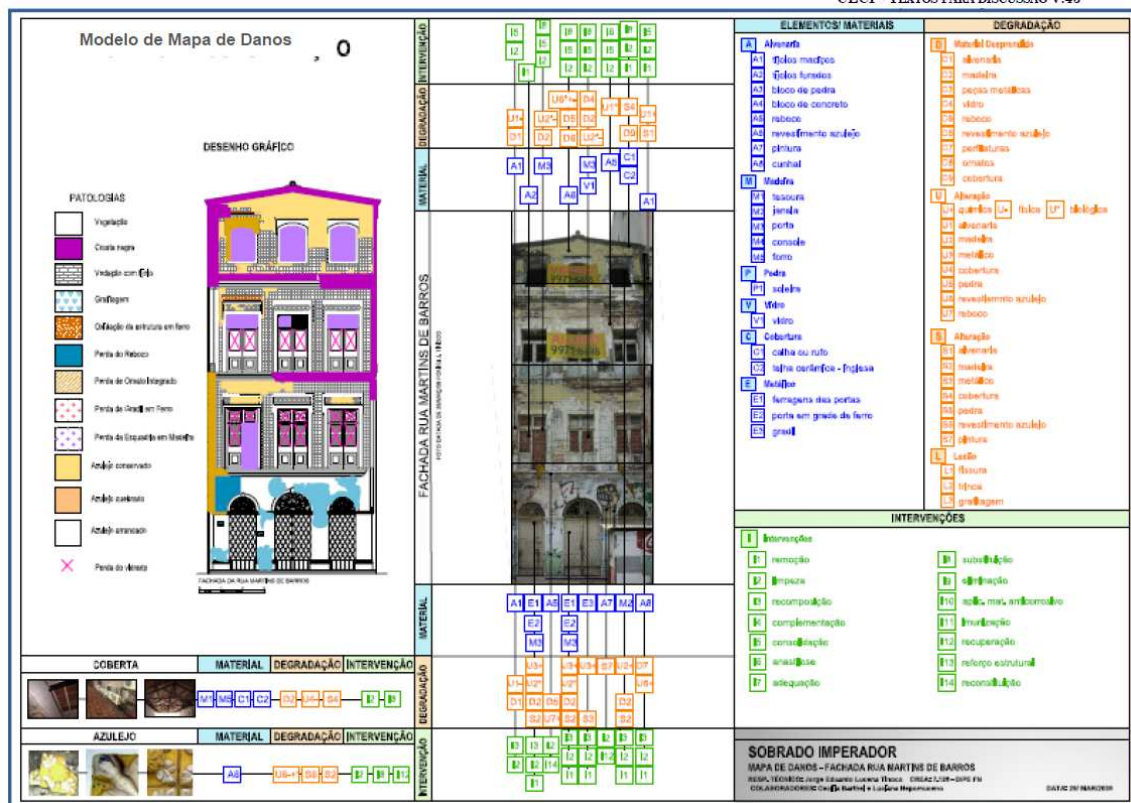
Primeiramente, é necessário afirmar que o mapa de danos não explicita exclusivamente a representação gráfica das condições atuais quanto ao surgimento das manifestações patológicas, mas, conforme Barthel e colaboradores (2009), traduz o registro evolutivo do estado de conservação e, principalmente, que tão importante quanto às informações que estão expostas no mapa, é a forma como estão apresentadas.

Baseado nesta última afirmação, os autores confirmam que alguns aspectos são indispensáveis para sua eficácia como representação por meio de imagens, legibilidade e acessibilidade. Neste sentido, o mapa de danos deve ser compreendido por todos profissionais envolvidos no processo de intervenção, inclusive aqueles não familiarizados com a linguagem técnica e torna-se uma atividade ainda mais complexa por não haver um padrão predeterminado para as representações

dos danos, estando esta tarefa de representar aos cuidados do profissional e sua capacidade em utilizar-se do bom senso.

Tinoco (2009) ressalva que os mapas de danos devem possuir valor cognitivo, possuindo informações claras e objetivas, não se limitando ao aspecto técnico da comunicação visual e à quantidade de informações. O autor discerne que a objetividade e a clareza devem ser alcançadas pela qualidade contrapondo-se à necessidade de redução e disponibilização das informações indispensáveis à comunicação visual dos danos e de suas respectivas resoluções (Figura 19).

Figura 19 - Modelo de mapa de danos



Fonte: Tinoco (2009).

No trabalho desenvolvido por Barthel e colaboradores (2009), foi realizado um mapeamento que resultou no mapa de danos em fachada de sobrado tombado pelo IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional) na cidade de Recife, em região remanescente da ocupação urbana no período holandês, no bairro de Santo Antônio. A metodologia utilizada na identificação dos danos foi a inspeção visual e de contato por experiência. Houve uma

subdivisão generalizada dos elementos e materiais construtivos, referenciando, para cada parte do sistema, a problemática e criação de um quadro com os principais danos (Figura 20).

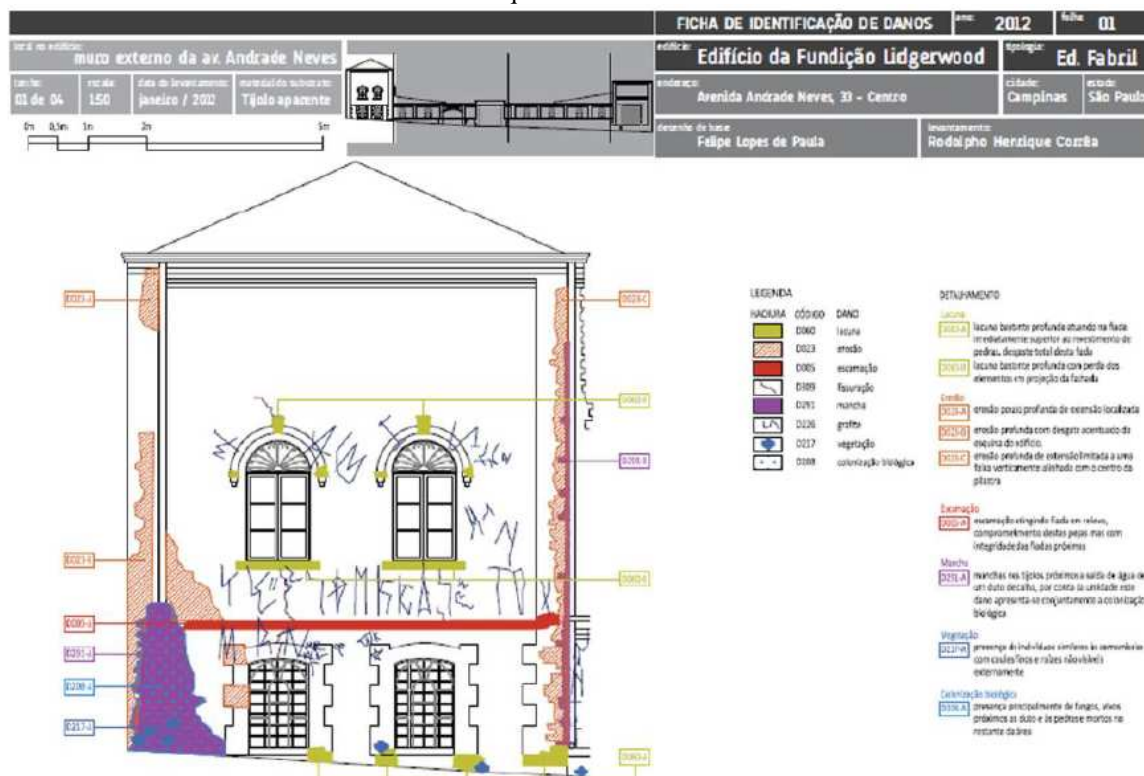
Figura 20 - Mapa de identificação de danos



Fonte: Barthel e colaboradores (2009).

Como resultado final dos registros das informações coletadas sobre os danos, Tirello e Correa (2012) apresentam as Fichas de Identificação de Danos, contendo, na escala 1:50, as informações sobre o estado de conservação de fachadas de edifícios estudados. As fichas reúnem informação sobre os danos identificados sobre o desenho de elevação da fachada, assim como no trabalho realizado por Barthel e colaboradores (2009) (Figura 21).

Figura 21 - Ficha de identificação de danos elaborada por Rodolpho Henrique Correa, 2011; Arquivo Gcor-Arquitetura UNICAMP



Fonte: Barthel e colaboradores, 2009.

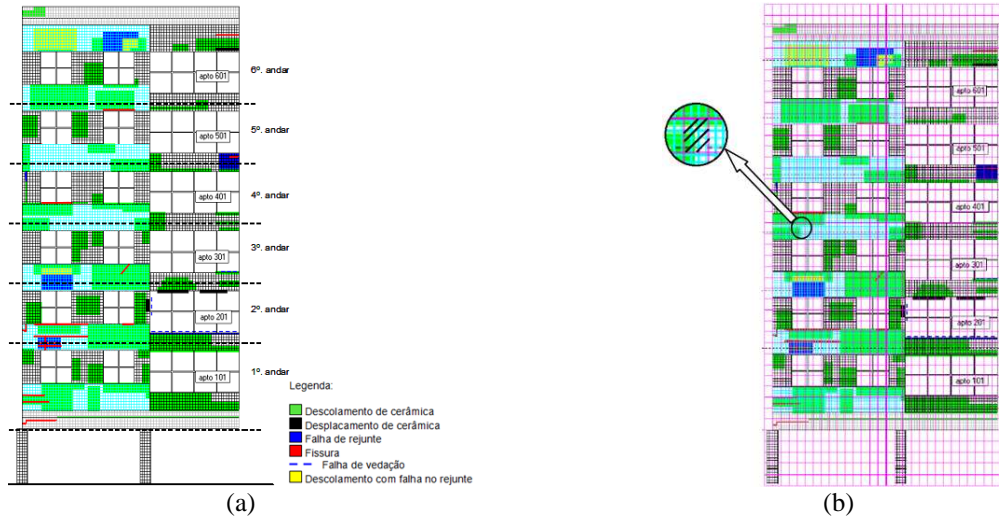
Neste mapa de danos, cada manifestação patológica é identificada por código e identificação sequencial de letras (A, B, C...) que se relaciona com determinada área ou subárea afetada pelo dano, explicando detalhadamente e com maior precisão os tipos e graus de deterioração e suas possíveis causas.

Com o intuito de elaborar uma padronização de mapa de danos para utilização em trabalhos de conservação e restauração, Costa (2011a) desenvolveu a base de dados denominada Cronidas. Padronizar torna-se importante devido às inúmeras formas de apresentar informações graficamente e percebe-se pelos estudos apresentados anteriormente que as possibilidades de apresentação são variadas, dificultando a compreensão das informações e possibilitando interpretações imprecisas. A facilidade da compreensão ou leitura do mapa de danos é condicionada pela praticidade em avaliar corretamente as informações e dados apresentados.

Com o objetivo de sistematizar a influência dos principais fatores de degradação, quantificando a incidência de danos e propondo uma modelação de vida útil, respectivamente, Antunes (2010) e Silva (2014) adotaram um método muito eficiente para quantificação dos danos em fachadas.

O método consistiu em criar uma malha quadrada sobre uma fotografia da fachada e, dessa maneira, quantificar a incidência das manifestações patológicas (Figura 22).

Figura 22 – (a) Esquema de mapeamento de danos; (b) Sobreposição de malha nos mapeamentos das fachadas analisadas com detalhe de uma unidade de área de dano



Fonte: Silva (2014).

Costa (2014) aplicou um método para identificar, mapear e quantificar manifestações patológicas em fachadas. O método baseou-se em imagens panorâmicas de alta resolução retificadas, geradas por mosaicos de fotos individuais. Segundo Costa (2014), o mapeamento dos danos foi feito ao mesmo tempo da identificação e o mapeamento foi realizado manualmente por meio do programa ArcGIS, criando-se polígonos em torno de cada dano identificado. Destaca-se que as fotografias utilizadas neste método são obtidas de um único ponto fixo, sem a necessidade de deslocamento e que elementos sobressalentes ao plano principal da fachada podem obstruir a visualização de outras partes da fachada devido ao tipo de projeção da câmera: cônica ou central.

Figura 23 - Mapa dos danos em imagem panorâmica da etapa 1 da fachada Leste da torre do Anexo I da Câmara dos Deputados



Fonte: Costa (2014).

Os trabalhos realizados pelo método de vetorização interativa em programas CAD, assim como outros tipos de programa, algumas vezes são descritos como um processo lento e suscetível à habilidade e subjetividade humana (GROETELAARS, 2015).

2.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CAPÍTULO 2

O Capítulo 2 apresentou de maneira abrangente uma contextualização sobre desempenho, durabilidade e vida útil, enfatizando também o desempenho de fachadas. Além disso, destacou a importância das inspeções para o levantamento das manifestações patológicas em fachadas e da criação de mapas de danos.

Apesar da relevância, os métodos utilizados para o levantamento de danos em fachadas ainda apresentam algumas limitações por várias razões, tais como: dificuldade de acessos a edifícios altos, processos morosos e algumas técnicas pouco precisas quanto à quantificação e representação dos problemas.

A fotogrametria digital aparece como um método promissor de levantamento das formas de edificações e, principalmente, da representação do seu estado como encontrado (*as found*), isso porque os modelos geométricos gerados são a partir de fotografias do edifício, contendo, assim, informações referentes aos danos que possam existir.

Neste intuito, o Capítulo 3 apresenta os vários aspectos que envolvem a fotogrametria digital, mais especificamente a obtenção de modelos DSM (*Dense Stereo Matching*), captura de imagens e o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) como ferramenta de trabalho.

3 FOTOGRAMETRIA DIGITAL

Neste capítulo, serão apresentados, dentre vários outros subitens, a definição, a classificação, as fases e os princípios da Fotogrametria e, posteriormente, será dada ênfase aos aspectos gerais que envolvem a fotogrametria digital, haja vista a importância para o embasamento científico do presente trabalho. De maneira introdutória e sucinta, a fotogrametria, de acordo com Luhmann e colaboradores (2006), abrange os métodos de medição e interpretação de imagens com a finalidade de obtenção da forma ou localização de um objeto a partir de uma ou mais fotografias do mesmo. Dentre os aspectos a serem destacados, faz-se importante inferir que na primeira fase de desenvolvimento a restituição fotogramétrica era realizada utilizando-se métodos gráficos com base na geometria projetiva, até alcançar, atualmente, a fotogrametria digital.

3.1 FOTOGRAMETRIA

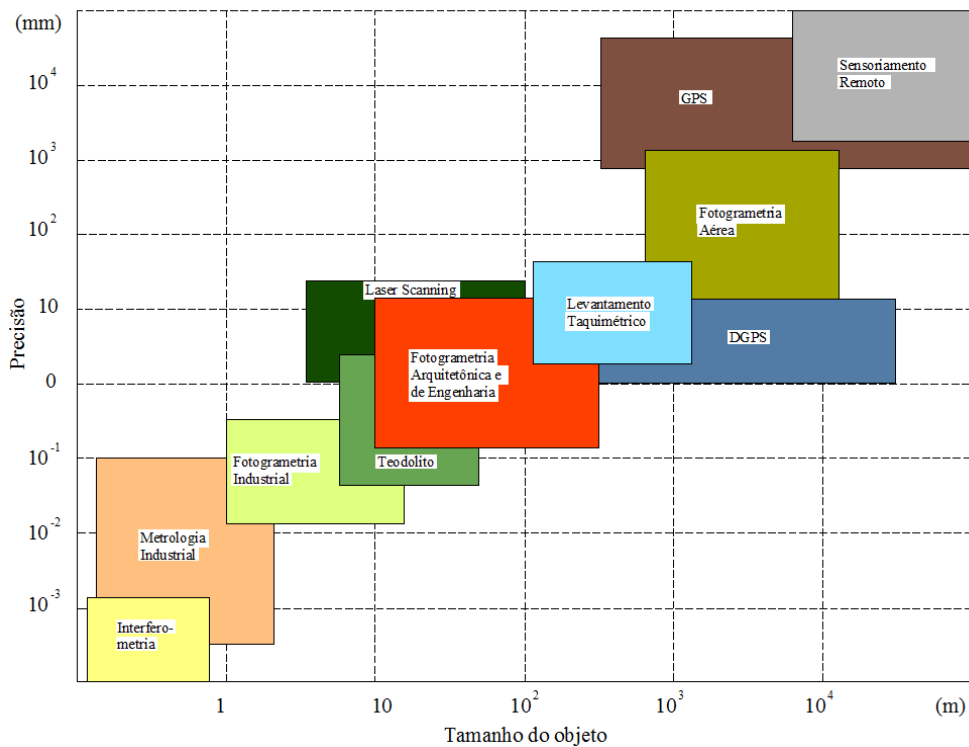
A palavra fotogrametria é originada de três palavras gregas: *photos*, *gramma* e *metron*, respectivamente, luz, descrição e medida (GROETELAARS, 2004). A *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS), antiga *American Society of Photogrammetry* (ASP), define a fotogrametria como a arte, a ciência e a tecnologia de obterem-se informações confiáveis de objetos físicos, ambientes urbanos e geografias terrestres por meio do processo de registro, medição e interpretação de imagens fotográficas e de padrões de energia radiante eletromagnética e outros fenômenos.

Coelho e Brito (2007) definem a fotogrametria como a ciência e tecnologia de se reconstituir o espaço tridimensional ou parte do mesmo (espaço-objeto) a partir de imagens bidimensionais (espaço-imagem) advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas (espaço-imagem) sem o contato físico direto com o objeto ou alvo de interesse. Pelos autores, trata-se de uma transformação entre sistemas: de um sistema bidimensional, chamado de sistema fotográfico, para um sistema tridimensional que representa o próprio espaço-objeto. Ainda pelos autores, mas de maneira mais sucinta, a fotogrametria é a ciência e a tecnologia de se obter informações confiáveis através de imagens adquiridas por sensores.

O processo de restituição fotogramétrica significa a reconstituição das formas, dimensões e demais características no espaço tridimensional do objeto real pela utilização das imagens fotográficas (AMORIM, 2012).

Luhmann e colaboradores (2006) apresenta em sua ilustração um indicativo da relação existente entre dimensão da medida do objeto, exatidão da medida requerida e tecnologia empregada para obtenção das dimensões. Pelo gráfico proposto da Figura 24, pode-se inferir que a fotogrametria é aplicada a objetos que variam de 1 a 200 metros, em dimensão, com precisão variando entre 0,1 mm (fotogrametria Industrial) a 1 cm (fotogrametria Arquitetônica e de Engenharia).

Figura 24 - Relação entre tamanho do objeto e precisão por diferentes métodos de medição



Fonte: Luhmann e colaboradores (2006).

Yilmaz e colaboradores (2007) afirmam que edificações podem ser precisamente mensuradas pela fotogrametria a partir das técnicas fotogramétricas, de forma fácil e segura. Koatz e Segre (2010) afirmam que os métodos fotogramétricos possuem grande potencial na apresentação de detalhes e características da edificação com medidas precisas. No trabalho realizado por Groetelaars (2004), foi calculado o erro entre a medição direta e a obtida pela ortoimagem de uma fachada obtida pelo processamento manual, chegando-se ao valor de 1,7% e considerado pela autora um bom resultado.

Em princípio e na atual fase alcançada pela fotogrametria, os métodos fotogramétricos podem ser aplicados em qualquer situação em que o objeto de interesse possa ser registrado fotograficamente e um dos objetivos principais e de maior relevância das medições fotogramétricas são as reconstruções tridimensionais de um objeto, hoje em dia em formato digital.

3.1.1 Fases evolutivas da fotogrametria

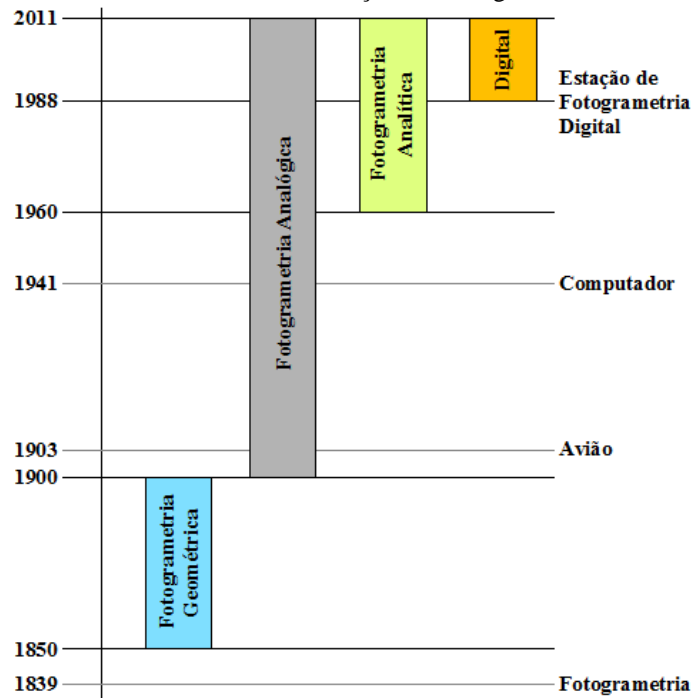
Antes da fase Digital, será apresentado um breve panorama sobre a linha evolutiva e algumas características particulares de cada fase da fotogrametria.

Historicamente, a fotogrametria divide-se em 4 fases voltadas ao processo de desenvolvimento e aprimoramento da técnica que, de certa maneira, acompanharam os avanços tecnológicos e científicos no decorrer do tempo, apresentando-se em:

- surgimento da fotogrametria;
- fotogrametria analógica;
- fotogrametria analítica;
- fotogrametria digital

Schenk (2005) apresenta as fases da fotogrametria na Figura 25, desde a origem até a fotogrametria digital, em função do tempo. Nesta figura, o autor demonstra que as fotogrametrias analógica, analítica e digital são utilizadas até os tempos atuais, porém o que se percebe na prática é a utilização mais frequente da fotogrametria digital por vários fatores que se tornarão mais compreensíveis no transcorrer desse capítulo.

Figura 25 - Fases do desenvolvimento da fotogrametria, como resultado das inovações tecnológicas



Fonte: Schenk (2005).

Outro aspecto importante da Figura 25 é quanto à data inicial da fotogrametria geométrica proposta por Schenk (2005), haja vista essa ser a mesma do início formal da fotogrametria, como descrita por Groetelaars (2004). Alguns autores, como Ribeiro (2002), descrevem a Fotogrametria Geométrica como a parte que trata dos aspectos geométricos do uso de fotografias com a finalidade de obter os valores aproximados de comprimentos e alturas e as formas, desconsiderando o princípio da orientação das fotos e que, em alguns casos, permite o uso de apenas uma foto.

Entretanto, embora o método fotogramétrico utilize fotografias para efetuar as medições, o conceito foi desenvolvido muitos séculos antes da invenção da câmera fotográfica, em que, já em 1480, Leonardo da Vinci descrevia a perspectiva como a visão de um objeto através de uma lâmina de vidro, lisa e transparente, cuja todas as superfícies visíveis por trás desse vidro pudessem ser marcadas.

Conforme descrito por Morales e colaboradores (2002), o engenheiro militar francês Aimé Laussedat foi o pioneiro nas aplicações da fotografia para fins de levantamento de planos e, por essas iniciativas, é considerado o fundador da fotogrametria terrestre. Assim, a paternidade da fotogrametria moderna cabe a esse engenheiro, afirmativa que vários estudiosos concordam.

Considerada a segunda fase, a fotogrametria Analógica compreende o período, aproximadamente, de 1900 a 1960, impulsionada pela criação de aparelho ótico-mecânico ou estereocomparador pelo físico alemão Carl Pulfrich (AMORIM, 2012). Esse método baseia-se no uso da estereoscopia, relacionada à capacidade do sistema de visão humano (binocular) em perceber a profundidade quando se visualiza um mesmo ponto por meio de dois ângulos distintos (olho esquerdo e direito). Assim, o cérebro sobrepõe as duas imagens recebidas pela retina dos olhos do observador e gera a percepção do espaço tridimensional.

A invenção do aparelho estereocomparador é vista como um marco na primeira revolução da fotogrametria por causa da facilidade propiciada aos usuários nas atividades de restituição, onde os inúmeros cálculos matemáticos, até então necessários, foram substituídos pelo uso do aparelho ótico-mecânico (COELHO; BRITO, 2007).

A fotogrametria analítica é tida como a terceira fase evolutiva que se prolonga até quase final do século XX e baseia-se em métodos óticos e cálculos numéricos. O primeiro estudo sobre fotogrametria analítica foi desenvolvido por Helmut Schmidt em 1953, no laboratório de balística, em Aberdeen, Maryland – Estados Unidos. Por esses trabalhos, as bases da fotogrametria analítica foram estabelecidas, incluindo o tratamento matricial, as soluções por mínimos quadrados, a solução simultânea utilizando múltiplas imagens e uma análise completa de propagação de erros.

a invenção do computador nos anos 40 permitiu o processamento computacional de grandes cálculos matemáticos até então desempenhados pelos aparelhos mecânicos (Coelho; Brito, 2007).

Amorim (2012) relata que na fase anterior, a analógica, as correções da geometria e dimensões do objeto eram realizadas pelos equipamentos ótico-mecânicos e na fase analítica essas eram feitas por programas de computador, em que o modelo de restituição é predominantemente estereoscópico. Essa técnica ainda se utilizava de fotografias analógicas e dispositivos óticos de visualização, no qual o processamento dos dados era numérico e a saída gráfica era feita por *plotters*. Possibilitou-se uma redução dos custos, uma vez que empregava as câmeras semimétricas e não métricas, apesar de necessitar de instrumentos específicos (estereoplottadores analíticos) e de operadores altamente especializados (AMORIM, 2012; GROETELAARS, 2004).

A fotogrametria digital pode ser entendida como a mais nova fase de desenvolvimento da fotogrametria, que inclui o uso de imagens digitais ou imagens analógicas transformadas em imagens digitais por meio de *scanners*, bem como o uso de estações digitais fotogramétricas com a finalidade de realizar o processamento fotogramétrico e obter os produtos fotogramétricos (BALENOVIC *et al.*, 2011).

Devido a esses aspectos, faz-se importante destacar que o desenvolvimento dos sistemas de imagem e processamento digitais mudaram fundamentalmente os procedimentos fotogramétricos. Coelho e Brito (2007) relatam que a fotogrametria digital surgiu na década de 80, tendo como inovação da técnica o uso de imagens digitais como fonte primária de dados. Mas, somente a partir da década de 90 a técnica pôde ser utilizada extensivamente por causa do desenvolvimento de computadores com capacidade suficiente para o processamento interativo das imagens digitais.

A fotogrametria digital tem como particularidade os seguintes aspectos: a entrada de dados é feita por meio de imagem digital; o processamento é analítico, utilizando-se computadores; e a saída por meio de produtos digitais, diferentemente das fases Analógicas e Analíticas, como pode ser observado no Quadro 4, que demonstra os sistemas de entrada, processamento e saída para as respectivas fases da fotogrametria.

Quadro 4 - Histórico da fotogrametria

Fotogrametria	Entrada	Processamento	Saída
Analógica	Fotografia Analógica (em filme)	Analógico (ótico-mecânico)	Analógica (<i>scribes</i> ou fotolitos) no passado ou digital (CAD, por exemplo) no presente
Analítica	Fotografia Analógica (em filme)	Analítico (computacional)	Analógica (<i>scribes</i> ou fotolitos) no passado ou digital (CAD, por exemplo) no presente
Digital	Imagem digital (obtida de câmera digital, por exemplo) ou digitalizada (foto analógica submetida a um <i>scanner</i>)	Analítico (computacional)	Digital

Fonte: Coelho e Brito (2007) adaptado de Augusto (1999).

Luhmann e colaboradores (2006) afirmam que os sistemas digitais, uma vez que oferecem a automatização e os ciclos curtos de processamento, são essenciais para o emprego da fotogrametria nas aplicações complexas em tempo real, tais como, em particular, da metrologia

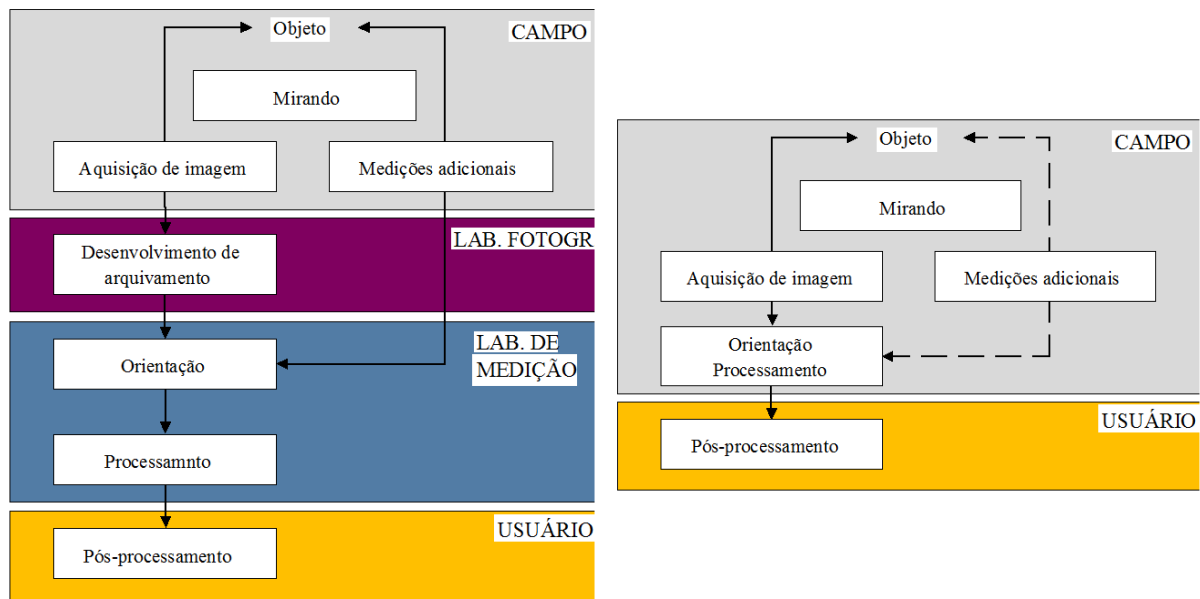
e robótica industrial. As decisões podem ser feitas diretamente na base de respostas (*feedback*) dos resultados fotogramétricos. Quando o resultado é entregue dentro de um determinado tempo específico do processo, o termo fotogrametria em tempo real é comumente usado.

A fotogrametria digital tem como precípua a simplificação dos processos devido ao alto grau de automação e a redução dos custos pela não necessidade de instrumentos fotogramétricos específicos de medição, já que foram substituídos por equipamentos de computação padrão. Salienta-se, porém, que existem diferentes custos que dependerão das diferentes soluções, aplicações e também da precisão desejada nos resultados (AMORIM, 2012).

Sobremaneira, a fotogrametria digital alcançou o estágio atual devido aos avanços sofridos no campo da computação, onde equipamentos (*hardware*) e programas (*software*) desenvolvidos, principalmente a partir da década de 80, favoreceram a utilização de imagens digitais. Porém, de acordo com Coelho e Brito (2007), o restante do processamento acontece de maneira semelhante à fotogrametria Analítica, e é possível, hoje em dia, a elaboração de produtos digitais que necessitam de processamento computacional extremamente elaborado, como as ortoimagens ou imagens ortorretificadas e os mosaicos digitais que consistem na junção de várias imagens. Para os autores, esses mosaicos são considerados não-controlados quando não há tratamento sobre as imagens, ou controlados, caso as imagens já sejam ortorretificadas.

Por meio da utilização de pontos do objeto adequadamente orientados e gravação das imagens em formato digital, tarefas complexas podem ser executadas em poucos instantes. A análise dos pontos visados pode ser realizada de forma completamente automática, substituindo, agora, os procedimentos manuais para orientação e medição. A Figura 26 apresenta aspectos referentes ao avanço alcançado pela fotogrametria digital em relação aos procedimentos (LUHMANN *et al.*, 2006).

Figura 26 – (a) Sistema fotogramétrico analógico. (b) Sistema fotogramétrico digital



Fonte: Luhmann e colaboradores (2006).

Na Figura 26, pode ser observada a eliminação de etapas anteriormente necessárias para o desenvolvimento e obtenção dos produtos fotogramétricos, empregadas, como exemplo, na fotogrametria analítica. A etapa referente aos serviços de laboratório fotográfico, por exemplo, necessária para geração das fotografias, é eliminada, pois já se é possível a transferência de imagens diretamente da câmera fotográfica digital para o computador.

São vários os aspectos que contribuíram para o rápido desenvolvimento fotogrametria digital, como apontado por Dowman (1996), destacando-se:

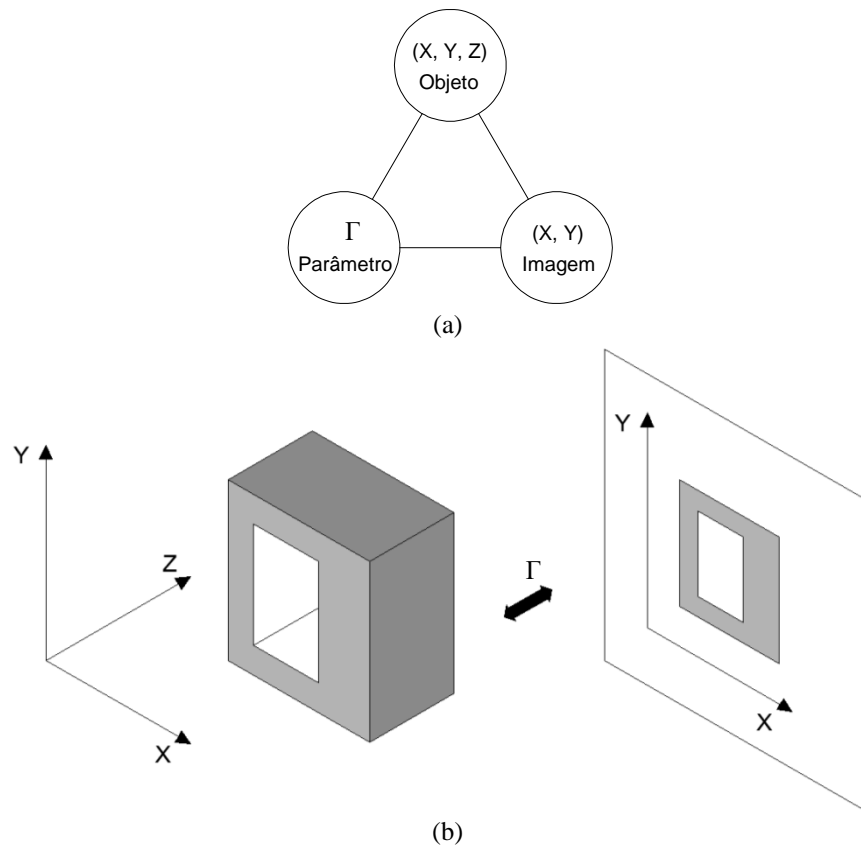
- a) a disponibilidade cada vez maior de imagens digitais a partir de sensores de satélites, câmeras digitais e *scanners*;
- b) a disponibilidade de poderosas estações de trabalho (computadores) com periféricos de alta tecnologia, inovadores e confiáveis;
- c) integração de todos os tipos de dados em um sistema de informação unificado e abrangente, como o SIG;
- d) aplicação em tempo real;
- e) aplicações em programas CAD e na indústria;
- f) carência de operadores de fotogrametria treinados e experientes e os altos custos dos instrumentos fotogramétricos anteriores à fotogrametria digital.

Por fim, de acordo com Coelho e Brito (2007), faz-se necessária a diferenciação entre fotogrametria digital e fotogrametria apoiada por computador ou fotogrametria com uso de computadores. Com o objetivo de não perder a experiência de anos de trabalho de operadores habilidosos e de aumentar a expectativa de vida dos ainda eficazes restituidores analógicos e analíticos, computadores foram ligados aos mesmos, possibilitando uma saída de dados digital, ou seja, em arquivos de computador, geralmente em formato compatível com os variados programas existentes de desenho assistido por computador (CAD). No entanto, os autores afirmam que estes aparelhos não podem ser relacionados à fotogrametria digital, uma vez que a entrada de dados ainda se dá de modo analógico (fotografias impressas), bem como o emprego do restituidor analítico que realiza todo o restante do processamento.

3.1.2 Princípios da fotogrametria

As grandezas que envolvem a fotogrametria são: as coordenadas do objeto que são em tridimensionais (X, Y, Z); as coordenadas da imagem, bidimensionais (X, Y); e os parâmetros de orientação (Γ). Além dessas grandezas descritas por Romeo (2002), o autor descreve a fotogrametria como o processo de relacionar o espaço-objeto com o espaço-imagem de maneira única e de modo a corresponder pontos discretos, adequadamente escolhidos, em ambos os sistemas de grandeza (Figura 27).

Figura 27 – (a) Os três grupos de grandeza; (b) Espaço-objeto (tridimensional) e a relação com o espaço-imagem



Fonte: (a) Romeo (2002). (b) Adaptado de Romeo (2002) e Groetelaars (2004).

Alguns conceitos ou termos são necessários para melhor compreensão da representação esquemática apresentada anteriormente, apesar de alguns já terem sido mencionados. Conforme Romeo (2002) e Coelho e Brito (2007), entende-se por:

- espaço-objeto: qualquer objeto a ser fotografado;
- espaço-imagem: conjunto não vazio de imagens bidimensionais;
- pontos discretos: pontos que são claramente identificáveis, tanto no objeto quanto na fotografia do objeto;
- parâmetros de orientação: aqueles que conduzem as relações entre o espaço-objeto e o espaço-imagem. Expressam as características do meio fotográfico e do seu posicionamento entre os dois espaços (objeto e imagem).

Além desses termos, Groetelaars (2004) cita em seu trabalho os pontos de controle, que são os pontos de precisão do objeto tridimensional obtidos em campo por aparelhos de medição, como: teodolito, taqueômetros, estações totais ou GPS (*Global Positioning System*).

De acordo com Coelho e Brito (2007), os pontos de controle são expressos no espaço-objeto e quando locados no espaço-imagem tem-se, assim, os parâmetros de entrada para a dedução da função que mapeia um sistema no outro. Ainda segundo o autor, quanto maior o número de pontos de controle, melhores são os resultados finais. No entanto, faz-se necessário verificar até onde é economicamente viável a obtenção de muitos pontos de controle.

Conforme Romeo (2002), no processo de levantamento fotogramétrico há três fases principais no qual as grandezas mencionadas estão relacionadas de forma diferente:

- a) fase de registro fotográfico: nesta fase são atribuídos dois grupos de parâmetros: o objeto tridimensional (X, Y, Z) e as informações da câmera (Γ), como posicionamento, orientação e tipo da câmera fotográfica;
- b) fase da orientação: embora definida na fase anterior, nesta fase são determinados os parâmetros de orientação e realiza-se por meio da correlação de pontos de controle obtidos em campo, com posições conhecidas nos dois espaços;
- c) fase da restituição: com os parâmetros de orientação agora conhecidos, o espaço-imagem (X, Y) pode ser transformado em espaço-objeto (X, Y, Z) e, desse modo, dar origem a um novo modelo geométrico, podendo-se obter informações quanto à forma, dimensão, posição e outras, do objeto fotografado.

Groetelaars (2004) relata que a relação geométrica entre imagem e o objeto pode ser classificada em três categorias: gráfica, usando relações geométricas; analógica, usando os componentes ótico-mecânicos; ou analítico e digital, onde o modelamento é numérico e o processamento é eletrônico-digital.

Como descrito por Mikhail e colaboradores (2001 *apud* GROETELAARS, 2004), a tarefa fundamental da fotogrametria é estabelecer a relação entre a imagem e o objeto na sua forma ou configuração real. Para tanto, alguns princípios são importantes para a obtenção dos produtos fotogramétricos, podendo-se citar: a estereoscopia, a paralaxe, a geometria epipolar, a escala e as equações de colinearidade.

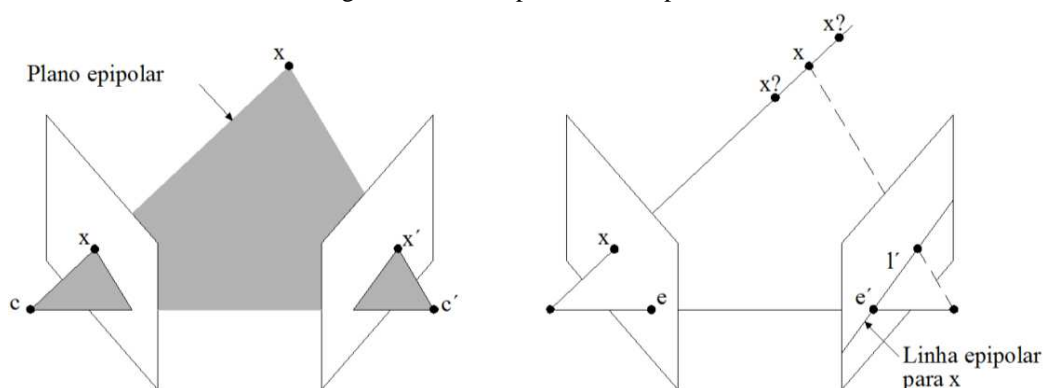
A estereoscopia está intimamente associada à fotogrametria, pois esta pode ser definida como a ciência e a arte que permite a visão estereoscópica ou a terceira dimensão, além de possibilitar o estudo dos métodos que tornam possíveis obterem-se os efeitos de tridimensionalidade. A

aplicação da estereoscopia em fotogrametria está no uso das fotografias em instrumentos óticos com a finalidade de observação e obtenção de medidas confiáveis de objetos (MARCHETTI; GARCIA, 1990). Resumidamente, a estereoscopia baseia-se na visão humana e o princípio da percepção da terceira dimensão, isto é, na capacidade do sistema visual humano perceber a profundidade quando visualizado um ponto a partir de dois pontos de observação distintos, no qual a distância entre esses é descrita como paralaxe.

A paralaxe estereoscópica, como também é denominada por Brito e Coelho (2007), é o deslocamento aparente de um referencial causado pela mudança do ponto de observação (TOMMASELLI, 1999). Devido à paralaxe, o cérebro é capaz de ter a noção de profundidade (COELHO; BRITO, 2007).

De acordo com Hartley e Zisserman (2004), a geometria epipolar entre duas vistas da mesma cena (a partir de dois centros projetivos distintos) é essencialmente a interseção de dois planos de imagens com feixe de planos que possuem como eixo a linha que une os centros óticos. Um ponto X no espaço tridimensional é registrado por duas imagens, com dois pontos correspondentes, x e x' , em cada plano da imagem da câmera (esquerda e direita). A relação desses dois pontos é dada pelo plano epipolar π em que os centros de projeções das câmeras C e C' , o ponto X no espaço 3D e os pontos x e x' nos planos da imagem são coplanares (Figura 28).

Figura 28 - Correspondência de pontos



Fonte: Hartley e Zisserman (2004).

Tratando-se de algoritmos de visão estéreo destinados à computação de correspondências de pontos, a geometria epipolar proporciona o benefício de que, dado um ponto x referente à primeira vista, a busca por pontos correspondentes na segunda vista não precisa cobrir toda a

imagem e restringe-se apenas a uma linha l' . Essa restrição também é conhecida na literatura como *epipolar constraints* (restrição epipolar).

As entidades geométricas relacionadas à geometria epipolar são:

- a) epipolo: ponto de interseção da linha de base com o plano da imagem ou o ponto de fuga da linha de base;
- b) linha epipolar: interseção de um plano epipolar com o plano da imagem;
- c) plano epipolar: plano que contém a linha de base.

Albertz e Wiedemann (1995) afirmam que as equações de colinearidade, Equações (1) e (2), descrevem o processo de formação da imagem em função dos parâmetros de orientação interior (distância focal f e coordenadas do ponto principal x_0, y_0) e informação da orientação exterior da imagem ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi$ e κ).

$$xi - x_0 = f \frac{a_{11}(xi - x_0) + a_{21}(yi - y_0) + a_{31}(zi - z_0)}{a_{13}(xi - x_0) + a_{23}(yi - y_0) + a_{33}(zi - z_0)} \quad (1)$$

$$yi - y_0 = f \frac{a_{12}(xi - x_0) + a_{22}(yi - y_0) + a_{32}(zi - z_0)}{a_{13}(xi - x_0) + a_{23}(yi - y_0) + a_{33}(zi - z_0)} \quad (2)$$

De acordo com Mikhail *et al.* (2001 *apud* GROETELAARS, 2004), as equações de colinearidade são a base do ajustamento de feixes perspectivos para diversos posicionamentos de câmeras, no qual o par de equações é escrito para cada ponto da fotografia em que se determina o ponto. Assim, para cada ponto que aparece em três fotografias, seis cálculos devem ser realizados. Essas equações são o método tradicional de resolver os problemas de resseção espacial e interseção.

3.1.3 Resseção, Interseção e Triangulação

O processamento fotogramétrico é baseado em três processos principais: a resseção, a interseção e a triangulação.

A resseção é o processo pelo qual a imagem é posicionada no espaço, ou seja, são determinados os parâmetros de posição e orientação das imagens no sistema de coordenadas espaço-objeto.

Segundo Groetelaars (2004), por meio das equações de colinearidade é possível determinar os seis elementos de orientação exterior de uma fotografia ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$) a partir de, no mínimo, três pontos de controle.

A interseção caracteriza-se pelo processo em que são determinadas coordenadas tridimensionais no sistema espaço–objeto de pontos em no mínimo um par de imagens sobrepostas. Por meio dos parâmetros de orientação exterior das duas fotografias obtidos na resseção e das mesmas equações de colinearidade, obtêm-se as coordenadas tridimensionais de cada ponto.

A triangulação associa simultaneamente os dois processos citados: resseção e interseção. Ajustamento de feixes perspectivos ou *bundle adjustment* como também é denominado, permite que, somente em uma operação, sejam obtidos a orientação das imagens e as coordenadas dos pontos identificados em várias imagens. O método por ajustamento é o único que pode ser considerado totalmente analítico e é utilizado pela maior parte dos restituidores analíticos e, inclusive, pelas soluções digitais atuais (COELHO; BRITO, 2007).

Szeliski (2010) afirma que a triangulação possui a função de determinar o posicionamento do ponto no espaço a partir de um conjunto de correspondentes regiões na imagem e o reconhecimento das posições das câmeras.

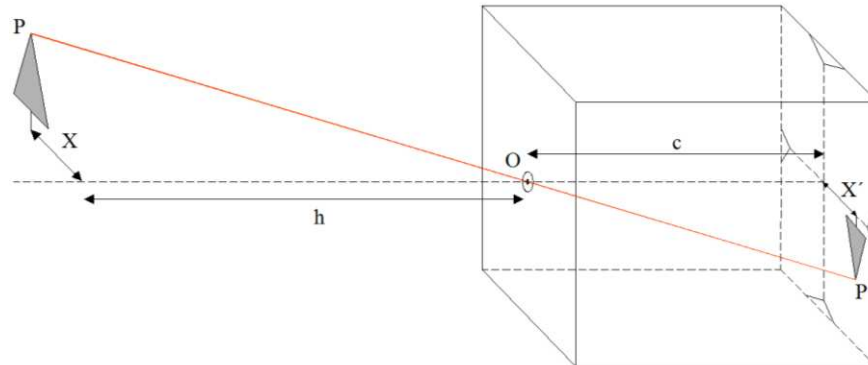
3.1.4 Orientação interna e externa

A orientação interna é definida, conforme Atkinson (2003), como o processo de reconstrução do sistema perspectivo da câmera quando as imagens são capturadas. A reconstrução é baseada na estimativa dos parâmetros internos que descrevem a geometria interna da câmera, que consiste em: distância focal (f), localização do ponto principal (PP), dimensões do sensor, distorções radiais e tangenciais. Os parâmetros de orientação interna são, geralmente, calculados por meio do procedimento de calibração da câmera.

De acordo com Luhmann *et al.* (2006) e em outras palavras, os parâmetros da orientação interna definem a posição do centro perspectivo O em relação ao sistema de referências fixado na câmera ou sistema de coordenadas da imagem, assim como os desvios da projeção central ou

distorção da imagem. O parâmetro mais importante da orientação interna é a distância c (Figura 29), a qual define a distância entre o plano da imagem e o centro perspectivo.

Figura 29 - Modelo de câmera *pinhole*



Fonte: Luhmann *et al.* (2006).

No que diz respeito à orientação externa, esta consiste em localizar o centro da perspectiva de cada feixe dos raios no sistema de coordenadas global da câmera fotográfica no momento da exposição. Este processo envolve, matematicamente, seis parâmetros: três representando a coordenada da posição espacial (X, Y, Z) e três que representam os ângulos de orientação do eixo (ω, φ, κ) (Atkinson, 2003).

De acordo com Luhmann e colaboradores (2006), os parâmetros de orientação externa especificam a posição e orientação espacial da câmera de um sistema de coordenadas global. A orientação externa é descrita pelas coordenadas do centro de perspectiva para o sistema global e três ângulos definidos apropriadamente expressam a rotação do sistema de coordenadas da imagem em relação ao sistema global. Esses parâmetros de orientação exterior são calculados indiretamente, depois de medir coordenadas de imagem de pontos do objeto bem identificados com as coordenadas globais fixas e conhecidas.

Em trabalho apresentado por Groetelaars e Amorim (2012), os autores conceituam a orientação externa relativa e absoluta, demonstrando suas particularidades no processo fotogramétrico digital:

- a) orientação externa relativa: procedimento que permite determinar as posições e orientações da câmera no momento do registro fotográfico e que pode ser realizado de forma interativa a partir da identificação de pontos homólogos nas diversas imagens ou

de forma automática, a partir da correspondência automática de feições do objeto fotografado;

- b) orientação externa absoluta: correção da escala do modelo para a escala natural e da rotação do modelo – eixos: X, Y e Z –, a partir de dimensões tomadas sobre o objeto real e dos eixos cartesianos do mesmo ou ainda por meio de coordenadas tridimensionais.

Andrade (2003) é mais sucinto nas definições e afirma que a orientação externa relativa tem por objetivo orientar em posição e atitude o par de fotografias entre si, sem referenciá-las quanto à posição terrestre e a orientação externa absoluta é o conjunto de procedimentos necessários para o modelo obtido em posição, escala e atitude corretos em relação ao referencial cartográfico.

3.1.5 Retificação de imagens

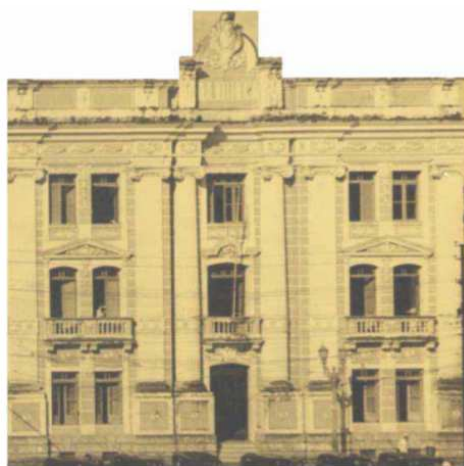
Os objetos representados em fotografias possuem naturalmente deformações que resultam da perspectiva. Alguns autores chamam esse aspecto de distorção devida à mudança de profundidade do objeto e da inclinação do eixo da câmera em relação ao objeto no momento da tomada da fotografia (GROETELAARS, 2004).

O princípio da retificação consiste na transformação de uma imagem fotográfica (com características próprias, como a mudança de profundidade do objeto e a inclinação do eixo da câmera) para uma imagem ortográfica do objeto. Em outras palavras, a retificação tem como finalidade eliminar o efeito de deformação da perspectiva e encontrar a verdadeira grandeza dos objetos, desde que pelo menos uma grandeza seja conhecida. Este procedimento consiste na transformação da imagem de um objeto registrado com qualquer inclinação ou não ortogonalidade ao plano da câmera, para uma imagem ortogonal do objeto (Figura 30).

Figura 30 – Antiga Biblioteca Pública situada na Praça Municipal, Salvador – BA: (a) Fotografia original; (b) Foto retificada



(a)



(b)

Fonte: Groetelaars (2004).

Ainda se tratando da conceituação, Coelho e Brito (2007) afirmam que por meio da retificação é possível modificar ou até mesmo eliminar completamente os ângulos de altitude da câmera em relação a um dado referencial, assim como a distância focal da imagem resultante.

Esse tipo de procedimento é bastante utilizado, principalmente, na fotogrametria aérea por causa do nivelamento não muito perfeito da aeronave durante o voo e, dessa forma, a retificação de imagens pelo processo fotográfico torna-se importante para a elaboração de cartas ortofotográficas (OLIVEIRA, 2008). Para Coelho e Brito (2007), o objetivo principal da retificação para a fotogrametria aérea, assim como para a Orbital, é gerar uma nova imagem vertical sem as distorções introduzidas pela atitude do sensor durante a tomada da imagem.

Na aplicação para edificações, Reich e colaboradores (2012) destacam que as imagens, devido ao tipo de captura pela câmera (perspectiva central), são distorcidas e desta forma não podem ser utilizadas como o plano das fachadas. A retificação, assim, faz-se necessária e a partir da orientação e do método DSM (*Dense Stereo Matching*), etapa específica de um dos processos intrínsecos à fotogrametria digital, modelos tridimensionais do objeto ou cena podem ser construídos.

3.2 AEROFOTOGRAMETRIA

A fotogrametria pode ser classificada por diferentes critérios, como descrito por Luhmann e colaboradores (2006), e alguns desses são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Critérios, classificações e descrições da fotogrametria

Critérios	Classificações	Descrição
Em relação à distância entre a câmera e o objeto	Fotogrametria por satélite	Processamento de imagens de satélites (altura > 200 km)
	Fotogrametria aérea ou aerofotogrametria	Processamento de fotografias aéreas (altura > 300 m)
	Fotogrametria terrestre	Medições de pontos fixos terrestres
	Fotogrametria à curta distância (<i>close range</i>)	Distâncias menores que 300 m
	Fotogrametria microscópica	Escala da imagem > 1
Pelo número de imagens utilizadas	Fotogrametria por uma única imagem	Processamento de única imagem ou retificação
	Fotogrametria estereoscópica	Processamento de duas imagens
	Fotogrametria por várias imagens	Processamento de mais de duas imagens
Pelo método de aquisição e processamento	Fotogrametria analógica	Câmeras analógicas e sistema de medição ótico-mecânico
	Fotogrametria analítica	Imagens analógicas e medição realizada por computador
	Fotogrametria digital	Imagens digitais e medição realizada por computador
	Videogrametria	Aquisição e medição de imagens digitais
	Fotogrametria panorâmica	Gravação e processamento de panoramas
Por disponibilidade dos resultados de medição	Fotogrametria em tempo real	Gravação e medição concluída dentro de um determinado período de tempo específico para a aplicação
	Fotogrametria <i>off-line</i>	Sequencial, gravação de imagem digital, separados no tempo ou local de medição
	Fotogrametria <i>on-line</i>	Simultâneo, múltiplo, gravação de imagem digital, medição imediata
Por aplicação ou área de especialização	Fotogrametria arquitetônica	Arquitetura, conservação, patrimônio
	Fotogrametria de engenharia	Aplicações de engenharia em geral
	Fotogrametria industrial	Aplicações industriais
	Fotogrametria forense	Aplicações para diversos problemas legais
	Fotogrametria biomédica	Aplicações médicas

Fonte: adaptado de Luhmann e colaboradores (2006).

A aerofotogrametria ou fotogrametria aérea vem fazer parte de uma das categorias da fotogrametria e é a técnica fotogramétrica baseada em operações com o propósito de obterem-se fotografias da superfície terrestre, primordialmente, utilizando-se câmeras com eixo ótico do sistema de lentes próximo da vertical (fotografia vertical) montada em aeronave e empregada em diversas atividades.

Conforme citado por Redweik (2007), a fotogrametria aérea tornou-se há muito tempo indispensável para a produção cartográfica e vem ganhando notoriedade devido à aplicação em outras áreas do conhecimento.

3.2.1 Fotografias aéreas

Campbell (2008) afirma que é difícil encontrar relatos da história do sensoriamento remoto ou do desenvolvimento da fotografia aérea que não cite a I Guerra Mundial como um marco importante para a técnica, cujo período torna-se relevante para a história da fotointerpretação. Ainda pelo autor, em anos de grandes inovações ocorridas concomitantemente a essa guerra, há a junção da câmera fotográfica e do avião como recurso de inteligência mais eficaz dos conflitos e, além disso, os avanços tecnológicos foram acompanhados pelo desenvolvimento da infraestrutura organizacional e de treinamento necessários para explorar a informação adquirida por esses equipamentos. Eminentemente, a fotografia aérea é definida como a ciência de obterem-se fotografias a partir do ar e por intermédio de plataformas, principalmente aeronaves, para o estudo da superfície terrestre, na sua essência.

Segundo Meneses e Almeida (2012), o termo sensoriamento remoto foi criado para nomear o desenvolvimento da tecnologia de equipamentos capazes de obterem imagens da superfície terrestre a distâncias remotas. Desta forma, tem-se que o sensoriamento remoto é a técnica de obtenção de imagens de objetos sobre a superfície terrestre (ou da própria superfície terrestre) sem que haja o contato físico com o sensor. Ainda pelos autores, o sensoriamento remoto parte de uma concepção mais científica, em que é regido pelos seguintes preceitos:

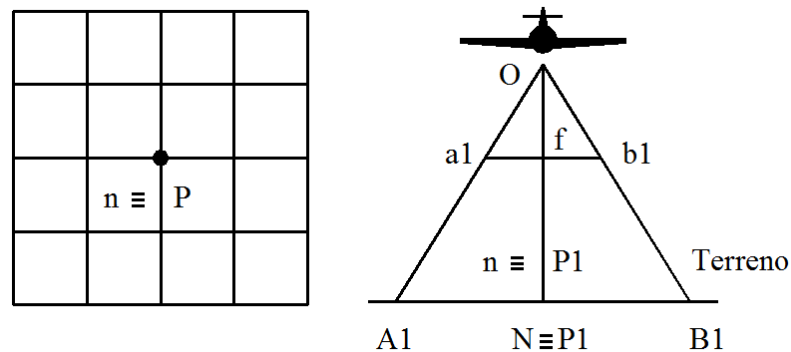
- exigência: ausência de matéria no espaço entre objeto e sensor;
- consequência: a informação do objeto é possível de ser transportada no espaço vazio;
- processo: o elo de comunicação entre o objeto e o sensor é a radiação eletromagnética, forma de energia capaz de se transportar no espaço.

Habitualmente, segundo Marchetti e Garcia (1990) e Jan (1972), as fotografias aéreas são divididas em fotografias verticais e fotografias oblíquas, e essas são subdivididas em oblíqua alta e baixa. As fotografias oblíquas altas e baixas são tomadas com o eixo ótico intencionalmente orientado obliquamente e os termos altos e baixos são para referir-se ao

ângulo de inclinação do eixo ótico da câmera em relação à vertical e não quanto à elevação da aeronave e o solo.

As fotografias verticais são aquelas em que são tomadas na descendente vertical ou o mais próximo da vertical quanto possível em uma aeronave em voo (Figura 31). Fotografias aéreas verticais são comumente usadas na fotogrametria aérea moderna e fotointerpretação. Carvalho e Araújo (2009) afirmam que nas fotografias verticais o eixo ótico deve formar um ângulo próximo de 90° com o terreno e a inclinação do eixo ótico com relação a uma linha vertical imaginária deve ser menor que 3° .

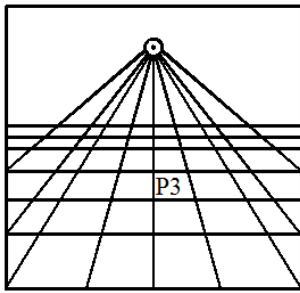
Figura 31 - Fotografia vertical



Fonte: Marchetti e Garcia (1990).

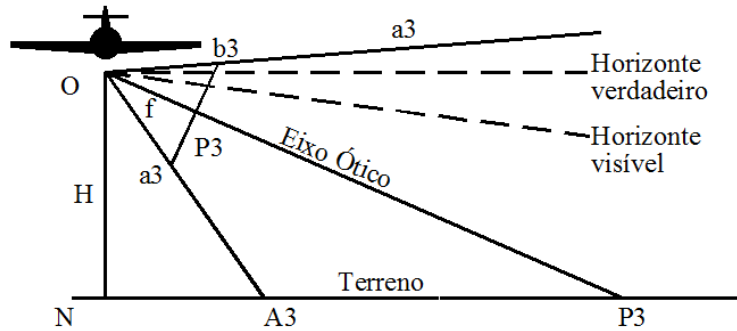
De acordo com Ricci e Petri (1965), a instabilidade da aeronave é um dos aspectos influentes no registro das fotografias verticais e as condições de perfeita verticalidade quase nunca serão conseguidas mesmo utilizando plataformas estabilizadas. Pelos autores, as definições das imagens são, geralmente, uniformes para as áreas inteiras e se o terreno fotografado for mais ou menos plano, a escala fotográfica se mantém constante em todos os pontos.

Nas fotografias oblíquas altas, o eixo ótico é inclinado de maneira que nas fotos apareça a linha do horizonte aparente ou visível, ou seja, a linha de limite entre o céu e a terra, tendo o mesmo aspecto de uma foto panorâmica tomada do alto de uma elevação, ilustrada na Figura 32 (RICCI; PETRI, 1965).



Fonte: Marchetti e Garcia (1990).

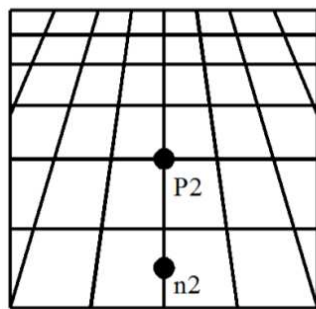
Figura 32 - Fotografia oblíqua alta



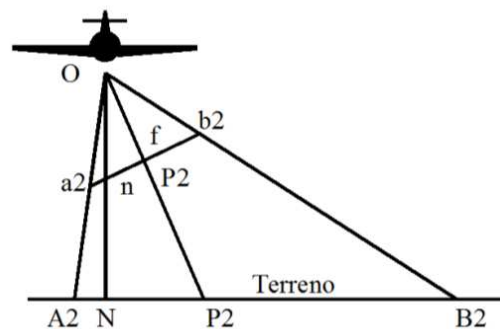
Neste tipo de fotografia, a escala decresce progressivamente dos primeiros aos últimos planos e, por conseguinte, quanto mais distantes estiverem os objetos fotografados, menor é a definição das imagens. A área abrangida é maior que na fotografia vertical e oblíqua baixa. As fotografias oblíquas altas são indispensáveis quando se deseja mostrar a paisagem em perfil e detalhes de declives abruptos com perfis perpendiculares à orientação da câmera.

Na fotografia oblíqua baixa, a linha do horizonte não é visível, mas o ângulo de inclinação do eixo óptico é maior que 3° (Figura 33). Apresentam as mesmas características das fotografias oblíquas altas, mas de forma menos acentuada. Assim, a área de cobertura será menor, assim como as variações de escala entre os primeiros e últimos planos.

Figura 33 - Fotografia oblíqua baixa



Fonte: Marchetti e Garcia (1990).



3.2.2 Determinação do número de fotografias para cobertura

A sobreposição longitudinal entre fotos consecutivas para a aerofotogrametria é na ordem de 60% e a sobreposição lateral de 30%, com o intuito de atender os requisitos de estereoscopia.

Desta maneira, a área de cobertura única (sem sobreposição) de uma fotografia aérea corresponde ao produto da dimensão representativa de 40% do lado da foto no sentido longitudinal e 70% do lado da foto em no sentido lateral. A $\text{Área}_{\text{única}}$, então, é o produto da dimensão representativa pela área da foto ($\text{Área}_{\text{foto}}$), apresentada pela Equação (3).

$$\text{Área}_{\text{única}} = 28\% \cdot \text{Área}_{\text{foto}} \quad (3)$$

Para obter-se uma estimativa da quantidade de fotos necessárias para cobrir uma determinada área, divide-se o valor da área de interesse pelo valor da $\text{Área}_{\text{única}}$ da foto, conforme Equação (4).

$$N^{\circ}_{\text{fotos}} = \frac{\text{Área}}{\text{Área}_{\text{única}}} \quad (4)$$

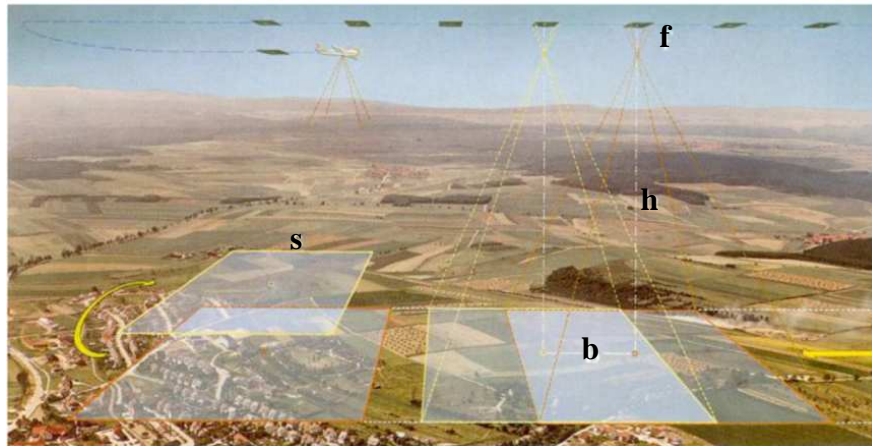
3.2.3 Recobrimentos Aerofotogramétricos

Inicialmente, conforme afirmado por Silva e Costa (2010), a aplicação da técnica fotogramétrica será determinada pela necessidade do projeto e considerações de custo. A fotogrametria é considerada vantajosa por aspectos já relatados no Capítulo 2. Porém, ao referirem-se à aerofotogrametria, apontam, indispensavelmente, alguns problemas:

- não é possível mostrar razoavelmente o terreno quando a área é coberta por vegetação densa;
- atrasos por condições de tempo e nebulosidade em certas regiões e estações do ano;
- falta de engenheiros civis com formação adequada em fotogrametria e de engenheiros cartográficos.

Ricci e Petri (1965) afirmam que de acordo com o projeto, para o planejamento da cobertura fotográfica vertical de certa área deve-se fixar primeiramente a escala e as outras características que as fotografias devem possuir e, para tanto, determinar a câmera, filtros, filmes e outros equipamentos. Portanto, faz-se necessária a preparação de planos de voo para se estabelecer o trajeto que a aeronave deverá seguir, objetivando efetuar a cobertura completa e racional da zona de interesse. O voo fotogramétrico é planejado com a finalidade de obter-se a cobertura da região a ser registrada constituída por fotografias verticais, onde as fotografias sucessivas devem apresentar zonas de sobreposição (REDWEIK, 2007).

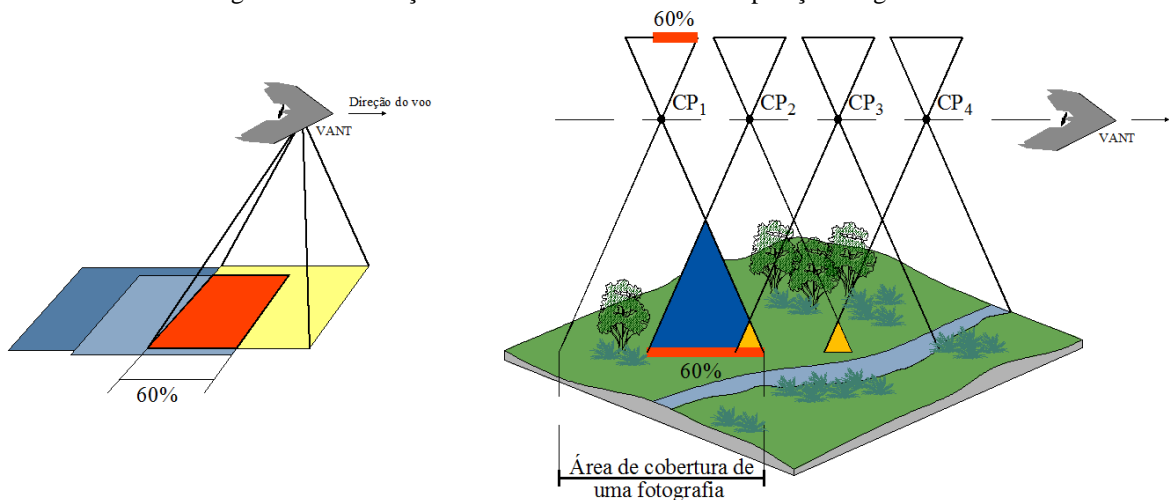
Figura 34 - Voo fotogramétrico



Fonte: Redweik (2007).

Santos (2009) afirma também que a cobertura fotogramétrica de uma área é realizada por meio de fotografias verticais obtidas ao longo de diversas faixas ou linhas de voo com uma série de fotografias que devem possuir sobreposição longitudinal ou, como outro termo usado pelo autor, bloco fotogramétrico. Dessa forma, cada fotografia deve possuir uma sobreposição em relação à sua sucessiva fotografia, como ilustrado na Figura 35. Assim, a mesma região da superfície deverá ser captada e registrada em duas ou mais imagens distintas. Para o autor, a sequência de fotografias tomadas na direção de voo forma uma faixa fotogramétrica e a sobreposição longitudinal permite a cobertura do terreno de dois pontos de vista diferentes, permitindo a produção de pares estéreos para a observação e medição estereoscópica, construção de mosaicos e geração de apoio fotogramétrico derivados do processo de fototriangulação de imagens.

Figura 35 – Ilustração do voo de VANT e da sobreposição longitudinal



Fonte: Santos (2009).

A sobreposição é medida em relação à percentagem da dimensão da fotografia, tanto na direção de voo ou sentido longitudinal (l), como na direção perpendicular ao voo ou sentido lateral (q). A sobreposição longitudinal é descrita como a sobreposição entre fotos sucessivas e a sobreposição lateral tida como sobreposição entre fiadas sucessivas (REDWEIK, 2007).

De acordo com Amorim e colaboradores (2012), as áreas de sobreposição entre as fotografias devem ser de aproximadamente 60% nos sentidos longitudinal e lateral das faixas de voo para propiciar um mosaico de imagens livres de distorções. Por outro lado, segundo, Santos (2009), o recobrimento longitudinal entre duas fotografias deve ser 60% e 65% (Figura 35) para fotografias tomadas com câmera métricas convencionais e de 80% para fotografias tomadas com câmera digitais de pequeno formato. A razão para estes valores é devida à rigidez geométrica que deve ser estabelecida em função da distância focal e o tamanho do quadro focal da câmera. Redweik (2007) reforça esse pensamento, afirmando que para efeitos de estereorrestituição se é exigido habitualmente a sobreposição longitudinal de 60% da dimensão da foto na direção do voo e para a sobreposição lateral valores em torno de 20 a 30% da dimensão da foto na direção transversal ao voo.

O objetivo da sobreposição longitudinal, segundo Redweik (2007), é permitir a visualização tridimensional e a restituição estereoscópica, enquanto a sobreposição lateral tem a função de margem de segurança, evitando-se lacunas entre as fiadas. No caso de aerotriangulações para medições com de alta precisão, deve-se voar com $l = 60\%$ e $q = 60\%$. A autora explica que ainda se fazem fiadas na direção perpendicular à principal, com o objetivo de que cada ponto do objeto possa ser medido num grande número de fotografias, no caso até 18. No entanto, para a cartografia sistemática, as direções preferenciais de voo para as fiadas são Norte-Sul e Leste-Oeste, porém qualquer outra direção é restituível. As retificações fotográficas, apesar de teoricamente não ser necessária a sobreposição longitudinal, pois não se pretende utilizar-se da estereoscopia, os voos são geralmente realizados com sobreposições superiores a 70% (longitudinal e lateral), para que se possa aproveitar apenas as zonas centrais das fotografias para o produto final, pois apresentam as menores distorções radiais devidas ao relevo e à altura dos objetos.

3.2.4 Veículos aéreos não tripulados – VANTs

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) ou, ainda, *Unmanned ou Uninhabited Aerial Vehicle* (UAV), como conhecido internacionalmente, foram desenvolvidos ou modificados para não transportar pilotos e são operados por controle remoto através de sinais eletrônicos, com o objetivo de executar voos de forma autônoma, sobrevoando alvos específicos ou áreas de interesse. Tem-se como uma de suas finalidades a obtenção e fornecimento de informações, empregando sensores embarcados (CARDOSO, 2008; SANTOS, 2011).

Avanços tecnológicos recentes nas áreas de conhecimento relacionados aos acumuladores de energia, à aquisição e transmissão de imagem, aos motores elétricos tipo *brushless* e ao sistema de posicionamento global (GPS) viabilizaram o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos para utilização em VANTs. Uma das características destes equipamentos é a miniaturização que se consegue do conjunto como um todo, em função das dimensões reduzidas dos sistemas de propulsão, alimentação e navegação. Devido a esses sistemas em miniatura, tornou-se possível conceber micro veículos aéreos não tripulados (μ VANTs).

Essas plataformas podem ser dotadas de asas fixas ou rotativas. Os VANTs que possuem asas fixas são os considerados aviões convencionais e os com asas rotativas são os do tipo helicópteros, multirrotores com quatro, seis ou oito rotores.

Segundo Arjomandi e colaboradores (2006) e Amorim e colaboradores (2012), os VANTs podem ser classificados por características de desempenho, que envolvem aspectos quanto: ao peso próprio, à resistência, ao alcance (referente à distância da base), carga útil ou *payload*, tempo máximo de permanência em voo, altitude máxima e, ainda, tipo de propulsão. O termo *payload*, como descrito por Miranda Neto e Almeida (2009), refere-se à capacidade de transporte de uma aeronave, englobando equipamentos internos, tripulantes (quando houver), armamentos, munições e combustível externo, pois, geralmente, não se contabiliza o combustível interno. Em suma, esse termo trata-se de toda a carga externa que uma aeronave pode transportar com segurança além do peso próprio, normalmente expresso em Kg no caso dos VANTs.

De acordo com Amorim e colaboradores (2012), existem vários padrões de classificação para os VANTs, como os preconizados pela UNSW (2012), UAV (2012) e Arjomandi e

colaboradores (2006). Estes autores apresentam uma classificação para peso próprio das aeronaves (Quadro 6).

Quadro 6 - Classificação por peso próprio dos VANTs

Categoria	Peso (kg)	Exemplo
Super pesado	> 2.000	<i>Global Hawk</i>
Pesado	200 – 2.000	A-160
Médio	50 – 200	<i>Raven</i>
Leve	5 – 50	<i>RPO Midget</i>
Micro	< 5	<i>Dragon Eye</i>

Fonte: Arjomandi e colaboradores (2006).

Arjomandi e colaboradores (2006) ainda apresentam classificações para: resistência e alcance, máxima altitude, carga de útil (*payload*), dentre outras existentes. Amorim e colaboradores (2012) afirmam que as classificações tendem a evoluir e unificar-se à medida que se avança o desenvolvimento. Com o intuito de sintetizar a classificação e buscando basear-se num padrão internacional, será apresentada a classificação da UVS *international* no Quadro 7, englobando as categorias de VANTs e as principais características.

Quadro 7 - Classificação de VANTs pela UVS *International*

Categoria	Massa (kg)	Alcance (km)	Altitude de voo (m)	Autonomia (h)
Micro	< 5	< 10	250	1
Mini	< 5 / 30 / 150	< 10	150 / 250 / 300	< 2
Pequeno alcance	25 – 150	10 - 30	3.000	2 – 4
Médio alcance	50 – 250	30 - 70	3.000	3 – 6
Grande altitude e autonomia	> 250	> 70	> 3.000	> 6

Fonte: Amorim e colaboradores (2012).

Wefelscheid e colaboradores (2011) destacam que veículos de sensoriamento terrestre, por se moverem no nível do solo, somente podem capturar imagens que serão perfeitamente usadas para reconstrução de fachadas, para os casos de registro fotográfico de edificações. Demais partes externas do edifício, principalmente as coberturas, sejam telhados, lajes ou abóbodas, não poderão ser registradas sem um esforço extra. Em contraste, sensores aéreos convencionais não são capazes também de modelar detalhes presentes nas fachadas, mas somente capazes de determinar grosseiramente a forma de um edifício.

Entretanto, VANTs combinam as vantagens de veículos terrestres e de sensoriamento aéreo. Os VANTs podem explorar o conjunto tridimensional dos edifícios desde que estejam livres de obstáculos. Esses permitem variadas posições de imagem e, dessa forma, a aquisição de imagens de todo o objeto.

Por essas perspectivas e de acordo com Amorim e colaboradores (2012), esses equipamentos podem vir a compreender uma gama de dispositivos tecnológicos para a execução de vários tipos de atividades, como servindo de veículo para o transporte de sensores, com a finalidade de aquisição de dados em tempo real ou não.

Reich e colaboradores (2012) afirmam que, para as aplicações civis, os VANTs são cada vez mais interessantes devido ao peso (relativamente leve) e às unidades de navegação, assim como às melhorias na engenharia de controle. Os autores enfatizam que por causa do avanço nesta área, os VANTs são capazes de seguir de antemão caminhos predeterminados ou planejados autonomamente.

Além dessas vantagens, VANTs possuem baixo custo de aquisição, de sistemas de controle de voo e telemetria, incluindo os sensores empregados para captura dos dados almejados. A autonomia de voo (tempo de voo) é compatível com o porte e custo do aparelho e os equipamentos têm se mostrado confiáveis e seguros. Por causa das pequenas dimensões, baixo peso, segurança e confiabilidade na operação, os VANTs podem voar a baixas altitudes, inclusive, muito abaixo das nuvens, possibilitando o registro de fotos aéreas sem obstáculos, o que não aconteceria se as imagens fossem obtidas por aviões convencionais e satélites (AMORIM *et al.*, 2012).

Um aspecto importante destacado por Reich e colaboradores (2012) faz referência à produção de fachadas modeladas. A fotogrametria terrestre pode gerar, devido às limitações do centro perspectivo da câmera, modelos de fachadas com oclusões da superfície e partes da fachada. A utilização de guindaste, empilhadeira ou outros equipamentos para alcançar as partes mais altas de uma edificação para a aquisição de dados leva ao aumento dos custos e do tempo nas tarefas. A fotogrametria aérea permite a solução destes problemas detectados nos produtos fotogramétricos.

Zischinsky e colaboradores (2000) afirmam que a produção de planos de fachadas em fotogrametria arquitetônica é usualmente um dos mais importantes pontos de interesse. Por outro lado, existe um desprezo pelas coberturas dos edifícios que é parcialmente causado pela falta de métodos de aquisição de imagens. Pelos autores, quando se pensa em utilização de equipamentos alternativos para assessorar na aquisição de imagens, estes podem se tornar um pouco dispendiosos e quando se pensa em utilizar fotografias obtidas a partir de aeronaves

convencionais, por causa das restrições de segurança de altura de voo, a qualidade das imagens não é adequada aos requisitos de utilização. O uso de helicópteros controlados por rádio parece ser uma boa forma de solução para esses problemas.

3.3 IMAGENS DIGITAIS

A princípio, antes das câmeras e sistemas digitais, a aquisição de imagens fotogramétricas analógicas era por meio de câmeras fotogramétricas dotadas de filme, onde este era posicionado no plano focal e sensibilizado pela luz. Nas câmeras fotográficas digitais, as imagens são gravadas diretamente em meio digital, por meio da sensibilização de sensores CCD (*Charged Couple Device*) ou CMOS (*Complementary Metal-oxide Semiconductor*) por radiação eletromagnética.

As imagens digitais são os elementos básicos para a aquisição dos dados tridimensionais das feições dos objetos na fotogrametria digital. A imagem digital é uma matriz composta por células quadradas denominadas píxeis, do termo em inglês *picture element*. Para cada píxel, há somente uma cor sólida que é definida por um número (BRITO; COELHO, 2007).

As imagens digitais são salvas em formatos controlados pelo *software* em uso e dentre os formatos mais comuns para salvamento podem ser citados: JPEG ou JPG (*Joint Pictures Experts Group*), PNG (*Portable Network Graphics*), BMP (*Bit Map*) e TIFF ou TIF (*Tagged Image File Format*).

JPEG é um tipo de arquivo para armazenamento de imagens com profundidade de 24 bits por píxel e é possível para este formato aceitar 16,8 milhões de cores. Um dos aspectos do formato PNG é que este possui as mesmas características do JPEG, mas com a vantagem da eficiência na compressão dos dados, não causando perda de qualidade a cada salvamento, o que possibilita maior fidelidade à imagem original. O formato BMP foi desenvolvido para ser aplicado no sistema Windows, possuindo um formato simples, com mínimas possibilidades de erro na interpretação dos arquivos. Por não permitir a compressão dos dados, a qualidade da imagem é a melhor possível, mas em compensação o tamanho dos arquivos BMP é muito grande (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Meneses e Almeida (2012) destacam que o formato TIFF foi desenvolvido para se tentar criar um padrão para imagens geradas por equipamentos digitais (a exemplo do escâner). O formato é capaz de armazenar imagens em preto e branco, em escalas de tons de cinza e em paletas de cores com 24 ou 32 *emphbits*, além de ser reconhecido por qualquer tipo de programa de processamento de imagens. O formato é utilizado para a troca de arquivos entre aplicativos e plataformas de computadores, além de ser um formato flexível de imagens *bitmap* suportado praticamente por todos os aplicativos de pintura, edição de imagens e *layout* de página.

3.3.1 Características de câmeras digitais

Inicialmente, destaca-se que todas as câmeras fotográficas (convencionais ou digitais), basicamente, possuem os mesmos conjuntos de elementos que variam conforme a concepção, eficiência, dimensões e que, de forma geral, cumprem as mesmas funções na obtenção da fotografia, citando-se: a objetiva, o diafragma, o obturador, o mecanismo de transporte, o sistema de foco e o filme ou sensor (TRIGO, 2012).

Scuri (2002) afirma que as câmeras digitais funcionam exatamente como as câmeras convencionais, porém, apresentam parâmetros a mais e alguns desses são mapeados de forma distinta no processo de captura. As principais características que as câmeras possuem são:

- abertura do diafragma (*aperture* - na lente);
- distância focal (*focus* - na lente);
- fator de ampliação (*zoom* - na lente);
- velocidade do obturador (*shutter* - na câmera);
- fotômetro (na câmera);
- sensor (filme ou eletrônico).

A abertura do diafragma define a quantidade de luz que chega ao sensor através da objetiva e tem ligação direta com a profundidade de campo. A numeração convencional para abertura é diretamente proporcional à profundidade de campo e inversamente proporcional à abertura. A profundidade de campo é a diferença entre a posição mais próxima e a mais afastada do objeto em relação à câmera, sem que haja o borramento da imagem, ou seja, a região onde existe foco.

O f/número é a capacidade de captura de luz da lente através da abertura da mesma. Conforme se aumenta o f/número, há a redução da abertura e, conseqüentemente, há o aumento da profundidade de visão e a necessidade de maior aumento da iluminação para compensação.

A distância focal é a distância entre o centro ótico de uma dada lente delgada e seus pontos de foco, quando o meio em que se encontram inseridos o plano principal do objeto e o plano principal é o mesmo. A distância focal é fundamental para determinar qual o ângulo de visão de uma objetiva quando fotografado um objeto focalizado sobre uma dada mídia.

De acordo com Scuri (2002), o obturador define o tempo que o sensor ficará exposto àquela quantidade de luz, relacionando-se com a velocidade do objeto a ser fotografado. Se muito rápido congelará o movimento, se muito lento borrará o movimento.

Costa (2011b) relata que a velocidade de abertura e fechamento do obturador pode variar de 1/50 de segundo a 1/3000 de segundo e, para casos como da aerofotogrametria, dependendo da altura em que o avião encontra-se e da velocidade em que ele sobrevoa, o obturador deve ser ajustado para baixa ou alta velocidade de abertura e fechamento. Para grandes alturas (6.000 a 9.000 m), recomendam-se pequenas velocidades e grandes velocidades para pequenas alturas (600 a 1.200 m).

O fotômetro é responsável por informar se há uma quantidade excessiva ou uma falta de luz chegando ao sensor, baseando-se em relações entre abertura, obturador e sensor. Na maioria das câmeras, esta combinação é feita automaticamente, baseada no sensor para uma condição média para a profundidade de foco, em geral a maior possível (AE – *Auto Exposure*) (SCURI, 2002).

O número ISO define a sensibilidade do sensor CCD ou CMOS para as câmeras digitais, significando que quanto menor este número, menor a sensibilidade. A sensibilidade da câmera digital vai ser dada pelo número de Lux e a qualidade da foto fica limitada pelo número de elementos (píxeis) no CCD. Para valores baixos de ISO, pouca luz é captada, no entanto, quase não apresenta ruído⁴ e os contornos ficam mais nítidos. Já para um ISO maior, apesar de

⁴ Pode-se definir ruído como a variação aleatória de brilho ou cor nas imagens digitais, produzido pelos dispositivos de entrada, como as câmeras digitais.

permitir fotografar com pouca luz, gera um ruído perceptível e prejudica a nitidez dos detalhes. Os sensores CMOS tendem a ter um melhor funcionamento em situações de muita luminosidade em relação aos sensores CCD, que se comporta melhor em ambientes de baixa luminosidade. Isso ocorre porque um sensor CMOS possui diversos transistores localizados próximos e, assim, a sensibilidade à luz é menor.

Assim como para a fotogrametria terrestre e à curta distância, as imagens fotográficas são tomadas com parâmetros pré-fixados e com exposição manual. Amorim e colaboradores (2012) utilizaram para a aquisição de imagens aéreas em sua pesquisa os seguintes parâmetros: ISO 200, velocidades de obturador acima de 1/600 segundos e abertura de diafragma entre 4.0 e 6.3 (de acordo com a luz disponível), para conseguir obter relações que oferecessem profundidade de campo aceitável e, sobretudo, diminuir o fenômeno de difração gerado pelas lentes da objetiva. Outro fator a ser considerado é a velocidade de deslocamento da aeronave.

3.3.2 Resolução de imagens digitais

A resolução espacial da imagem digital está diretamente relacionada ao tamanho do píxel. O valor do píxel é determinante para a capacidade de observação dos objetos e, principalmente, de detalhes dos objetos. Dessa maneira, quanto menor for o tamanho do píxel, maior será a resolução espacial da imagem digital.

Por meio da resolução, é possível determinar a capacidade do sistema em reproduzir detalhes da cena. Para as câmeras digitais, a quantidade de píxeis, tamanho do sensor digital, a distância ao objeto e distância focal definem a resolução do objeto. Para um mesmo tamanho de píxel, quanto maior o sensor, maior a concentração de píxeis por milímetro quadrado e, portanto, maior a resolução da câmera.

3.3.3 Métodos de aquisição de imagens digitais

A aquisição de imagens é uma das etapas do processo de levantamento fotogramétrico, estando diretamente relacionada ao tipo de câmera a ser utilizada para captura das imagens do objeto. As câmeras analógicas, métricas, semi-métricas e não-métricas, empregadas em períodos anteriores à fase digital, tinham em comum o tipo de mídia, diferentemente das câmeras digitais.

Hanke e Grussenmeyer (2002) frisam que o desenvolvimento de imagens digitais está intimamente relacionado ao desenvolvimento dos sensores CCD e a aquisição direta de imagens por estes sensores apresentam uma série de vantagens para a aplicação na fotogrametria, como:

- fluxo de dados direto com potencial de processamento *online*;
- potencial elevado para automação;
- boas características geométricas;
- controle direto da qualidade da imagem adquirida;
- baixo custo dos componentes dos sistemas.

A outra forma de obtenção de imagens digitais é por meio da transformação de fotografias analógicas em formatos digitais, utilizando os *scanners*. Este processo, também denominado digitalização, oferece a combinação das vantagens da aquisição de imagens por filmes e as vantagens do processamento de imagem digital, que são: arquivamento, técnicas de medição semiautomática e automática e combinação de dados *raster* e vetoriais. Quanto às vantagens da aquisição por filme, destacam-se: o grande formato da imagem, qualidade geométrica e radiométrica.

Para as aplicações de *scanners* na fotogrametria arquitetônica há a necessidade da adequada resolução. O reconhecimento de detalhes deve ser assegurado e o meio de armazenamento é limitado.

3.4 TIPOS DE PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO

Os tipos de processamento podem ser em manual, semiautomático e automático. Esses são descritos também na literatura como soluções interativas, semiautomáticas ou automáticas, respectivamente (GROETELAARS, 2004).

No processamento manual, todas as etapas necessitam da operação do usuário. Assim, a orientação interna (calibração da câmera) e a identificação dos pontos homólogos, realizada nas várias imagens, são conduzidas pelo operador, objetivando as restituições.

O processamento semiautomático é caracterizado por etapas distintas de automatização. O reconhecimento automático de alvos ou padrões de geometria pré-definidos sobre as superfícies é uma dessas implementações. Alguns programas utilizam-se deste recurso para os

procedimentos de calibração de câmeras e para o reconhecimento e orientação de imagens por meio de alvos codificados.

O processamento automático pode abranger como opção a calibração da câmera de forma automática e, posteriormente, seguem-se as etapas de orientação das imagens e construção tridimensional de modelos formados por nuvem de pontos densa ou malhas trianguladas.

A possibilidade de incluir ou não a etapa de calibração cria duas formas de processamento automático. Para os processamentos em que a calibração da câmera ocorre simultaneamente à orientação das imagens, o algoritmo utilizado é denominado *Structure From Motion* (STM) (SZELISKI; TORR, 1998).

Eventualmente, o processamento automático é dividido em duas etapas. Na primeira etapa há a correlação automática dos pontos homólogos entre as imagens, a orientação das imagens e a reconstrução da nuvem de pontos esparsa. Na segunda etapa ocorre a reconstrução densa da nuvem de pontos a partir das várias imagens, empregando metodologias como o MVS (*Multi-View Stereo*) ou DSM (*Dense Stereo Matching*). O resultado final da reconstrução densa é um modelo de nuvens de pontos com textura e informação radiométrica das imagens fotográficas (MATEUS, 2012).

3.5 NUVEM DE PONTOS

A nuvem de pontos ou *points cloud*, termo em inglês como também é conhecida essa tecnologia, trata-se de um modelo geométrico constituído por conjunto de pontos distribuídos no espaço e cada um destes pontos representados por sua coordenada cartesiana tridimensional (X, Y, Z). Esse modelo é representado também por atributos que podem corresponder à cor visível no ponto (componente RGB – *Red*, *Green* e *Blue*) ou outro atributo qualquer associado a essa posição e que permite a sua visualização e materialização (LIMA *et al.*, 2010).

Algumas ferramentas podem ser aplicadas para a obtenção de um modelo por nuvem de pontos, onde se têm usualmente: a digitalização por varredura a laser e a digitalização tridimensional baseada em fotografias (fotogrametria). Essas são as duas tecnologias principais, no entanto a digitalização tridimensional baseada em fotografias é a tecnologia mais recente e será utilizada no presente trabalho.

3.5.1 *Laser Scanning*

Oliveira (2008) explica que o sistema 3D *laser scanning* ou varredura a laser é uma técnica avançada que possui grandes virtudes quanto ao campo de aplicação e pode ser empregada de forma isolada ou, inclusive, juntamente a técnicas fotogramétricas. Neste ponto, é relevante destacar que as técnicas algumas vezes não atenderão isoladamente a todas as expectativas e objetivos desejados, e é necessária a interação de um ou mais métodos e tecnologias, e os respectivos equipamentos e sistemas.

O *laser scanner* terrestre é um sistema que se utiliza de varredura para determinação da posição tridimensional dos pontos de uma superfície. O sistema de varredura a laser pode ser dividido em três componentes principais: a unidade de medição laser propriamente dita, encarregada de emitir e receber o sinal laser, um sistema de varredura optomecânico e uma unidade de registro de medições de apoio. A unidade de medição laser tem a função de determinar a distância entre o sensor e a superfície (CENTENO *et al.*, 2004).

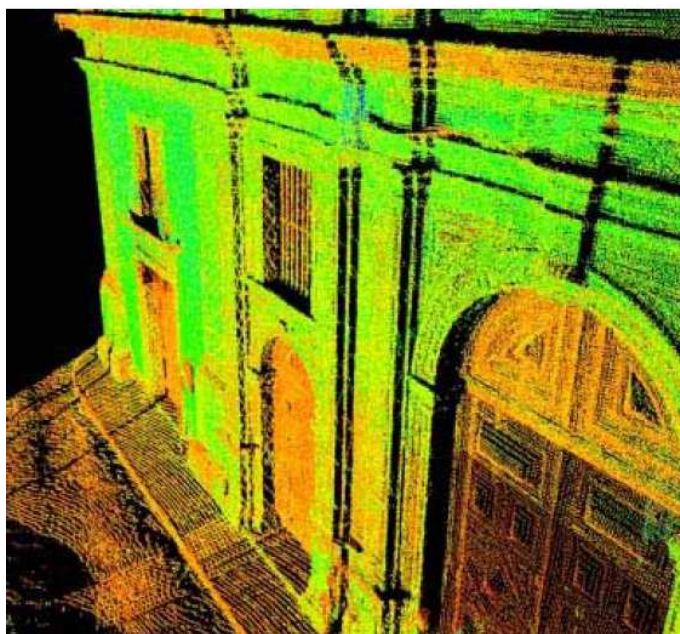
Os dados adquiridos são armazenados em computadores para posterior processamento em programas fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos (OLIVEIRA, 2008). Existem três sistemas básicos para *laser scanners*, a saber: Triangulação (*Triangulation*), *Time of Flight* (TOF) e diferença de fase.

A nuvem de pontos é o resultado final do processo de medição e processamento, também denominado, genericamente, de Modelo Numérico de Superfície, ao qual o valor de refletância também pode ser associado. Como aspecto positivo, estes sistemas podem ser usados durante a noite, já que não há a necessidade de luz visível.

High Definition Survey (HDS) é outro termo utilizado para designar toda esta tecnologia que, como ponto a receber uma ressalva, não permite capturar diretamente a cor visível do ponto pertencente à nuvem de pontos (Figura 36), e somente é possível a partir da extração da característica do objeto por fotografias digitais de alta resolução, devidamente tomada e obedecendo a certos requisitos, como reamostragem da nuvem de pontos sobre a fotografia correspondente. Outro aspecto importante é que estes dispositivos podem funcionar com todos os tipos de superfícies, mas, na realidade, o *laser scanner* tem dificuldade com muitos tipos de superfícies comumente encontradas nas edificações, exemplificando-se: as superfícies de baixa

refletância (pintadas na cor preta), superfícies refletivas (metais brilhantes e espelhos) e as superfícies transparentes ou translúcidas (vidros). Apesar dos aspectos positivos desta tecnologia e algumas limitações, os elevados custos dos equipamentos podem tornar inviável sua utilização em determinadas situações, particularmente na documentação arquitetônica onde os recursos são escassos (BRITO *et al.*, 2012).

Figura 36 - Nuvem de pontos da Igreja de São Francisco, Salvador – BA



Fonte: Groetelaars (2004).

Um aspecto relevante, descrito por Nascimento Júnior e colaboradores (2004), é que as nuvens de pontos com coordenadas dos pontos no espaço objeto e seus valores de refletância devem ser coletados de vários pontos de vista para eliminar as oclusões devido à perspectiva central e, para referenciar estes pontos a um sistema do espaço objeto, são necessários alguns pontos bem definidos, normalmente proporcionados por alvos especiais; pelo menos quatro pontos. Em outras palavras, a oclusão ocorre quando um objeto ou parte é ocultado por outro, ou tem extremidades côncavas ou convexas, ou ainda quando partes salientes ocultam superfícies adjacentes e, dessa maneira, não é possível determinar com certeza a forma ou características do que se encontra nas regiões de sombra.

Por fim, conforme descrito por Oliveira (2008), o equipamento *3D laser scanner* tem certas analogias com as câmeras fotográficas, devida à presença, em alguns deles, de câmera digital

que, pelo seu visor, permite o enquadramento do campo que vai ser escaneado, proporcionando a obtenção de imagens digitais que documenta o setor da varredura.

3.5.2 Digitalização tridimensional baseada em fotografias (DSM)

Em outro segmento dos avanços tecnológicos, encontra-se a obtenção de nuvem de pontos por processamento digital de imagens e pelos princípios da fotogrametria. Vários são os termos utilizados para designar esta tecnologia surgida recentemente e que tem como finalidade a obtenção da geometria de objetos e cenas a partir de imagens 2D (DONEUS *et al.*, 2011). Dentre os termos, são comumente utilizados: *Photo-based Scanning* (digitalização tridimensional baseada em fotografias), *Stereo Matching* (correspondência estéreo), *Dense Stereo Matching - DSM* (densa correspondência estéreo), *Dense Surface Modeling* (modelagem densa de superfície); *Structure from Motion – SFM*, *Multi-stereo View – MVS* (WALFORD, 2009; TANG *et al.*, 2002; GROETELAARS; AMORIM, 2012, LI *et al.*, 2013).

Segundo Groetelaars (2015), apesar de SFM e DSM serem usados referindo-se a todo processo automatizado de geração de modelos por nuvem de pontos, existem autores que tratam os termos citados de forma diferente. O termo *Structure from Motion* está associado em alguns casos às etapas iniciais de recuperação simultânea da geometria do objeto, por meio da nuvem de pontos esparsa, e de informações sobre a câmera, enquanto que os termos *Dense Stereo Matching*, *Dense Surface Modeling* e outros são usadas para se referir às etapas finais de processamento, em que ocorre a geração dos modelos nuvem de pontos densa e de malhas triangulares.

Para Walford (2009), DSM ou *photo-based scanning* (forma como o autor designa), historicamente, tem ligações com dois campos: a topografia fotogramétrica digital, com a finalidade precípua de geração de modelos digitais de relevo do solo e a estereoscopia computadorizada, onde extrai informações tridimensionais de objetos a partir de pares de imagens capturadas simultaneamente e com pontos perspectivos distintos.

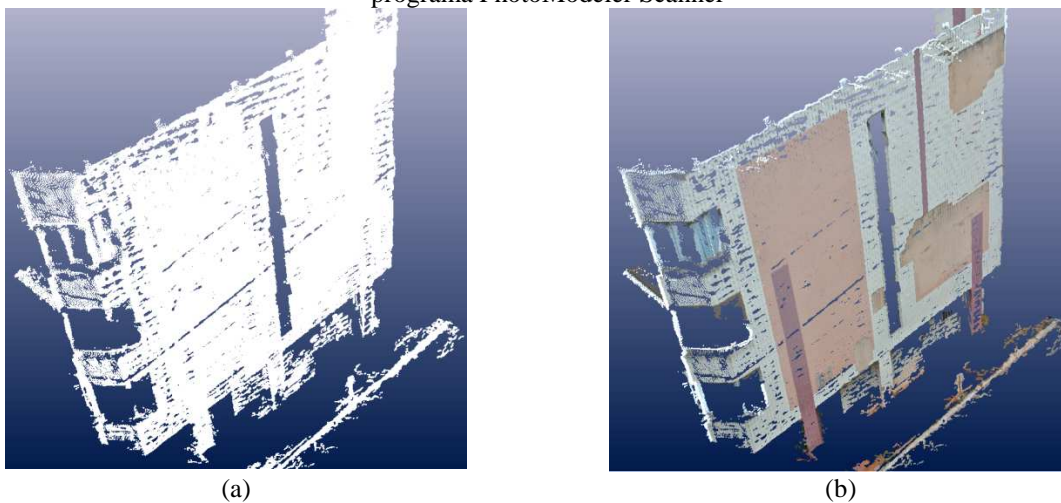
Lima e colaboradores (2010) afirmam que a digitalização tridimensional baseada em fotografias é o meio recente de obtenção de nuvem de pontos, em que, por meio de fotografias de alta resolução, é empregado o princípio dos raios visuais que passam no centro da projeção, ou melhor, no centro ótico da câmera e em pontos homólogos de pelo menos duas fotografias

orientadas, tomadas a partir de pontos diferentes, ou melhor, perspectivas deslocadas, mas com geometria adequada.

O emprego da digitalização tridimensional baseada em fotografias facilita a criação de modelos geométricos de objetos que apresentam formas complexas, irregulares ou orgânicas, diferentes de objetos que apresentam pontos fáceis de serem localizados nas fotografias, como as arestas e vértices bem definidos.

Lima e colaboradores (2010) apontam um aspecto importante. Diferentemente da captura de nuvem de pontos por varredura a laser, para esse tipo de nuvem de pontos o atributo natural é a cor visível, por se tratar de um processo de captura tendo como base a fotografia (Figura 37). Esse aspecto torna-se favorável quando se é idealizada a aplicação dos padrões da textura real presente nos elementos que compõem o objeto fotografado, ou seja, a obtenção das características atuais do objeto no momento do registro fotográfico, inclusive com os aspectos referentes ao estado de conservação e possíveis danos presentes numa edificação, citando-se como exemplo.

Figura 37 – Edificação de quatro pavimentos: (a) Fachada de um edifício obtida por nuvem de pontos sem atributo de cor; (b) nuvem de pontos com atributos da cor natural da edificação pelo programa PhotoModeler Scanner



Fonte: próprio autor.

A digitalização tridimensional baseada em fotografias utiliza algoritmos da estereoscopia para criação dos modelos 3D para os diversos campos de aplicação com precisão fotogramétrica. Os fatores que podem afetar os resultados adquiridos são (SILVA *et al.*, 2010):

- a resolução da câmera;

- a lente utilizada;
- a distância da câmera ao modelo (objeto ou cena);
- o padrão de textura da superfície do objeto.

No caso da baixa resolução, este problema pode ser ajustado aproximando a câmera do objeto a ser fotografado ou usando uma câmera de alta resolução. Como referência, Walford (2009) afirma que usando uma câmera de 10 megapíxeis e fotografando-se um objeto a 1 metro de distância, obtém-se aproximadamente 0,3 mm de superfície em cada píxel, ou seja, a resolução da amostra em 3D seria de aproximadamente 0,3 mm/píxel. Ao se afastar a câmera do objeto em 10 m, a resolução da nuvem de pontos cai para 3 mm/píxel. Ainda conforme esse autor, a digitalização tridimensional baseada em fotografia não é restringida pelo tamanho do objeto a ser modelado, contudo para capturar a textura se requer que essa seja visível.

Andrade (2003) propõe um método para cálculo de tamanho de píxel (*TP*) a partir de formulações, em que se aplicam os valores referentes ao sensor da câmera, distância da câmera ao objeto ou cena, distância focal e número de píxeis na Equação (5).

$$TP = \frac{1000 \cdot d \cdot s}{NP \cdot f} \quad (5)$$

Em que: s = dimensão do sensor da câmera (mm); d = distância da câmera ao objeto ou cena (m); f = distância focal (mm); e NP = número de píxeis (píxel).

Sobretudo, é importante evidenciar que a digitalização tridimensional baseada em fotografias apresenta algumas limitações relacionadas a:

- áreas com pouca iluminação;
- superfícies com texturas de padrões homogêneos;
- superfícies com grandes mudanças de profundidade;
- insuficiência de tempo hábil para processamento (WALFORD, 2009).

Comparando-se ao sistema *3D laser scanner*, a técnica DSM apresenta um menor custo devido aos valores dos equipamentos de varredura a laser, mas, por outro lado, a obtenção de nuvem de pontos por imagens digitais é mais lenta por causa da necessidade de pós-processamento.

Existem alguns programas disponíveis no mercado internacional capazes de obter nuvem de pontos pelo processo de digitalização baseada em fotografia, destacando-se: o iModeller da UZR, o ImageModeler da Autodesk, o ZScan da Menci, o Photomodeler Scanner da Eos Systems e o PhotoScan da Agisoft LLC. (CENTENO *et al.*, 2004; LIMA *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2010; VERHOEVEN *et al.*, 2012).

3.5.3 Processamento por nuvem de pontos (DSM)

Silva *et al.* (2010) afirmam que o processamento dos dados adquiridos por digitalização funciona por meio de uma varredura em intervalos regulares medindo a localização de pontos no espaço e a obtenção de intervalos menores entre esses pontos resulta em uma densidade regular da superfície do modelo original, dando origem à nuvem de pontos. A nuvem de pontos adquirida pelo processo de digitalização tridimensional normalmente necessita de algum tipo de pós-processamento, podendo-se citar: a suavização, a aplicação de filtros, o preenchimento, a montagem de partes (registro), a triangulação de pontos e a geração de malhas.

Koutsoudis *et al.* (2013) explicam que a representação completa de uma nuvem de pontos é originada, primeiramente, de um processamento parcial de nuvem de pontos (de baixa densidade) após a etapa de correspondência de pontos (*smartmatches*) e esta nuvem é considerada como dados brutos obtidos por um sistema de aquisição 3D.

A seguir, serão descritos os diversos aspectos que envolvem as etapas de processamento de nuvem de pontos, dando ênfase a: pontos correspondentes, nuvem de pontos esparsa; nuvem de pontos densa e processamento de malhas ou pós-processamento.

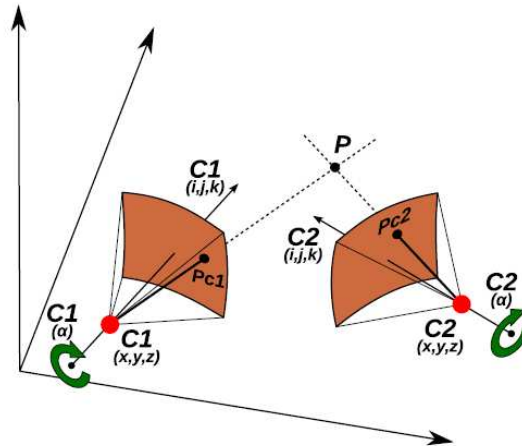
3.5.3.1 Pontos correspondentes

Tang e colaboradores (2002) dizem que *stereo matching* é o processo de encontrar pontos correspondentes (*smartmatches*) em duas ou mais imagens, e atualmente é um dos grandes desafios da Ciência da Computação no seguimento da visão computacional. Conforme comentado por Doneus e colaboradores (2011), existem vários métodos e ferramentas que permitem obter informações sobre a geometria de objetos e cenas a partir de imagens 2D.

Tavani e colaboradores (2014) explicam que a reconstrução em 3D é possível desde que existam pelo menos 2 imagens da mesma cena, obtidas de posições diferentes, isto é, de centros de

projeções distintos e que, conhecendo a posição, a orientação e a distância focal, é possível encontrar a posição de um ponto no espaço a partir das coordenadas bidimensionais das imagens pelo princípio da geometria epipolar (Figura 38).

Figura 38 - Cena mostrando os parâmetros envolvendo a visão estereoscópica



Fonte: Tavani e colaboradores (2014).

Na representação anterior, o ponto P , quando é fotografado por duas câmeras ($C1$ e $C2$), tem sua posição em $PC1$ e $PC2$ dependente da posição das duas câmeras, da distância focal e da orientação, que é definida pelos 4 parâmetros (o vetor ijk e os ângulos α que definem a rotação em torno do eixo ijk). Deve ser lembrado que este método baseia-se no princípio da visão estereoscópica. No entanto, o método de reconstrução 3D, como afirmam Doneus e colaboradores (2011), só pode ser realizado se a geometria de projeção é conhecida, isto é, se os parâmetros de orientação externa e interna (calibração da câmera) são conhecidos.

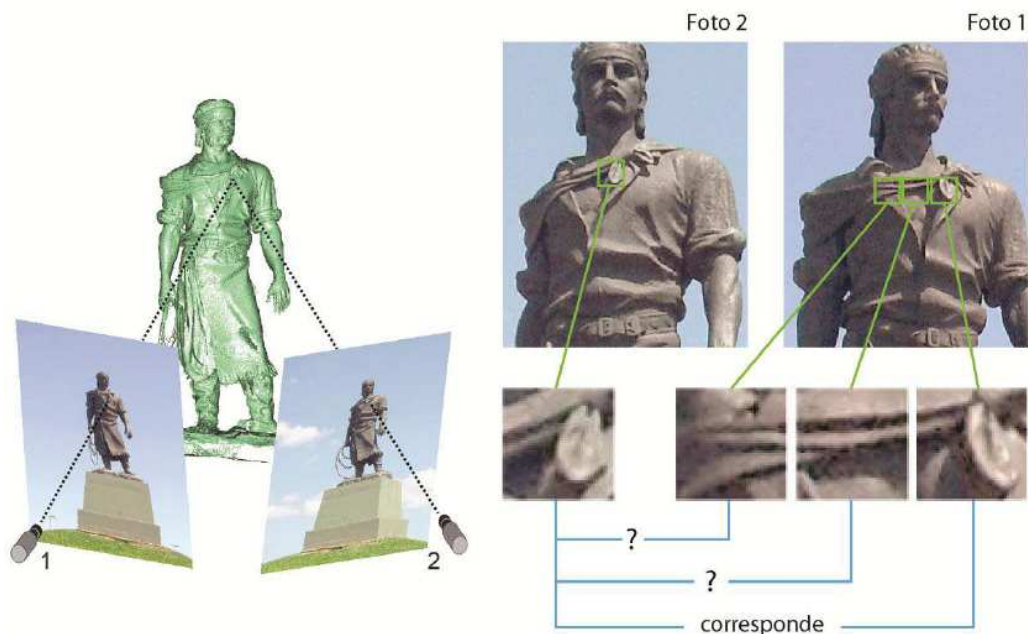
Tang e colaboradores (2002) afirmam que os métodos de *stereo matching* são correspondências baseadas em janelas, que comparam similaridades de conjunto de píxeis vizinhos entre as imagens para identificar se os pontos centrais das janelas são pontos de pares correspondentes.

Por meio de cálculos específicos são identificadas com precisão a posição e a orientação da câmera no instante do registro fotográfico. Posteriormente, as imagens são comparadas, tendo como referência as marcas de contrastes, com o intuito de definir a melhor sobreposição entre estas. Assim, conforme detalhado por Walford (2009), quando são encontradas as correspondências ideais, a posição e a orientação das fotografias são utilizadas para calcular a localização do ponto no espaço tridimensional.

Em outras palavras, os programas de digitalização baseada em fotografias comparam pequenas áreas compostas por conjunto de píxeis da imagem digital presentes em duas ou mais fotos que, por sua vez, são formadas pelas texturas ou marcas de contrastes da superfície do objeto ou cena. O processo de comparação segue-se até o programa encontrar as melhores correspondências entre as imagens. Quando as correspondências ótimas ou ideais são encontradas, a informação da posição e orientação já computada para as fotografias é usada para calcular a localização do ponto no espaço.

A Figura 39 exemplifica o princípio da digitalização baseada em fotografias, exemplificando o processo de escaneamento das imagens até que sejam encontrados os pontos correspondentes ou *matches*, termo em inglês utilizado para designar a associação ou identificação automática de padrões idênticos.

Figura 39 – Identificação de pontos correspondentes em imagens obtidas de pontos distintos



Fonte: Silva (2011).

Portanto, quando uma grade regular é identificada na Foto 1 e encontrada a ótima região correspondente na Foto 2, tem-se como resultado o posicionamento de um ponto tridimensional pertencente à nuvem de pontos. Para tanto e por uma maior eficiência, a superfície deve possuir uma textura irregular, ou melhor, possuir um padrão aleatório. A Figura 40 apresenta o resultado da correspondência automática, onde os pontos correspondentes podem ser vistos em partes da fachada do edifício.

Figura 40 - Modelo com a identificação dos pontos correspondentes



Fonte: próprio autor.

Quanto aos parâmetros de orientação interna (distância focal, posição do ponto principal e distorções da lente), esses, segundo Groetelaars (2004), podem ser obtidos a partir do certificado de calibração fornecido pelo fabricante das câmeras métricas ou a partir de etapas de calibração para câmeras não métricas, reconstruindo o sistema interno da câmera. Assim, os programas utilizam-se das informações da câmera para construir uma relação geométrica entre os pontos da fotografia e os pontos do espaço tridimensional.

Um dos programas existentes no mercado, o PhotoModeler Scanner, permite obter os parâmetros de orientação interna a partir de malhas de calibração e faz-se importante mencionar que o processo de calibração é extremamente necessário quando se requer maior precisão dos resultados. São dois os tipos de malhas de calibração existentes para este programa: o *multi-sheet calibration* e o *single-sheet calibration* (Figura 41). O primeiro é indicado para objetos de maiores dimensões, principalmente edificações, enquanto que o segundo divide-se em:

- *large sheet*: 36 x 36 polegadas, para objetos de tamanho médio;
- *single sheet*: 8,5 x 11 polegadas, para pequenos objetos ou levantamentos menos rigorosos.

Figura 41 - (a) *Multi-sheet calibration*; (b) *Single-sheet calibration*



(a)

(b)

Fonte: Photomodeler... (2013).

Para levantamentos menos rigorosos e quando não há o arquivo de calibração da câmera, é possível usar a opção disponível no PhotoModeler que possibilita uma solução dos parâmetros por aproximação, com base nas informações do EXIF das imagens. Após a inserção do arquivo de calibração como etapa precípua, esse *software* segue com as etapas de detecção de características, correspondência e marcação, e orientação.

Diferentemente por utilizarem-se do método SFM (*Structure from Motion*), a geometria de projeção e a nuvem de pontos esparsa podem ser calculadas simultaneamente em alguns programas, sem a necessidade das etapas de calibração da câmera (orientação interna). SFM é um tipo de processamento baseado em algoritmos *bundler*, *multicore bundle adjustment* e outros, e permite que as etapas de processamento e de calibração aconteçam simultaneamente.

Lopez (2013) comenta que SFM é um processo que integra ferramentas e métodos de geometria de múltipla visão, processamento de imagem e regressão estática para obter a reconstrução da cena tridimensionalmente a partir de uma sequência de imagens tiradas de uma câmera ao redor de uma cena.

SFM permite a construção da cena tridimensionalmente e do movimento da câmera a partir de uma sequência de imagens bidimensionais capturadas pela câmera ao movimentar-se em torno da cena, realizando, dessa maneira, o alinhamento das imagens (SZELISKI, 2010). Para tanto, o algoritmo SFM detecta pontos característicos da imagem, isto é, várias semelhanças geométricas, como: bordas do objeto ou detalhes específicos e, posteriormente, monitora o movimento destes pontos ao longo da sequência de imagens (VERHOEVEN, 2011).

De acordo com Koutsoudis *et al.* (2013), o método SFM utiliza-se de um conjunto de imagens desordenadas da cena estática ou do objeto a partir de pontos de vista arbitrários e tentativas de recuperar os parâmetros da câmera e reconstruir uma esparsa nuvem de pontos que representa a geometria 3D da cena ou do objeto.

3.5.3.2 Nuvem de pontos esparsa

O resultado final da correspondência de pontos automática é uma nuvem de pontos esparsa ou de baixa densidade, também descrita por Koutsoudis e colaboradores (2013) como nuvem de pontos parcial ou dados brutos, e que também define a geometria do objeto ou da cena. Esses autores comentam que no processamento parcial em determinados programas ocorrem duas fases: a fase *cleaning* e o alinhamento das fotografias, onde a fase *cleaning* está relacionada à remoção dos dados não desejados, como: as áreas de superfície mal capturadas, áreas pertencentes a outros objetos e pontos distantes.

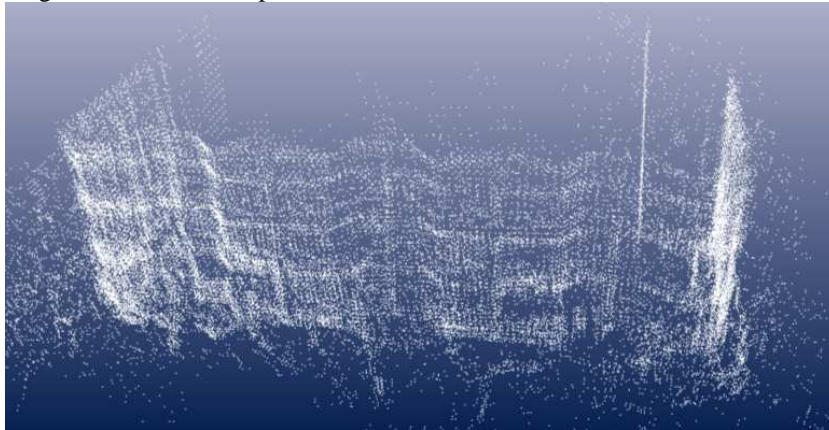
Li e colaboradores (2013) ponderam que o método de geração de nuvem de pontos por DSM ainda apresenta problemas devido aos seguintes aspectos:

- a) ruído (*noise*);
- b) áreas com ausência de textura (*textureless regions*);
- c) descontinuidades de disparidades (*disparity discontinuities*);
- d) oclusões (*occlusions*).

Os dados brutos podem possuir ruídos como característica, isto é, deslocamentos espaciais aleatórios dos vértices em torno da superfície real ao ser digitalizada. Em comparação a outras técnicas de digitalização, tais como *laser scanning*, técnicas baseadas em imagem sofrem mais problemas de ruído. Desse modo, a filtragem de ruídos é um passo essencial no que exige uma aplicação cuidadosa, uma vez que os ruídos afetam os detalhes morfológicos finos (KOUTSOUDIS *et al.*, 2013).

Os ruídos são gerados pelos seguintes fatores: variações inevitáveis de luminosidade, desfocagem da imagem e existência de ruído no sensor no momento da formação da imagem, causando poluição da imagem (LI *et al.*, 2013). A Figura 42 apresenta um modelo com uma elevada quantidade de ruído, gerando pontos fora da geometria do objeto.

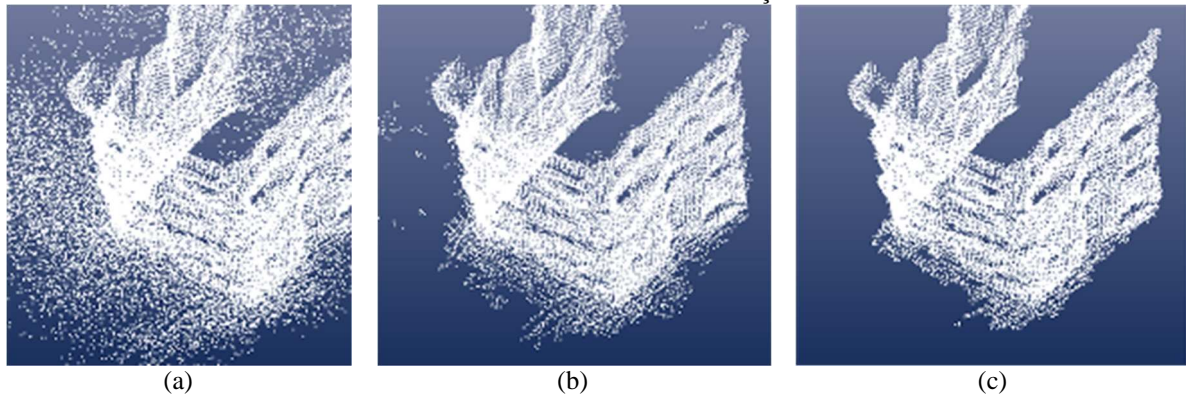
Figura 42 - Nuvem de pontos de baixa densidade com ruídos de um edifício



Fonte: próprio autor.

Como exemplo de alguns filtros desenvolvidos para o PhotoModeler Scanner pela EOS Systems com a finalidade de reduzir os ruídos, obtendo uma nuvem de pontos mais limpa, são destacados: o filtro estatístico, que remove tanto os pontos redundantes quanto os pontos discrepantes e o filtro de vizinhança, que adicionalmente aos filtros de aglomerações isoladas remove os pontos fora da sintonia fina (Figura 43).











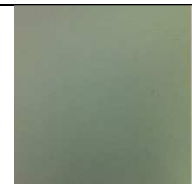
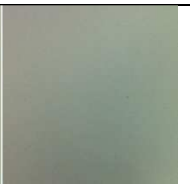
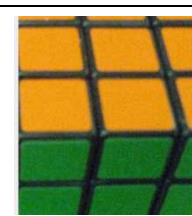
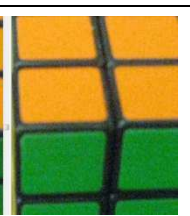
Figura 43 - (a) Modelo com ruídos; (b) Modelo com a aplicação do filtro estatístico; (c) Modelo com a aplicação do filtro estatístico e de vizinhança



Fonte: PhotoModeler's... (2013).

A ausência de texturas no modelo é caracterizada por áreas com texturas pobres, isto é, texturas com padrões repetitivos ou de pouca aleatoriedade e que dificultam o processo de *smartmatches*. O Quadro 8 contém as ilustrações de algumas superfícies propostas pelo artigo da EOS Systems (2012). As diferentes superfícies apresentadas demonstram desde as superfícies excelentes até as superfícies pobres para o desenvolvimento de trabalhos a partir da técnica de DSM.

Quadro 8 - Classificação das superfícies

Classificação	Imagens	
Superfícies com excelentes texturas		
		
Superfícies com boas texturas		
Superfícies com texturas aplicáveis		
Superfícies com texturas aplicáveis		
Superfícies com pobres texturas		
		

Fonte: Real... (2013).

Quando há partes do objeto que não apresentam texturas favoráveis para o reconhecimento automático, torna-se comum surgirem áreas com pouco ou nenhum ponto correspondente associado, como pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 – Imagem da fachada de um edifício processada em um programa de fotogrametria digital: (a) Superfície com fraca textura; (b) Poucos *matches* sobre o modelo geométrico



Fonte: próprio autor.

Um aspecto que deve ser levado em consideração é que a aparência aleatória da textura também dependerá da escala. A textura da superfície a uma distância pode parecer inexpressiva, mas, ao aproximar-se, uma superfície com textura apropriada à técnica de DSM pode ser revelada. Dessa maneira, uma superfície pode torna-se adequada ao empregarem-se câmeras com alta resolução ou por uma menor distância entre a câmera e o objeto a ser registrado.

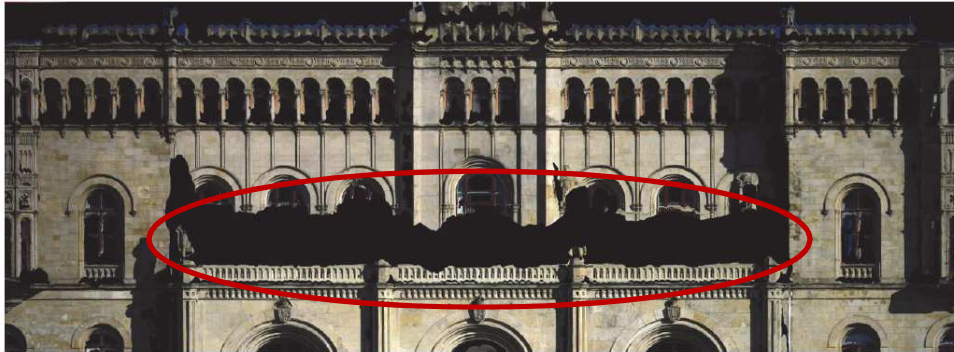
Li e colaboradores (2013) comentam que desde que as discontinuidades de disparidades apareçam frequentemente nos limites (contornos ou bordas) do objeto, a restrição de suavidade deve ser responsável por quebrar esses limites. Porém, detectar com precisão os contornos do objeto não é uma tarefa fácil, o que tem levado pesquisadores a desenvolver soluções para as discontinuidades de disparidades.

As oclusões são devido a conjuntos de píxeis que podem aparecer numa imagem e não aparecerem em outra imagem e que são necessários para a correspondência de pontos. Koutsoudis e colaboradores (2013) afirmam que devido à oclusão de partes do objeto ou da cena pela limitação de acessibilidade ou características da superfície, vazios (*holes*) surgem em cada varredura parcial.

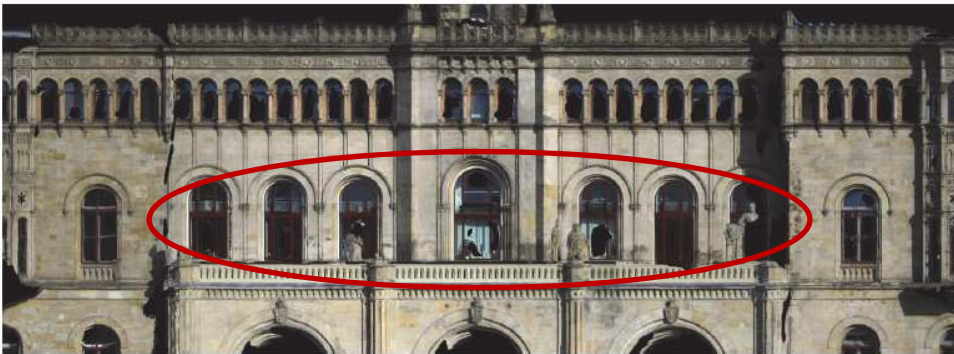
Reich e colaboradores (2012) explicam também que por causa da captura em perspectiva central e da posição da câmera no momento da obtenção das imagens, assim como a presença de elementos ou superfícies salientes e reentrantes, o produto final pode possuir oclusões, criando

vazios no produto final pela ausência de informações, como demonstrado na Figura 45 (a), onde parte da fachada é representada por manchas negras.

Figura 45 – Modelo do edifício Welfenschloss: (a) Ortoimagem de parte do edifício Welfenschloss obtida por fotografia terrestre; (b) Ortoimagem de parte do edifício Welfenschloss obtida por fotografia aérea



(a)



(b)

Fonte: Reich e colaboradores (2012).

A redução das oclusões é possível porque uma vez que todas as imagens são “costuradas” as partes ocluídas são minimizadas e quanto maior a diversidade de pontos de captura das imagens menor será o número e o tamanho das oclusões.

O procedimento para preenchimento dos buracos pode ser realizado em duas etapas. O primeiro passo é identificar as áreas com os dados em falta. Para as pequenas regiões, isso pode ser conseguido automaticamente através do processamento de dados 3D, mas para as grandes áreas é necessária a contribuição do usuário para uma identificação precisa. Uma vez passada essa fase, de identificação, a reconstrução das áreas com dados em falta é executada por meio de algoritmos que levam em consideração as tendências das curvaturas dos limites do vazio. Preencher vazios de superfícies complexas não é uma tarefa simples e pode ser baseada em suposições sobre a topologia dos dados em falta (KOUTSOUDIS *et al.*, 2013).

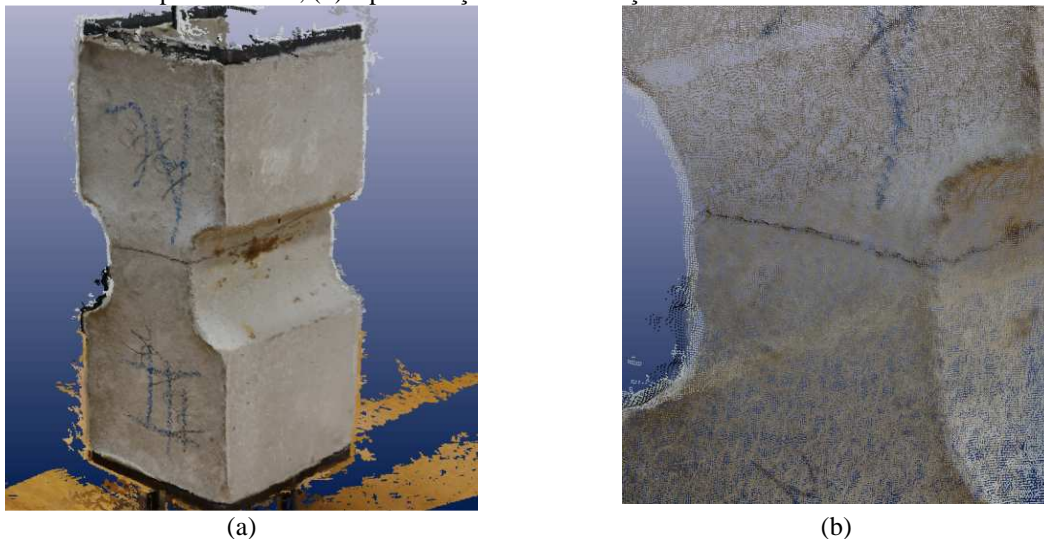
Por fim, Li e colaboradores (2013) afirmam que um bom algoritmo de correspondência estéreo deve filtrar ruídos, suavizar a disparidade nas áreas com texturas inapropriadas, preservando a disparidade de descontinuidade nas bordas dos objetos.

3.5.3.3 Nuvem de pontos densa

Após a etapa de reconstrução da nuvem de pontos esparsa, há a transformação destes dados numa nuvem de pontos densa, onde, segundo Verhoeven (2011), a maioria dos detalhes geométricos do objeto ou da cena é construída.

Falkingham (2012) diz que com a finalidade de gerar uma nuvem de pontos de alta densidade a partir de várias imagens e com informações sobre a posição da câmera e a nuvem de pontos esparsa gerada, programas *Multi-view Stereo* (MVS) são usados. Scharstein e Szeliski (2002) comentam que enquanto os algoritmos SFM operam em um conjunto esparsos de pontos característicos extraídos das fotografias de origem, os algoritmos de reconstrução densa operam sobre os valores de píxeis e como todos os píxeis são utilizados, esta etapa de reconstrução permite o tratamento adequado dos detalhes finos presentes na cena, assim como os representa com a aparência de uma malha (Figura 46).

Figura 46 – Corpo de prova modelado no programa PhotoScan: (a) Modelo de reconstrução por nuvem de pontos densa; (b) Aproximação da visualização do modelo e a visão dos vazios.



Fonte: próprio autor.

Nesta etapa, todos os detalhes geométricos são construídos por meio de uma densa nuvem de pontos sobre as imagens alinhadas. Deste modo, Seitz e colaboradores (2006) afirmam que o

objetivo do MVS é reconstruir um modelo geométrico completo a partir de um conjunto de imagens obtidas de câmeras com conhecidos pontos de captura.

Comparando-se aos processos por varredura a laser (*laser scanning*), a obtenção de nuvens de pontos por processamento digital de imagens possui a vantagem de que os pontos da nuvem já possuem o atributo das cores do objeto fotografado e, inclusive, os demais aspectos reais decorrentes do envelhecimento, como as ações de degradação e também outros fatores.

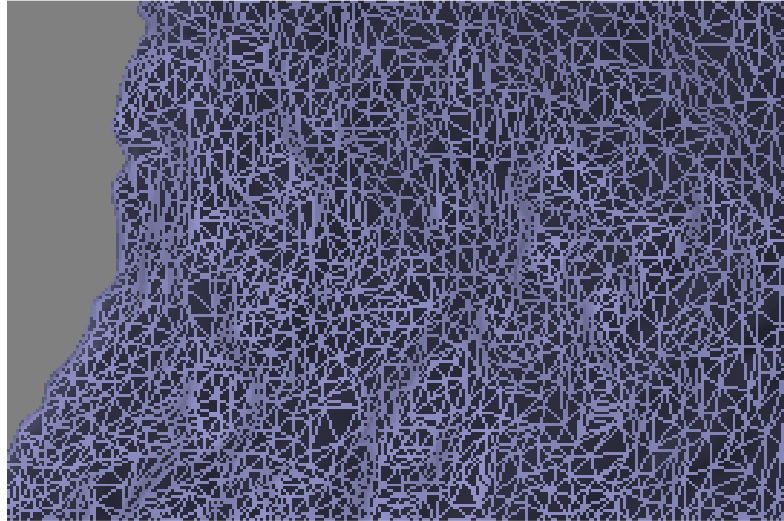
Conforme Koutsoudis e colaboradores (2013), existem uma série de programas que implementam algoritmos SFM e *Dense Multi-View 3D Reconstruction* (DMVR), assim citado pelos autores, como o PhotoScan que se tem apresentado como uma ferramenta de baixo custo.

3.5.3.4 Processamento de malhas (*mesh*) ou pós-processamento

De acordo com Koutsoudis e colaboradores (2013), a transformação de dados de nuvem de pontos em malhas (*mesh*) é um procedimento de agrupamento de vértices da nuvem, ou seja, as malhas são superfícies obtidas por modelos de pontos e operações de modelagem. *Mesh* é a forma mais comum de representar um modelo de superfície, que se caracterizam por um arranjo espacial de polígonos adjacentes, compartilhando arestas da superfície de fronteira do objeto.

Dentre os vários tipos de polígonos possíveis quanto ao número de lados e tamanho, a distribuição irregular em formato de triângulos recebe o nome de malha ou rede triangular irregular, do inglês *Triangulated Irregular Network* (TIN). Estes são modelos formados por triângulos adjacentes a partir de pontos de coordenadas tridimensionais irregularmente distribuídos em uma superfície. A malha TIN pode ser gerada automaticamente a partir de nuvem de pontos, em que se faz necessário, em alguns casos, editar a malha para preencher os vazios e, assim, construir um modelo de superfície estanque (Figura 47).

Figura 47 - Modelo de malhas triangulares gerado em um corpo de prova



Fonte: próprio autor.

Malhas regulares, irregulares ou mistas também podem ser geradas e as malhas regulares podem ser chamadas genericamente de rede ou *grid*.

3.5.4 Ferramentas para DSM

Segundo Groetelaars (2015), as ferramentas para geração de nuvem de pontos podem ser divididas em três grupos, citando-se: processamento remoto gratuito via *web*, programas livres gratuitos ou *open source* e programas comerciais. Os programas via *web* possuem facilidade no modo de operação e grande velocidade para geração de modelos devido aos servidores de alto desempenho. Porém, apresentam poucos recursos de edição e restrições de uso, além do domínio dos dados passarem a ser dos fornecedores dos serviços.

Os programas livres gratuitos estão disponíveis gratuitamente para *download* e são, geralmente, desenvolvidos por instituições de ensino e pesquisa. Os programas comerciais podem ter custos relativamente elevados a depender do programa, a necessidade de etapas de calibração da câmera, possibilidades de edição e definição da malha. O Quadro 9 apresenta alguns dos programas e suas respectivas classificações, de acordo com Groetelaars (2015).

Quadro 9 - Classificação para ferramentas de nuvem de pontos

Processamento remoto gratuito via web	Programas livres gratuitos	Programas Comerciais
Autodesk 123D Catch ARC 3D Microsoft Photosynth Hypr3D My3Dscanner	VisualSfM Structure from Motion Toolkit APER0-MicMac	PhotoScan Agisoft LLC PhotoModeler Scanner Zscan ShapeScan_SM Smart3Dcapture scanner 4e software EVO (EVOcapture, EVOcheck, UMap e SiteManager)

Fonte: Groetelaars (2015).

Alguns desses programas, como o VisualSfM, não geram modelos de superfícies, mas somente os modelos geométricos por nuvens de pontos esparsa ou densa. No caso específico do VisualSfM para a geração da nuvem densa, o *software* CMVS, desenvolvido por Yasutaka Furukawa, deve ser usado em conjunto para a criação de nuvens densas. No entanto, é possível gerar modelos de malha TIN a partir das nuvens de pontos importadas para programas específicos, como o Meshlab.

3.6 RESTITUIÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DIGITAL

Groetelaars (2004) afirma que a restituição fotogramétrica pode representar o processo de obtenção da representação gráfica ou numérica de um objeto a partir das fotografias ou o produto final desse processo. Para a fotogrametria digital, a restituição classifica-se quanto ao processo, sempre digital, e quanto ao número de fotografias empregadas: monorrestituição, estereorrestituição e restituição a partir de várias fotografias.

A Figura 48 apresenta o posicionamento das câmeras para a monorrestituição e para a estereorrestituição. No item restituição a partir de várias fotos, serão apresentados os detalhes sobre posicionamento para as tomadas fotográficas, tanto para o processamento interativo, quanto para o processamento semiautomático e automático.

Figura 48 – Exemplos de tomada fotográfica: (a) Monorrestituição; (b) Estereorrestituição



Fonte: Groetelaars (2015).

3.6.1 Monorrestituição digital

A monorrestituição é a técnica que permite a restituição a partir de somente uma fotografia (GROETELAARS; AMORIM, 2008). No entanto, um ponto (X, Y) numa fotografia pode corresponder a um ponto (X, Y, Z) qualquer no espaço-objeto, tornando impossível a resolução do problema fotogramétrico com uma única imagem do objeto. Contudo, havendo informações sobre a forma do objeto (paralelismo, perpendicularismo de arestas e coplanaridade de determinados pontos) é possível restituir o objeto e reconstruir a posição da câmera no momento do registro fotográfico (GROETELAARS, 2004).

Assim, a partir de uma fotografia é possível retificar imagens de objetos, ou seja, obter informações sobre a geometria com precisão satisfatória pelo processo chamado retificação. Porém, faz-se necessário o conhecimento das coordenadas (X, Y) de quatro pontos de controle identificáveis do objeto e é uma técnica apropriada para objetos que possuem pouca mudança de profundidade.

A técnica de monorrestituição digital é corrente em trabalhos que tem como objetivo a retificação de imagens, principalmente para objetos com formas geométricas retangulares em suas extremidades (arestas paralelas e perpendiculares) (GROETELAARS; AMORIM, 2008). Dentre os programas que permitem realizar a restituição a partir de uma imagem, têm-se: o DigiCAD 3D, o Elconvision e, destacando-se, principalmente, o PhotoModeler (GROETELAARS, 2004).

Hanke e Grussenmeyer (2002) destacam que a relação do plano do objeto com o plano da imagem é descrita pela equação de projetiva de dois planos, onde X e Y são as coordenadas de

um plano do objeto e x e y são as coordenadas medidas na imagem e a_i , b_i e c_i são os parâmetros que descrevem a relação projetiva, conforme Equações (6) e (7).

$$X = \frac{a1 \cdot x + a2 \cdot y + a3}{c1 \cdot y + c2 \cdot y + 1} \quad (6)$$

$$Y = \frac{b1 \cdot x + b2 \cdot y + b3}{c1 \cdot y + c2 \cdot y + 1} \quad (7)$$

Os mesmos autores afirmam que coordenadas bidimensionais de pontos arbitrários em uma superfície podem ser calculadas usando as Equações (6) e (7). Técnicas de processamento digital aplicam estas equações para cada píxel e assim produzem vistas ortográficas das superfícies dos objetos, chamadas de ortoimagens (Figura 49).

Figura 49 – Experimento realizado em imagem de uma edificação: (a) Foto original; (b) Ortoimagem retificada em escala



Fonte: Hanke e Grussenmeyer (2002).

3.6.2 Estereorrestituição

A estereorrestituição utiliza-se de duas fotografias do mesmo objeto obtidas de centros perspectivos distintos, estando os eixos óticos da câmera paralelos entre si, no momento da tomada fotográfica e perpendiculares ao plano principal do objeto (HANKE; GRUSSENMEYER, 2002).

Groetelaars (2004) lembra que esse método é similar à visão humana, garantindo a visualização estereoscópica do objeto e cada ponto do espaço-objeto é determinado pela identificação dos pontos homólogos nas imagens do objeto.

Uma das principais características da estereorrestituição é a possibilidade de criação de uma imagem ausente das deformações de perspectivas que ocorrem devido à inclinação do eixo da câmera e as mudanças de profundidade do objeto. Esse processo de retificação é chamado de ortorretificação ou ortoprojeção.

A ortorretificação digital é o processo realizado por algoritmos computacionais que reposicionam cada píxel da imagem de acordo com a projeção ortogonal de cada um destes, gerando a ortoimagem digital. As coordenadas do espaço-objeto (X, Y, Z) que fazem parte do modelo digital são transformadas em coordenadas do espaço-imagem (X, Y) a partir de equações de colinearidade (LÉON; SÁEZ, 2002 *apud* GROETELAARS, 2004).

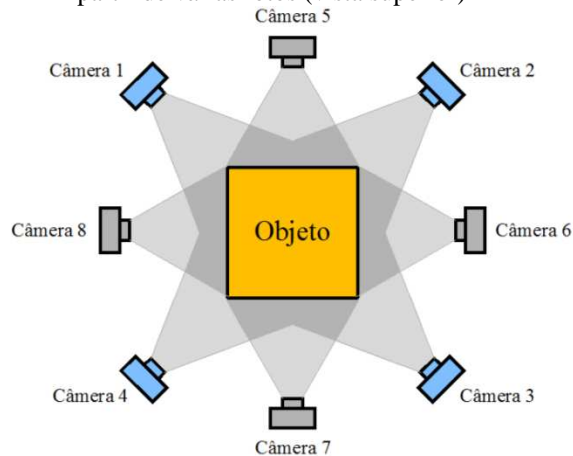
3.6.3 Restituição a partir de várias fotografias

Pode-se afirmar que o posicionamento da câmera no momento da captura das imagens e a quantidade de fotografias, assim como outros aspectos, estão relacionados diretamente à precisão a ser obtida pelo processamento interativo ou à capacidade de reconhecimento dos pontos homólogos para o processamento automático das imagens digitais.

3.6.3.1 Para o processamento interativo de imagens digitais

Para o processamento interativo, a técnica baseia-se na utilização de várias imagens do objeto, onde é importante que parte do objeto seja fotografada no mínimo 3 vezes, devendo-se ter uma fotografia frontal e outras duas com ângulos a 45° para cada lado da face do objeto (Figura 50). A precisão da localização dos pontos homólogos será obtida pelos aspectos citados anteriormente.

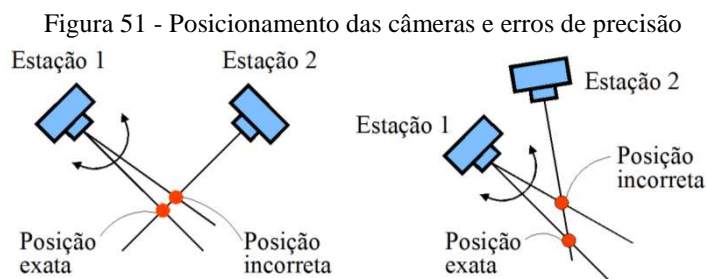
Figura 50 - Levantamento fotográfico indicado para a restituição a partir de várias fotos (vista superior)



Fonte: Groetelaars (2004).

A maior quantidade de fotografias reduzirá a probabilidade de erros na identificação de pontos, pois é difícil identificar a posição exata de um ponto a partir de somente uma fotografia. A fim de se minimizar essa possibilidade de erro, o ponto deve ser localizado em três ou mais fotografias, compensando o erro, caso esse seja identificado erroneamente quanto à posição em uma das fotografias.

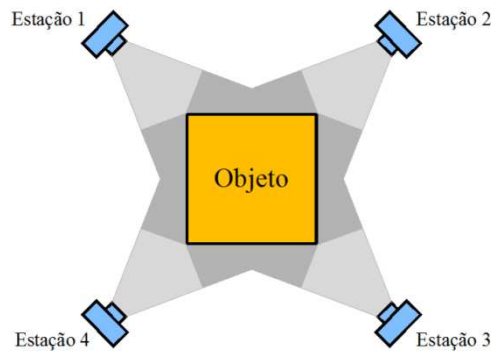
Outro aspecto relevante é que quando as câmeras estão posicionadas formando um ângulo aproximado entre si de 90° , tem-se uma maior precisão do ponto no modelo geométrico e a redução da possibilidade de erro. A Figura 51 apresenta o posicionamento das estações e a maneira de minimizar os erros e maximizar a precisão (GROETELAARS, 2004).



Fonte: Groetelaars (2004).

Para objetos com formas mais simples, como uma caixa, as fotografias podem ser tomadas a partir de estações posicionadas nos vértices do objeto e também em um mesmo nível, como ilustrado na Figura 52.

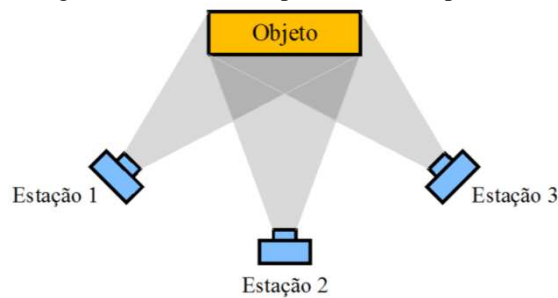
Figura 52 - Posicionamento das câmeras para tomadas fotográficas de formas simples (vista superior)



Fonte: Méndez (2002).

De acordo com Méndez (2002), para fachadas de edificações, no mínimo três fotografias são necessárias, obedecendo aos requisitos citados anteriormente. Importante salientar que todos os pontos de interesse possam ser vistos pelo menos nestas três fotos.

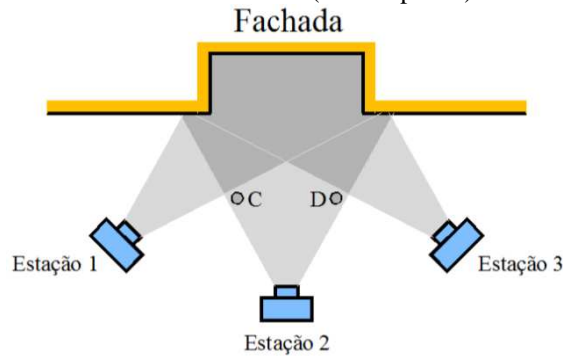
Figura 53 - Posicionamento das câmeras para tomadas fotográficas de fachadas planas (vista superior)



Fonte: Méndez (2002).

Haverá casos particulares, como fachadas que possuem em sua geometria partes reentrantes ou salientes, o que leva algumas de suas partes a serem capturadas nas fotografias por apenas 3 fotografias. Para obter o posicionamento correto dos demais pontos de interesse, é recomendado que fotos extras dos pontos C e D (Figura 54) sejam feitas, onde, assim, os pontos externos estarão representados nas cinco fotografias e os cantos internos em apenas três, para um elemento reentrante ao plano da fachada (MÉNDEZ, 2002).

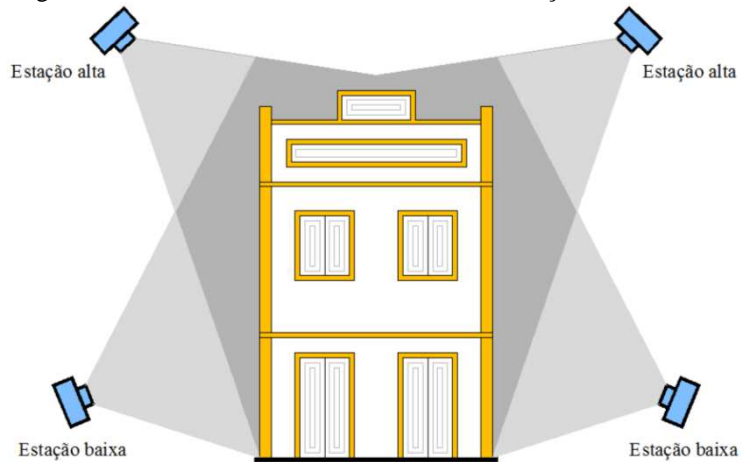
Figura 54 - Posicionamento das câmeras para edificações com reentrâncias (vista superior)



Fonte: Méndez (2002).

Detalhes presentes em partes superiores do edifício, muito distantes do solo, podem se tornar difíceis de serem identificados por se tornarem pequenos demais ao serem obtidos no nível do solo. Conforme Méndez (2002), uma das soluções seria fazer tomadas acima da linha da cobertura, utilizando-se de prédios adjacentes ou outros recursos, posicionando as câmeras o mais próximo possível de 90°, associando-as às fotos obtidas no plano do solo (Figura 55).

Figura 55 - Posicionamento das câmeras com estações altas e baixas



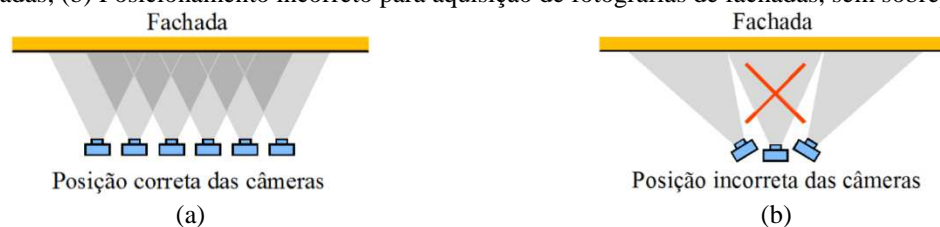
Fonte: Méndez (2002).

3.6.3.2 Para o processamento semiautomático ou automático de imagens digitais

A principal característica do posicionamento das estações para as tomadas fotográficas é o paralelismo entre si, com uma tolerância de até 10 graus, e devem estar sempre perpendiculares ao plano do objeto de interesse, como ilustrado na Figura 56. No caso de se desejar obter toda a geometria do objeto, a aquisição das imagens deve seguir o posicionamento das câmeras demonstrado na Figura 56 e Figura 57. Outro aspecto também apontado por Groetelaars e Amorim (2012) é que cada parte do objeto deverá ser fotografada pelo menos em três posições

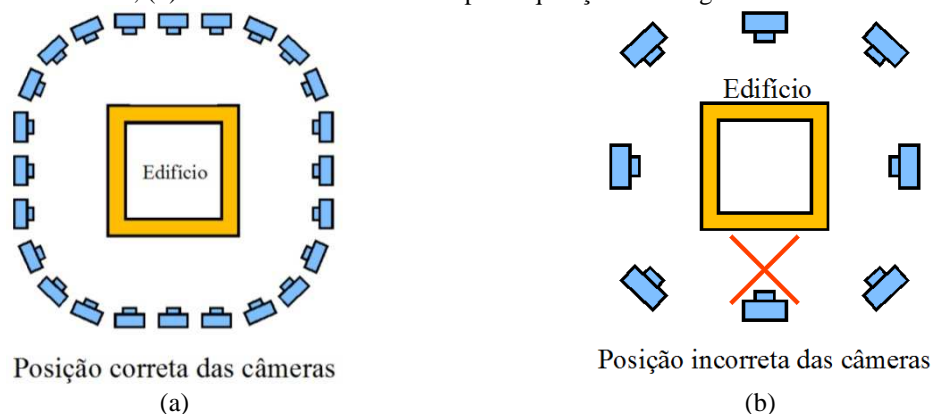
diferentes. Estes aspectos são importantes para maximizar os procedimentos referentes às correlações automáticas dos programas.

Figura 56 – Posicionamento das tomadas fotográficas: (a) Posicionamento correto para aquisição de fotografias de fachadas; (b) Posicionamento incorreto para aquisição de fotografias de fachadas, sem sobreposição



Fonte: Adaptado de Agisoft LLC (2014).

Figura 57 – Posicionamento das tomadas fotográficas: (a) Posicionamento correto para aquisição de fotografias em torno de um edifício; (b) Posicionamento incorreto para aquisição de fotografias em torno de um edifício



Fonte: Adaptado de Agisoft LLC (2014).

De acordo com Pierrot-Deseilligny e colaboradores (2011), deve-se garantir a sobreposição mínima de 80% de uma fotografia para a seguinte, a fim de se assegurar a detecção automática dos pontos homólogos e, conseqüentemente, a orientação da imagem. Outro aspecto relevante é que seja garantida a relação da Equação (8).

$$R = B / L \tag{8}$$

Em que R é o intervalo de $0,1 < R < 0,5$, B é a distância entre a posição das estações na tomada fotográfica e L a distância das estações para o objeto fotografado (BRITO *et al.*, 2012; GROETELLARS, 2015).

No entanto, outros autores afirmam que alguns programas de processamento podem lidar com ângulos de incidência entre 45° e 90° , especificamente o PhotoScan (VERHOEVEN, 2011), permitindo, assim, desde processar imagens aéreas verticais e oblíquas baixa.

Outro diferencial do programa PhotoScan é que há somente como premissa que o mesmo objeto ou cena, ou parte desses, sejam visualizadas somente em duas imagens com centros perspectivos distintos e tanto Verhoeven (2011) quanto Koutsoudis e colaboradores (2013) não mencionam os valores de sobreposição necessários para se obterem resultados precisos em seus trabalhos. Em suas conclusões, Verhoeven (2011) afirma que qualquer parte que seja visível em pelo menos duas imagens pode ser reconstruída por esse programa.

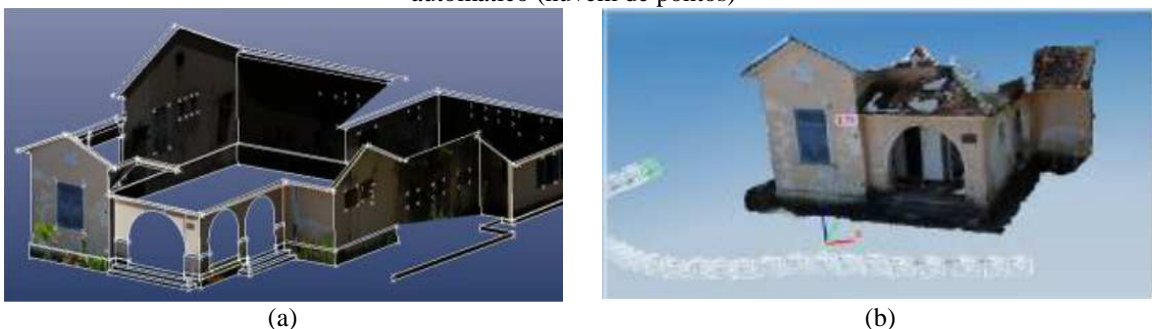
Entretanto, Amorim e colaboradores (2012) concluem que para reduzir as altas distorções em bordas da imagem, áreas de sobreposição acima de 60% em sentido longitudinal e lateral são necessárias para imagens capturadas por veículos aéreos não tripulados.

3.7 FOTOGRAMETRIA COMO MÉTODO DE GERAÇÃO DE MAPAS DE DANOS

Conforme ressaltado por Valença (2011), as primeiras aplicações da fotogrametria na engenharia de estruturas tinham apenas a finalidade de levantamento geométrico. As aplicações na reconstrução bidimensional de fachadas de edifícios, monumentos históricos e de modelos geométricos são aplicações recentes da fotogrametria arquitetônica.

Groetelaars (2015) comenta a necessidade da documentação arquitetônica, seja de edifícios novos ou históricos de interesse cultural, com a finalidade de acompanhamento das mudanças ocorridas e operações de manutenção, reforma, renovação ou restauração. No trabalho de Guimarães, Groetelaars e Amorim (2012) e Brito, Groetelaars e Amorim (2012) foram produzidos, de uma mesma edificação, dois modelos, respectivamente: modelo fotorrealístico de superfícies por processamento interativo (PhotoModeler Scanner) e por geração de nuvem de pontos (processamento automático no 123D Catch).

Figura 58 – Modelos de uma edificação – Casa Rosa: (a) Processamento interativo; (b) Processamento automático (nuvem de pontos)



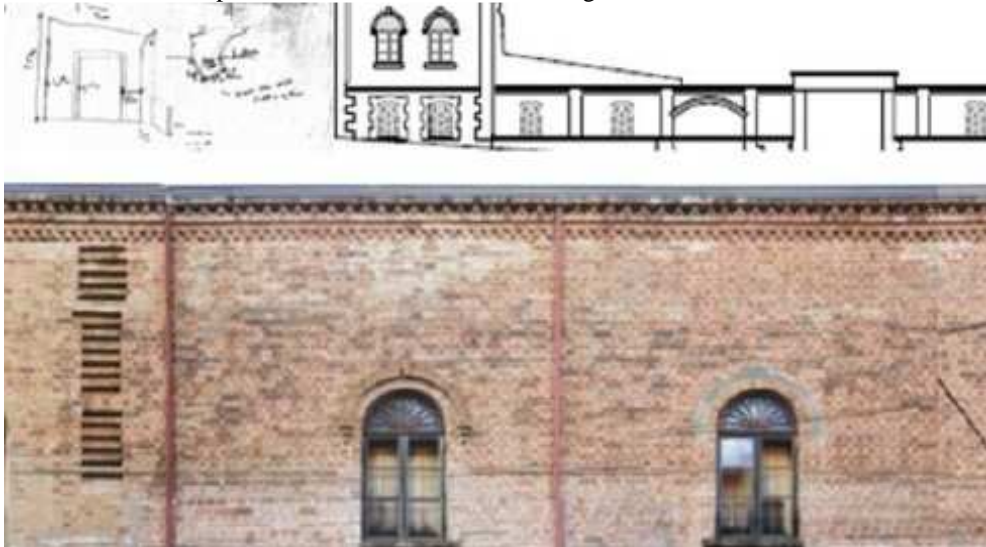
Fonte: Guimarães, Groetelaars e Amorim (2012) e Brito, Groetelaars e Amorim (2012).

A aplicação das técnicas fotogramétricas passa a tornar-se importante para o mapeamento de danos quando não se possui as representações em desenho da fachada. Essas técnicas também têm se mostrado interessante para os levantamentos de fachadas com formas complexas, pois, numa segunda etapa descrita como vetorização, que se baseia, principalmente, na utilização de programas CAD para desenhar as fachadas, representá-las em formato bidimensional tem se tornado tarefa prática.

Como outro aspecto importante, destaca-se que por meio dos produtos fotogramétricos de edifícios obtêm-se as características físicas no momento dos registros fotográficos, o que permite o levantamento e quantificação de manifestações patológicas com alta precisão em ortoimagens de fachadas, como exemplo da aplicação da fotogrametria.

Tirello e Correa (2012) relatam que fazer os desenhos de edifícios históricos é registrar as mudanças ocorridas no passar do tempo, além da sua geometria imediatamente observável. Assim, neste trabalho foram adotados métodos distintos para as representações das edificações, com a finalidade de geração dos mapas de danos. Um desses métodos foi o de levantamento métrico direto associado aos sistemas de fotogrametria terrestre, visando o desenho preciso das fachadas. Por meio das fotografias, foram criados mosaicos retificados com a ajuda de programas específicos, eliminando-se as deformações, necessários para os estudos direcionados à análise das degradações e estratificações arquitetônicas não documentadas.

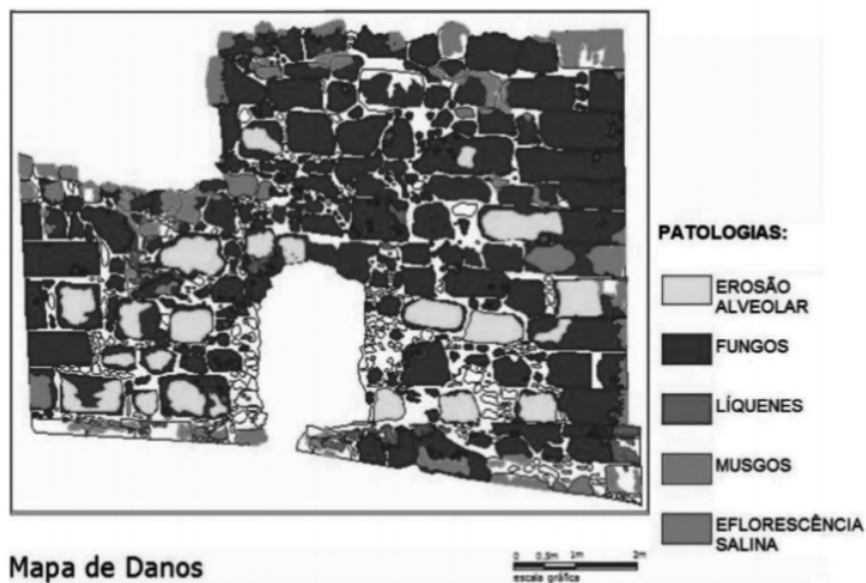
Figura 59 - Desenhos de levantamento *in situ* que associados à imagens fotogramétricas possibilitam, entre outros produtos, a desenhos em CAD das elevações em escala, de edifícios de grandes dimensões; Abaixo, imagem de alta definição, sem deformações, obtida por meio de retificação fotográfica a partir de procedimentos relacionados à fotogrametria terrestre



Fonte: Tirello e Correa (2012).

Costa e Amorim (2009) aplicaram uma metodologia para geração de mapa de danos a partir da fotogrametria digital. A técnica foi aplicada para as ruínas da Casa da Torre ou Castelo Garcia D'Ávila, localizado na Praia do Forte, Mata de São João – BA. Por meio do registro fotográfico, criaram-se ortoimagens do monumento e, posteriormente, a identificação dos danos, utilizando a vetorização no programa AutoCAD.

Figura 60 – Produto final: mapa de danos das ruínas do monumento da Casa da Torre Garcia D'Ávila – Praia do Forte



Fonte: Costa e Amorim (2009).

As manifestações patológicas identificadas por Costa e Amorim (2009) foram: erosão alveolar, eflorescência e presença de microrganismos (líquens, fungos e musgos). Os autores concluíram que a utilização de ortoimagens para a produção de mapas de danos trouxe ao trabalho simplicidade, rapidez e baixo custo, apesar da necessidade da realização de prospecções e investigações em laboratório para uma caracterização mais precisa dos problemas encontrados.

3.8 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CAPÍTULO 3

Este capítulo apresentou um pouco da história da fotogrametria, suas fases e princípios, até alcançar a fase mais atual: fotogrametria digital. Explicou sobre a técnica de DSM, que é o momento recente da fotogrametria digital, objetivando trazer vários aspectos que envolvem a aquisição de nuvem de pontos, método a ser adotado para a geração das ortoimagens, modelos de superfícies que serão utilizados para a geração de mapas de danos.

Dentre os aspectos relevantes, cita-se o posicionamento da câmera em relação à edificação, em que esta precisa estar o mais perpendicular ao objeto a ser fotografado, diferentemente da técnica de fotogrametria digital interativa. Outros aspectos importantes são a estimativa das distâncias entre as tomadas fotográficas devido à sobreposição das imagens e a dificuldade para criação de modelos com pouca textura ou as superfícies envidraçadas.

Uma vez que a câmera fotográfica necessita estar perpendicular ao objeto a ser fotografado, uma alternativa deve ser criada para que se possam registrar as fotografias de prédios altos, principalmente. Neste intuito, a utilização de VANT é uma poderosa ferramenta para aquisição dessas imagens. Para a aquisição de imagens através de VANTs, os veículos mais apropriados para captura de fotografias de fachadas de edifícios são os multirrotores porque possuem eficiência em voos ascendentes e descendentes.

Com a associação da fotogrametria digital - método de nuvem de pontos - e VANTs (aerofotogrametria), acredita-se que uma nova forma de inspeção predial pode ser implantada e consolidada, dando total suporte as etapas de manutenção, recuperação e revitalização de edificações de valor histórico ou não, embasada na precisão e no rápido levantamento físico dos edifícios, inclusive com as informações referentes às manifestações patológicas.

4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Primeiramente, por meio da revisão da literatura, faz-se necessário enfatizar que não há um consenso único sobre o domínio científico das disciplinas: visão computacional, processamento de imagens e análise de imagens, como também é dito por Gonzalez e Wood (2010), ao afirmarem que não existe um acordo geral em relação ao ponto em que cada disciplina começa e termina.

De acordo com Pedrini e Schwartz (2008), a visão computacional tem a finalidade de auxiliar a resolução de problemas complexos, imitando a cognição humana e a habilidade do ser humano em tomar decisões conforme as informações presentes em uma imagem. Ainda pelos autores, o segmento, no intuito de simplificar o estudo das tarefas, estabeleceu somente dois níveis: o baixo nível, que corresponde ao processamento de imagens e o alto nível voltado à análise de imagens.

Gonzalez e Wood (2010) acreditam num ponto lógico de sobreposição entre o processamento de imagens e a análise de imagens, que é a área de reconhecimento de regiões ou objetos individuais em uma imagem. Os autores relatam que não existem limites claros entre o processamento de imagens e a visão computacional, mas que três tipos de processos computacionais devem ser levados em consideração: de nível baixo, médio e alto. Diferentemente do apontado por Pedrini e Schwartz (2008), estes três processos, conforme descrição de Gonzalez e Wood (2010), definem-se em processos de:

- baixo nível que envolvem as operações primitivas, como o pré-processamento para reduzir ruídos, o realce de contraste e aguçamento de imagens;
- médio nível que são caracterizados por entradas serem as imagens e as saídas são atributos extraídos destas imagens, como contorno e a identificação de objetos individuais;
- alto nível que têm a finalidade de dar significado a um conjunto de objetos identificados.

Seguindo pensamento similar, Fu, Gonzalez e Lee (1987) consideram que o processamento de imagens pode também ser dividido em três amplas etapas: o processamento de baixo, médio e alto nível. O processamento de baixo nível abrange as tarefas básicas e possui o pré-

processamento como uma de suas operações. O processamento de nível médio compreende tarefas como a segmentação e o processamento de alto nível envolve a interpretação de um conjunto de objetos reconhecidos. Esta divisão demonstra somente a sofisticação envolvida nas implementações, pois se realizam de maneira contínua.

Como não é objetivo dessa tese prolongar-se na discussão sobre a terminologia para o segmento que se utiliza de sistemas computacionais para extração de informações de imagens digitais e também pela não unanimidade entre os diversos especialistas da área, tratar-se-á esse campo, neste estudo, como processamento digital de imagens. No entanto, compreende-se que processamento de digital de imagens pertence à ciência da visão computacional, como descrito por Szeliski (2010).

A seguir, serão apresentados temas que envolvem os aspectos gerais do processamento digital de imagens, descrevendo sobre as etapas, realce de imagens, espaço de cores e a utilização de linguagens computacionais, finalizando com as considerações gerais sobre o capítulo.

4.1 IMAGENS NO PDI

A estrutura básica de informação no PDI é a matriz, ou seja, um conjunto ordenado de elementos reais ou complexos. Este formato é naturalmente adequado para a representação de imagens, conjuntos ordenados de valor real de cores ou informação de intensidade. A maioria das imagens é armazenada como matrizes bidimensionais, na qual cada elemento de matriz corresponde a um único píxel da imagem exibida.

Gonzalez e Woods (2010) comentam que a imagem é definida como uma função dimensional $f(x,y)$, em que x e y são coordenadas espaciais e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x,y) é chamada de intensidade imagem neste ponto. Quando x , y e os valores de f são quantidades discretas e finitas a imagem é chamada de digital. Assim, uma imagem digital é composta de um número finito de elementos, em que cada elemento possui um valor e uma localização particular denominada píxel, como ilustrado na Figura 61.

Figura 61 - Imagem digital e intensidade de alguns tipos de píxeis



Fonte: Faria (2010).

Algumas imagens requerem uma matriz tridimensional, como as imagens *truecolor*. O primeiro plano da terceira dimensão representa a intensidade de píxeis vermelhos, o segundo de intensidades verdes e o terceiro de intensidades azuis.

Marques Filho e Vieira Neto (1999) relatam que o uso de cores em processamento digital de imagens procede a fatores motivantes e os principais são: a análise automática de imagens (reconhecimento de padrões), onde a cor aparece como um poderoso descritor das propriedades de um objeto, que pode simplificar sua identificação e segmentação; e a análise de imagens com intervenção humana, já que o olho humano pode discernir milhares de nuances de cores de diferentes matizes e intensidades, enquanto sua capacidade de distinguir diferentes escalas de cinza não passa de algumas poucas dezenas de escalas diferentes.

Solomon e Breckon (2013) explicam que a leitura e escrita de imagens são realizadas com específicas, como *imread* e *imwrite*, respectivamente, e que estas funções suportam os formatos mais comuns de imagens, além de criar ou exportar os conjuntos de matrizes bidimensionais ou tridimensionais. As linguagens computacionais também permitem a conversão entre os tipos de imagens, como a conversão para a escala de cinza e a conversão para o espaço de cores HSV.

4.1.1 Coordenadas de píxeis

O método mais conveniente para expressar a localização em uma imagem é por meio de coordenadas de píxeis. Por este sistema de coordenadas, a imagem é tratada como uma malha de elementos discretos, ordenadas de cima para baixo e da esquerda para a direita.

O píxel é um elemento de dimensões finitas na representação de uma imagem digital e, frequentemente, a organização de uma imagem sob a forma de uma matriz de píxeis é feita em uma simetria quadrada, ou seja, na forma de um tabuleiro de xadrez. Isto se deve a facilidade de implementação eletrônica, seja dos sistemas de aquisição seja dos sistemas de visualização de imagens (ALBUQUERQUE; ALBURQUERQUE, 2001).

4.1.2 Tipos de imagens processadas

Os tipos básicos de formatos de imagens são: binárias, indexadas, imagens em escalas de cinza ou *grayscale*, e *truecolor* ou sistema de cores RGB.

Numa imagem binária, cada píxel assume um dos valores discretos: 1 ou 0. Uma imagem binária é armazenada numa matriz lógica. As imagens binárias também são chamadas de variável BW.

As imagens indexadas consistem em uma matriz X e uma matriz *colormap* ou mapa de cores. Os valores de píxel na matriz são índices diretos em um mapa de cores. Por convenção, essa documentação utiliza o nome da variável X para referir-se a matriz e um mapa para se referir ao mapa de cores.

A imagem em escalas de cinza (*grayscale*) é uma matriz de dados cujos valores representam intensidades dentro de algum intervalo. Uma imagem em escalas de cinza é armazenada como uma matriz individual, com cada elemento de matriz correspondente a um píxel de imagem. Para uma matriz de classe única ou dupla, utilizando o padrão de mapa de cores em escalas de cinza, a intensidade 0 representa a cor preta e a intensidade 1 a cor branca. Segundo Solomon e Breckon (2013), as imagens em escalas de cinza, assim como as binárias, são representadas por conjuntos 2D que assumem um valor numérico para cada píxel, limitando-se a apenas um canal, caso diferente das imagens por sistema de cores RGB.

Imagens RGB (*truecolor*) são matrizes 3D ou possuidoras de três planos 2D distintos, cada um referente ao canal R (vermelho), G (verde) e B (azul). Esse espaço de cor é o mais utilizado para a representação das imagens digitais e a cor de cada píxel é determinada pela combinação da intensidade de vermelho, verde e azul armazenado em cada plano de cor na localização do

píxel. Assim, as imagens *truecolor* são armazenadas como uma matriz de dados $m \times n \times 3$, em que o número 3 define os componentes de cores citados.

Há várias formas alternativas de representar imagens em *truecolor*, isto é, cores reais. Estes espaços são tidos como espaços de cor perceptual e um dos mais populares voltados à análise de imagens é o espaço HSV, pois permite um grande grau de separação entre cor e iluminação. (SOLOMON; BRECKON, 2013).

4.1.3 Formatos de imagens

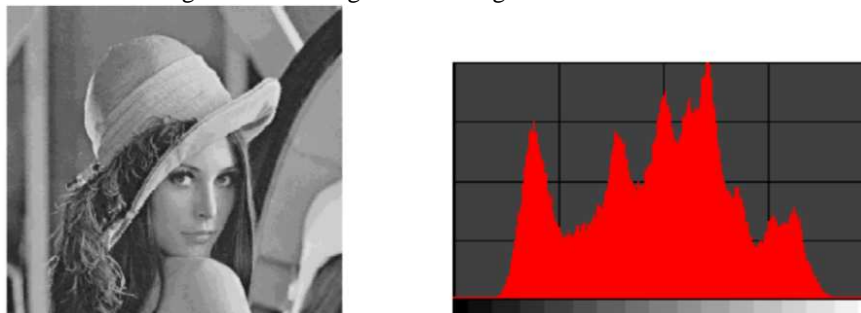
Os formatos padronizados de imagens digitais surgiram da necessidade de criação de métodos eficientes de exibição, armazenamento e transmissão de imagens. Segundo Solomon e Breckon (2013), os formatos são cabeçalhos de arquivos possuidores da informação sobre como os dados foram armazenados e os valores numéricos dos píxeis. O processamento permite o emprego de vários formatos, citando-se: GIF, JPEG, BMP, PNG e TIF.

4.1.4 Histograma

O histograma de uma imagem é a representação da distribuição de frequência da ocorrência de um conjunto de valores de píxeis. De acordo com Solomon e Breckon (2013), o histograma de uma imagem é uma função densidade de probabilidade discreta, pois define a probabilidade de ocorrência do valor de um píxel específico em uma imagem.

Scuri (2002) explica que o histograma é uma função estatística da imagem com a finalidade de apresentar quantos píxeis existem para cada tonalidade ou cor e que muitas operações se utilizam dessa informação para extrair resultados que se desejam.

Figura 62 – Histograma de imagem monocromática.



Fonte: Scuri (2002).

4.2 ESPAÇOS DE CORES

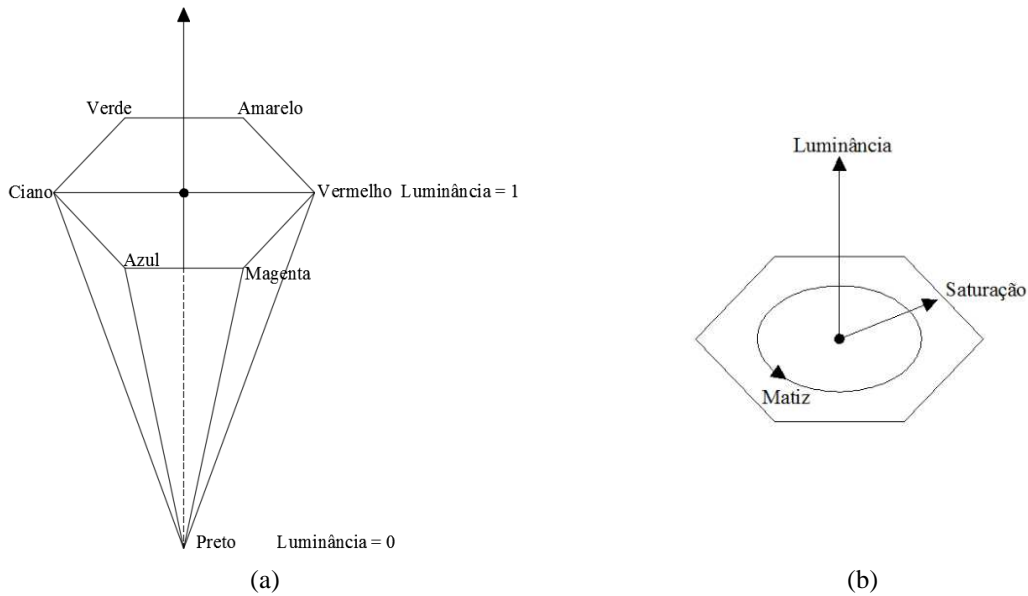
Espaços ou modelos ou sistemas de cores têm como finalidade atender aos diferentes dispositivos gráficos ou às suas aplicações a partir das especificações em um determinado formato. Estes espaços são representações tridimensionais e cada cor é determinada por um ponto específico no sistema de coordenadas do respectivo espaço de cores (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

De acordo com Gonzalez e Wood (2010), os espaços de cores mais utilizados no campo do processamento digital de imagens são: RGB (*Red, Green, Blue* – Vermelho, Ver, Azul), para monitores coloridos e uma ampla classe de câmeras de vídeo; CMY (*Cyan, Magenta, Yellow* – ciano, magenta, amarelo) e CMYK (*Cyan, Magenta, Yellow, Black* – ciano, magenta, amarelo, preto), ambos para a impressão colorida; e HSV, que corresponde à forma como o ser humano descreve e interpreta as cores. Outros modelos também são descritos na literatura, como: modelo de Mussell, modelo XYZ, modelo YIQ, modelo YUV, modelo HSL, dentre outros.

O espaço de cores HSV, segundo Conci e Azevedo (2003), foi desenvolvido por Alvey Ray Smith em 1978, baseado na maneira como o artista descreve e mistura as cores. Este espaço de cores representa três componentes: o matiz (*Hue*), a saturação (*Saturation*) e o valor ou brilho (*Value*). O matiz define a tonalidade predominante, abrangendo todas as cores do espectro e os valores de 0° a 360°. A saturação mede a pureza da cor, diferenciando a cor rosa da vermelha, por exemplo, em que a cor vermelha é a pura e a rosa é a cor vermelha com alguma adição da cor branca.

De acordo com Pedrini e Schwartz (2008), o espaço HSV é representado por uma pirâmide hexagonal derivada do cubo RGB, em que os diferentes matizes estão representados na parte superior da pirâmide, a saturação é medida ao longo do eixo horizontal e a luminância ao longo do eixo vertical, passando pelo centro da pirâmide, como ilustrado na Figura 63.

Figura 63 – Modelo HSV. (a) Representação gráfica do modelo; (b) Variação dos parâmetros no modelo HSV



Fonte: Pedrini e Schwartz (2008).

Os vértices da base da pirâmide correspondem às cores primárias (RGB) e as cores complementares (ciano, magenta e amarelo). A saturação possui a variação de 0 a 1 e é representada pela razão entre a pureza de um determinado matiz e sua pureza máxima ($S = 1$) e a luminância varia de 0 (cor preta) a 1, onde as intensidades de cores são máximas.

Para converter um modelo RGB para um modelo HSV, as seguintes equações podem ser adotadas (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008):

$$\begin{aligned}
 H &= \begin{cases} 60 \frac{(G - B)}{(M - n)}, & \text{se } M = R \\ 60 \frac{(B - R)}{(M - m)} + 120, & \text{se } M = G \\ 60 \frac{(R - G)}{(M - m)}, & \text{se } M = B \end{cases} \\
 S &= \begin{cases} \frac{(M - m)}{m}, & \text{se } M \neq 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \\
 V &= M
 \end{aligned} \tag{9}$$

Em que, m é igual a $\min(R, G, B)$ e M é igual a $\max(R, G, B)$ e a luminância V e a saturação S estão normalizados entre 0 e 1. Se a saturação for igual a 0, a matiz é indefinido, isto é, a cor do ponto situa-se ao longo das escalas de cinza. Se o valor de V for igual a 0, a saturação é indefinida.

De acordo com Conci e Azevedo (2003), as vantagens da utilização do espaço HSV são a simplicidade e facilidade de implementação e a sua popularidade entre os programadores de computação gráfica.

Uma imagem RGB pode ser convertida em uma imagem em escalas de cinza e essa transformação simplifica a quantidade de informações, e é ponto inicial para a aplicação de algoritmos que visam a análise de imagens. De acordo com Solomon e Breckon (2013), a conversão em cores para a escala de cinza pode ser dada por meio da Equação (10).

$$I_{escala\ de\ cinza}(m, n) = \alpha I_{cores}(m, n, r) + \beta I_{cores}(m, n, g) + \gamma I_{cores}(m, n, b) \quad (10)$$

Neste modelo, (m, n) representam a posição do píxel na imagem na escala de cinza e (m, n, c) um dos canais de cor na posição do píxel. Assim, a imagem a ser formada na escala de cinza será um somatório ponderado dos canais vermelho, verde e azul. Essa transformação não pode ser reversível, pois a informação de cores reais perdida na conversão não é recuperável prontamente. Os coeficientes de ponderação (α, β, γ) são fixados proporcionalmente conforme a resposta perceptual da visão humana para cada um dos canais. Para o sistema NTSC de televisores, a exemplo, as ponderações padronizadas dos coeficientes são: α igual a 0,2989, β igual a 0,5870 e γ igual a 0,1140.

4.3 ETAPAS DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Gonzalez e Woods (2010) explicam que o campo do processamento de imagem digital remete-se ao tratamento de imagens digitais por meio de computadores, assim como ao conjunto de técnicas para a manipulação de imagens digitais com o objetivo de facilitar a extração de informações desejadas.

Albuquerque e Albuquerque (2001) afirmam que o processamento de imagens é uma das áreas em crescimento em que diversos temas científicos têm sido abordados e em alguns casos de maneira multidisciplinar. Dentre as suas aplicações, os autores referenciados citam a compreensão de imagens, a análise em multirresolução e em multifrequência, a análise estatística, a codificação e a transmissão de imagens.

As etapas de processamento de imagem envolvem sequências de procedimentos, citando-se: a aquisição de imagens, o pré-processamento, a segmentação, o pós-processamento, a extração de atributos, o reconhecimento e a classificação. Estes procedimentos são sucintamente descritos nos próximos subitens.

4.3.1 Aquisição de imagens

A etapa de aquisição de imagens ou captura é aquela em que as informações visuais da cena são convertidas em sinais elétricos por meio de dispositivos ou sensores óticos. O dispositivo de captura da imagem é uma câmera fotográfica e a imagem captada de uma cena é resultado de uma projeção espacial (X, Y, Z) em uma representação ortográfica (X, Y).

As câmeras possuem resolução espacial⁵ e profundidade de píxel⁶ fixas, e a quantização realiza o mapeamento do sinal contínuo da cena em um número discreto organizados espacialmente (píxel) e com capacidade finita de representação (profundidade de píxel) (SOLOMON; BRECKON, 2013).

No processo de captura da imagem, ocorrem a quantização espacial e a quantização de cor ou intensidade. Em relação à quantização espacial, quando se possui uma maior resolução espacial tem-se uma qualidade melhor da imagem, já que há a redução de erros de aproximação entre a imagem original e a imagem digitalizada. Desse modo, diferentes quantizações espaciais podem mudar o nível de detalhes que uma imagem teria, para mais ou para menos. A quantização de intensidade, segundo Solomon e Breckon (2013), é o processo em que cada ponto do píxel capturado é obtido uma tensão no sensor da imagem que será resultado da intensidade e comprimento da onda de luz projetada através da lente da câmera ao ponto do plano da imagem.

4.3.2 Pré-processamento

O pré-processamento tem o objetivo de tratar os dados brutos, transformando a radiometria da imagem, corrigindo as distorções geométricas, atenuando os efeitos da atmosfera ou removendo os ruídos. Dessa forma, a imagem obtida passa por técnicas de processamento digital com a

⁵ Resolução espacial é número de píxeis que representam uma imagem.

⁶ Profundidade de píxel é o número de bits usado para representar cada píxel.

finalidade de adequar a sua qualidade que pode ser afetada por ruídos ou pouca definição de detalhes ou, ainda, realçar detalhes com algum interesse específico. O pré-processamento prepara a imagem para as próximas etapas, eliminando por processos de filtragem os ruídos e realçando detalhes importantes para a detecção de objetos, dentre outros aspectos.

Solomon e Breckon (2013) explicam que as operações de realce são implementadas por processos de filtragem no domínio espacial, isto é, o processo ocorre diretamente sobre os píxeis das imagens, alterando seus valores. O processamento no domínio da frequência é outra forma de pré-processamento e age sobre o espectro da imagem (ESQUEF *et al.*, 2003).

As técnicas de realce de imagens são aplicadas com a função de atribuir características que permitam ao usuário obter informações visuais com clareza, isto é, facilitar a interpretação humana e também do computador. No entanto, Solomon e Breckon (2013) explicam que a aplicação de realce é subjetiva, pois dependerá da informação que se deseja extrair da imagem e que essa informação a ser extraída já exista, para que possa ser acentuada ou restaurada.

Algumas das técnicas adotadas para tornar uma imagem adequada às necessidades do usuário são: alteração de brilho e contraste e filtrações para realçar características de interesse ou remoção de ruídos e outros problemas gerados na aquisição de imagens. A abordagem destes temas será apresentada no subitem 4.2 deste capítulo.

4.3.3 Segmentação

O processo de segmentação consiste em subdividir uma imagem em uma ou mais distintas regiões como partes independentes, ou seja, uma imagem é subdividida em regiões que satisfaçam um critério de uniformidade. De acordo com Solomon e Breckon (2013), a segmentação completamente autônoma é uma das etapas mais complexas do sistema de visão computacional e continua a ser um desafio no campo de pesquisa em processamento de imagens.

Gonzalez e Woods (2010) afirmam que a segmentação é uma das tarefas mais difíceis em processamento de imagens e está diretamente ligada ao êxito da obtenção de informações e análise de uma imagem.

Além de uma tarefa difícil, a segmentação é, muitas vezes, a primeira etapa que deve ser concluída antes de tarefas subsequentes, como: extração de características e classificação. Conforme Esquef e colaboradores (2003), a segmentação é um processo empírico que busca se adequar às características de cada imagem e às informações que se deseja extrair.

No campo do processamento digital de imagens, existem alguns métodos de segmentação baseados em princípios, citando-se: limiarização de histogramas ou binarização, textura e detecção de bordas. No entanto, as técnicas de segmentação utilizam duas abordagens principais: a similaridade entre os pixels e a sua descontinuidade ou, de acordo com Solomon e Breckon (2013), métodos baseados em similaridade e contorno ou fronteira, respectivamente.

Esquef e colaboradores (2003) afirmam que a técnica de similaridade mais utilizada é a limiarização ou aplicação de limiar de intensidade, em que é utilizada quando as amplitudes de níveis de cinza são suficientes para caracterizar um objeto e a saída do sistema é uma imagem com dois níveis de luminância: branco e preto. A abordagem baseada no método de contorno procura determinar mudanças abruptas, isto é, grandes diferenças entre grupos de pixels. A técnica de segmentação baseada em descontinuidades mais utilizadas é a detecção de bordas.

A limiarização na etapa de segmentação baseia-se na atribuição de valor (limiar) para a separação de pixels na diferença dos níveis de cinza que compõem diferentes objetos de uma imagem. Assim, pixels cujos valores excedam o limiar são alocados em uma determinada região e os pixels que não excedem o limiar são reservados em outra região.

De acordo com Solomon e Breckon (2013), a aplicação de limiar cria uma imagem binária $b(x, y)$ a partir de uma imagem de intensidade $I(x, Y)$, pela lógica matemática apresentada a seguir:

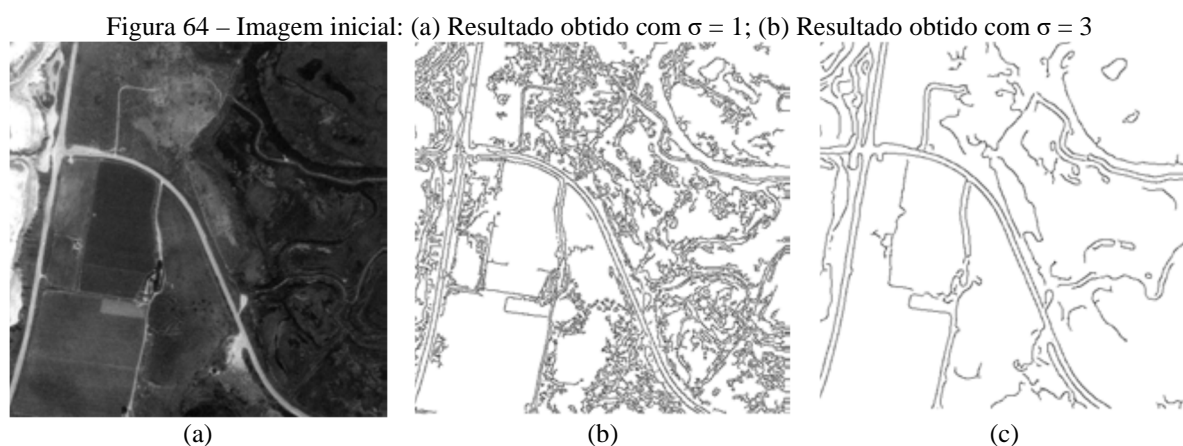
$$b(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } I(x, y) > T \\ 0 & \text{para todos os outros valores de } I(x, y) \end{cases}$$

Em que T é o valor de limiar.

A forma mais comum de se atribuir valores à variável T é por meio de valor estatístico e quando a limiarização é aplicada a partir de dois limiares máximos e mínimos a técnica é denominada limiarização com histerese (em inglês, *hysteresis thresholding*) (JEONG *et al.*, 2006). Se a

intensidade de um píxel é maior que o limiar máximo, este é considerado como pertencente à borda. Se a intensidade do píxel é menor que o limiar mínimo, não é considerado como pertencente à borda. Se a intensidade estiver entre o limiar mínimo e máximo, este píxel será considerado não pertencente à borda também, a menos que esteja ligado a respostas fortes, ou seja, píxeis com intensidades maiores que o limiar máximo. Posteriormente, é obtida uma imagem binária com bordas e não bordas.

Em pesquisa desenvolvida por Vale e Dal Poz (2002), para o processo de detecção de bordas foi aplicado o operador Canny, limiares mínimos e máximos, valores fixos, de 30% e 80%. Os desvios padrão da Gaussiana usados para a suavização da imagem foram $\sigma = 1$ e $\sigma = 3$. A Figura 64 apresentam os resultados para a imagem real usada neste trabalho.



Fonte: Vale e Dal Poz. (2002).

Os autores comentam que quanto maior o desvio padrão (σ), menor foram as quantidades de bordas espúrias. Foi concluído que o processo de detecção de bordas Canny permitiu a obtenção de informações de contorno com alta qualidade e riqueza de detalhes, mesmo para imagens com baixo contraste e que este operador pode auxiliar qualquer processo de extração de feições em imagens digitais.

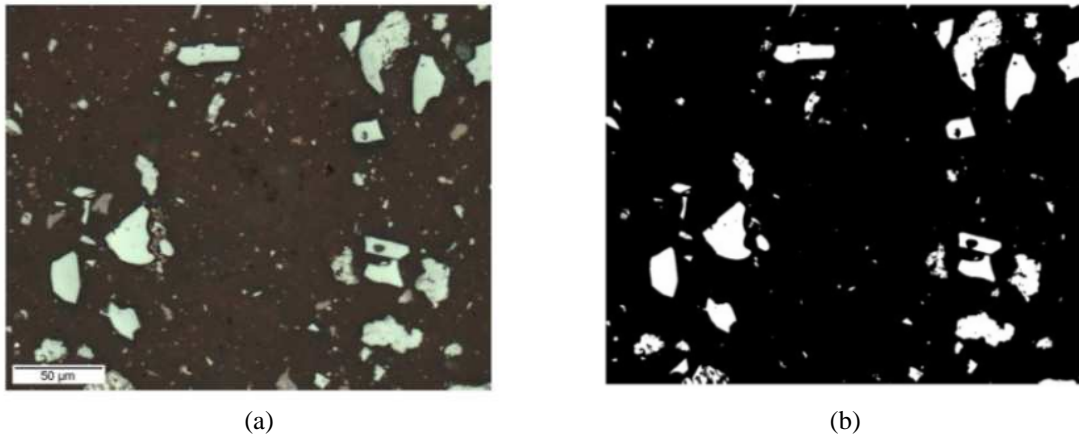
O método de detecção de bordas Canny é tido como completo, porque se baseia em três princípios:

- baixa taxa de erro: todas as bordas devem ser encontradas e não haver respostas espúrias, ou seja, não deve existir resposta onde não existam bordas;

- os pontos de borda devem estar bem localizados, isto é, a distância entre um ponto marcado como borda e píxeis da borda real devem ser mínima;
- deve haver somente uma resposta a uma borda (GONZALEZ; WOOD, 2010, SOLOMON; BRECKON, 2013).

A Figura 65 (a) ilustra uma imagem obtida por microscópio ótico de uma amostra de *pellet feed* e a Figura 65 (b) o resultado após a etapa de segmentação, em que foram separados somente os píxeis de interesse (LESSA *et al.*, 2007).

Figura 65 - Segmentação de uma amostra de *pellet feed*: (a) Imagem de *pellet feed* adquirida ao microscópio ótico (500x); (b) Imagem binária da fase hematita



Fonte: Lessa e colaboradores (2007).

O processo de segmentação pode ser realizado também no espaço de cores HSV (*Hue*, *Saturation* e *Value* – matiz, saturação e valor ou brilho), também muito conhecido por HSI (*Hue*, *Saturation* e *Intensity* - matiz, saturação e intensidade). Porém, de acordo com Gonzalez e Woods (2010), a segmentação, geralmente, tem apresentado os melhores resultados quando realizada sobre os vetores de cores RGB, pois é um método direto, apesar de ser mais intuitivo trabalhar no espaço HSV.

Entretanto, segundo Solomon e Breckon (2013), o espaço de cores HSV é muito utilizado na etapa de segmentação com base na cor pelo processo de decomposição de cores, em que parte do matiz de uma cor é isolada em função da faixa de cores de interesse, permitindo que objetos neste espaço de cor sejam identificados.

Alguns operadores podem ser utilizados para a detecção de bordas, que é um método para de segmentar uma imagem em regiões, baseando-se nas discontinuidades, como as mudanças

abruptas do nível de cinza. Esta técnica, detecção de bordas, é dividida em detecção de bordas de primeira ordem e de segunda ordem, baseadas nas derivadas de primeira e segunda ordem, respectivamente. Roberts, Prewitt e Sobel são os operadores mais comuns de primeira ordem. O operador Sobel possui a vantagem por suavizar a região de bordas e reduzir a chance de que o resultado seja dominado por ruídos ou píxeis isolados (SOLOMON; BRECKON, 2013). Este operador utiliza-se de duas matrizes 3×3 e passam por convolução com a imagem original para calcular aproximações das derivadas em relação a x e y . A Figura 66 apresenta a máscara de convolução do detector de bordas Sobel.

Figura 66 – (a) derivada em relação a x ; (b) derivada em relação a y

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

(a)

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

(b)

Fonte: próprio autor.

4.3.4 Pós-processamento

A etapa de pós-processamento visa melhorar o resultado obtido na segmentação, em que os defeitos e imperfeições podem ser corrigidos. Esquef e colaboradores (2003) explicam que esses problemas são corrigidos por meio de técnicas de morfologia matemática que aplicam uma sequência de filtros morfológicos e realizam uma análise quantitativa dos píxeis da imagem.

4.3.5 Extração de atributos

A extração de atributos é a etapa do processamento em que se extraem as informações numéricas desejadas das imagens, como: tamanho, forma, posição e outras, ou seja, informações quantitativas de interesse ou que são fundamentais para diferenciar uma classe de objetos de outros objetos.

4.3.6 Reconhecimento e classificação

A etapa de reconhecimento tem a finalidade de realizar de forma automática a identificação de objetos que foram segmentados na etapa anterior (ESQUEF *et al.*, 2003). Segundo Solomon e

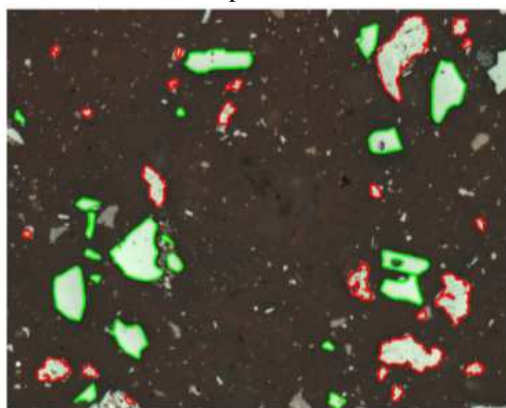
Breckon (2013), a classificação tem o objetivo de identificar propriedades e padrões em uma imagem para acomodá-las em uma classe específica.

As técnicas de classificação são agrupadas em dois grupos:

- classificação supervisionada: classificação que é baseada em um conjunto de padrões estabelecidos;
- classificação não supervisionada: que não se baseia em exemplos existentes de um padrão de classe conhecido. A classificação é feita por meio de *clusters*, isto é, agrupamento de pontos próximos.

A Figura 67 apresenta o resultado do trabalho de Lessa e colaboradores, (2007) em que partículas de hematita são classificadas pela sua forma, em que as contornadas em verde são as hematitas especulares e as com contorno vermelho indicam as hematitas porosas.

Figura 67 - Classificação de partículas de hematitas pela sua forma



Fonte: Lessa e colaboradores (2007).

4.4 REALCE DE IMAGENS

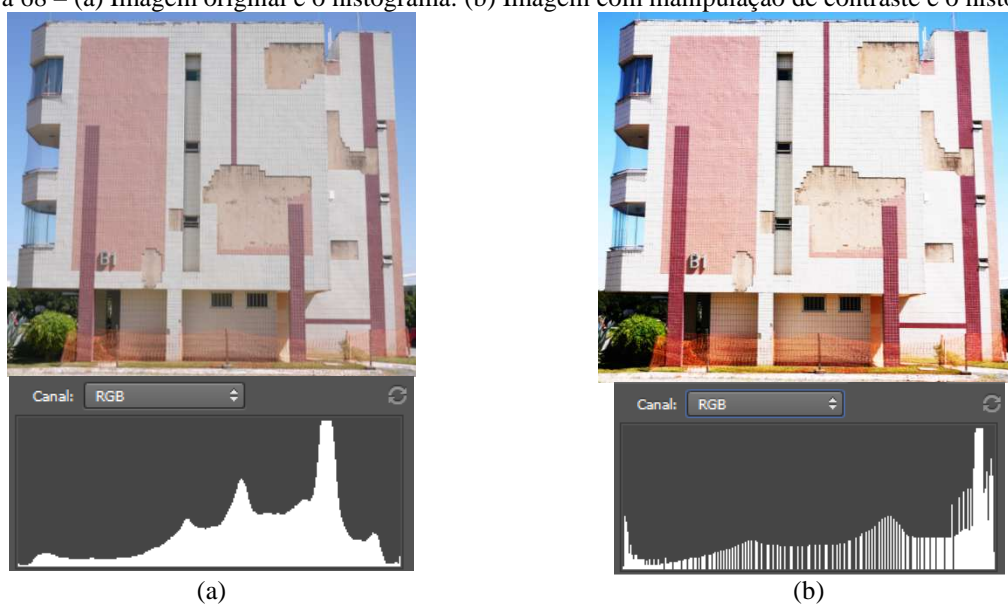
De acordo com Solomon e Breckon (2013), a finalidade do realce em imagens é atribuir à imagem condições para que esta permita que informações sejam obtidas com mais clareza. A seguir, serão apresentados aspectos gerais de realce em imagens.

4.4.1 Brilho e contraste

Pedrini e Schwartz (2008) explicam que o brilho está relacionado à sensação visual da intensidade luminosa de uma fonte e que o brilho percebido pela visão humana não corresponde

a uma função linear de intensidade. O contraste é descrito como uma medida da variação relativa da luminância. A manipulação do contraste em uma imagem é usada quando se deseja realçar detalhes da cena ou aumentar a distinção ou diferença entre os objetos e consiste numa transferência radiométrica em cada píxel de uma imagem e está associada com o intervalo de níveis de cinza. Quando os níveis de cinza ocupam um pequeno intervalo no histograma, a imagem possuirá um baixo contraste e à medida que esse intervalo é aumentado, o contraste também aumenta. Assim, quanto mais dispersos forem os píxeis contidos num histograma, maior é o contraste de uma imagem.

Figura 68 – (a) Imagem original e o histograma: (b) Imagem com manipulação de contraste e o histograma



Fonte: próprio autor.

Quando uma imagem passa por manipulação de contraste há a equalização do histograma, ou seja, há uma redistribuição dos níveis de cinza, de maneira que os píxeis aumentem a probabilidade de reaparecerem distribuídos igualmente. A manipulação de brilho e contraste é realizada no domínio espacial, isto é, o processo ocorre diretamente sobre os píxeis da imagem, alterando os valores.

4.4.2 Filtragem

Para se obter um resultado adequado na filtragem, é necessário conhecer a natureza do filtro para que a imagem possa ser utilizada em aplicações específicas e tragam resultados satisfatórios ao propósito do uso (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Pedrini e Schwartz (2008) descrevem que, na filtragem no domínio espacial, os filtros são classificados em passa-baixa e passa-alta e que na filtragem no domínio da frequência, os filtros classificados são: passa-baixa, passa-alta e passa-faixa.

No domínio do espaço, os filtros passa-baixa também são conhecidos como filtros de suavização e são utilizados para borramento da imagem e redução de ruídos. O borramento é utilizado com a finalidade de remoção dos pequenos detalhes e também conexão entre pequenas discontinuidades. (GONZALEZ; WOODS, 2010). Dentre as técnicas mais conhecidas para gerar suavização numa imagem estão a filtragem por média e o filtro pela mediana.

O filtro de média é o filtro linear mais simples, tendo o efeito de suavizar a imagem e que também podem ser usados para suprimir ruídos em uma imagem. O filtro pela mediana é o mais apropriado para a realização de tarefas de supressão de ruídos. O filtro pela mediana consegue obter melhores resultados que o filtro pela média, pois preserva de maneira melhor os detalhes finos de alta frequência na imagem. Estes filtros podem ser por filtragem linear ou não linear (SOLOMON; BRECKON, 2012).

Também no domínio do espaço, os filtros passa-alta são utilizados para realçar as características presentes numa imagem, como: as linhas, as bordas e regiões de interesse (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). Os filtros passa-alta também são chamados de filtros de aguçamento, pois realçam as componentes de alta frequência da imagem, como as bordas e as variações abruptas de níveis de cinza.

No domínio da frequência, os filtros passa-baixa têm a função de reduzir os componentes das bandas de alta frequência, mantendo os componentes de baixa frequência. Os filtros passa-alta têm o propósito de realçar características de um objeto, agindo sobre as transições bruscas de sinais, que estão associadas aos componentes de alta frequência. No entanto, estes filtros possuem o efeito de aumentar os ruídos presentes numa imagem. O filtro passa-faixa tem a função de permitir que frequências localizadas em uma faixa ou banda específica possam passar, enquanto atenua ou suprime as demais frequências.

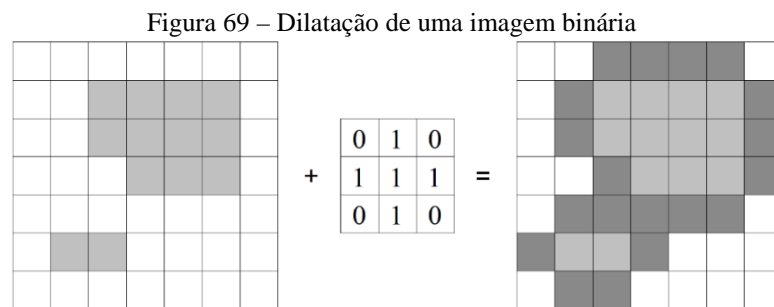
Os filtros morfológicos têm como finalidade extrair de uma imagem a sua geometria, transformando-a a partir de um conjunto bem definido, chamado elemento estruturante, sendo, a dilatação e a erosão, duas das operações básicas da morfologia digital.

A finalidade da dilatação de imagens é aumentar ou engrossar os objetos em uma imagem binária, em que a forma específica e a extensão deste engrossamento são determinadas pelo formato do elemento estruturante (GONZALEZ; WOOD, 2010).

A dilatação de A por B (elemento estruturante), indicada por $A \oplus B$, é definida pela Equação (11).

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (11)$$

Conforme Gonzalez e Wood (2010), a dilatação de A por B resulta num conjunto de todos os deslocamentos (z) para que ocorra a sobreposição de \hat{B} e A por pelo menos um elemento. Uma das aplicações da dilatação é a união de espaçamentos. A Figura 69 apresenta um exemplo de dilatação de imagem.



Fonte: Solomon e Breckon (2013).

Por fim, existe também outra técnica de operador morfológico que é erosão e, inversamente à dilatação, esta consiste na diminuição ou afinamento de objetos em uma imagem binária.

Sejam A e B pertencentes ao conjunto \mathcal{Z}^2 , a erosão de A por B , indicada por $A \ominus B$, é definida pela Equação (12).

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (12)$$

Assim, a Equação (12) sugere que a erosão de A por B é o conjunto de todos os pontos z de maneira que B está contido em A .

4.5 APLICAÇÕES DE PDI NA EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES

Trabalhos têm sido desenvolvidos com a finalidade de extrair informações de imagens a partir da detecção automática de padrões e os métodos utilizados se baseiam também nas etapas de segmentação e classificação. A ferramenta computacional MATLAB vem sendo utilizada com sucesso nestas aplicações, abrangendo diversas áreas da ciência, como a engenharia biomédica.

MATLAB é uma linguagem simples e de alto nível de aplicação para manipulação de matrizes. Este termo significa Laboratório de Matrizes (do inglês *Matrix Laboratory*), ou seja, um *software* de computação numérica para análise e visualização de dados. O programa surge com a finalidade de realizar operações matemáticas sobre matrizes, porém tem alcançado uma maior flexibilidade na utilização, ganhando atualmente propósitos mais amplos (BECKER *et al.*, 2010).

Tomasi (2014) afirma que, desde que imagens digitais são matrizes de números, muitos algoritmos de visualização têm sido implementados no MATLAB. O autor afirma que, por ser uma linguagem interpretada, tem se tornado um programa de fácil utilização que inclui ferramentas para exibição de matrizes e funções, impressão de vários formatos, como *Postscript* (tipo de linguagem de programação), *debugging* e criação de interfaces gráficas de usuário. Porém, o fato de ser interpretado também o faz limitado em relação ao custo computacional.

No trabalho desenvolvido por Faria (2010) em Porto, Portugal, a linguagem MATLAB foi utilizada para auxiliar nas atividades de diagnóstico e avaliação de doenças, e na tomada de decisões terapêuticas, em que foram utilizadas a manipulação de histogramas, técnicas de realce e a etapa de segmentação, visando à detecção de contornos. Na etapa de segmentação, a detecção de contornos foi obtida pela função *edge*, que procura as transições de intensidade rápida.

Na pesquisa de doutorado realizada por Siqueira (2010), foi desenvolvida uma técnica para reconhecimento e localização de cavidades cardíacas em imagens de ultrassom na linguagem MATLAB. O autor justifica que na Medicina as imagens são utilizadas para prover informações necessárias ao diagnóstico e, desta maneira, auxiliam os profissionais na avaliação das funções e estruturas humanas.

Em pesquisa realizada por Vale e colaboradores (2014), foi desenvolvido um método para detecção automática dos componentes do sangue por meio de classificação e segmentação em imagens microscópicas de amostras de sangue em MATLAB. Foram gerados também histogramas com a finalidade de calcular automaticamente os conjuntos difusos com base nos picos destes no canal G da imagem RGB. Após a aplicação desta técnica, foi possível classificar de quatro regiões: núcleo dos leucócitos, citoplasma dos leucócitos, eritrócitos ou hemácias e plasma sanguíneo.

Tem-se constatado recentemente pesquisas que se utilizam de linguagens de computação como alternativa para o auxílio na elaboração de levantamentos ou quantificação de manifestações patológicas em edifícios, utilizando, principalmente, as técnicas de segmentação e classificação advindas do processamento digital de imagens. Estas iniciativas têm visado a agilidade das tarefas de levantamentos dos danos e a diminuição do trabalho oneroso realizado pelo homem, e tende a contribuir com o aumento da precisão e a agilidade na obtenção de resultados.

Melo Júnior e colaboradores (2014) elaboraram um código para geração de mapa de danos em fachadas na linguagem computacional MATLAB em que a segmentação da imagem (Figura 70), separação da área com a manifestação patológica do restante da fachada, foi realizada por binarização. Os experimentos foram realizados com a ortoimagem de parte da fachada em concreto aparente da Biblioteca Central da UnB, gerada pelo programa PhotoScan.

Figura 70 - Segmentação da ortoimagem da Biblioteca Central da UnB



Fonte: Melo Júnior e colaboradores (2014).

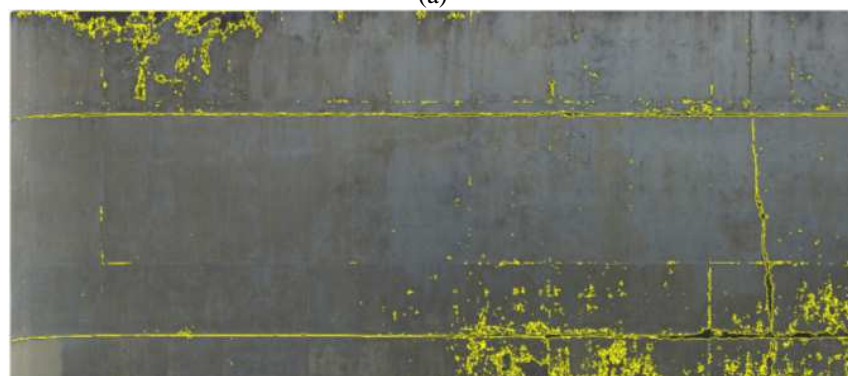
Após a etapa de segmentação, concluiu-se a etapa de classificação, em que as manchas escuras foram contornadas por linhas amarelas. O código também permitiu que a classificação das manchas fosse feita a partir de sua dimensão, isto é, podia-se definir qual a dimensão mínima da área da mancha que se desejava classificar. A Figura 71 (a) apresenta a classificação de

manchas maiores que 12 cm^2 e a Figura 71 (b) para manchas maiores que $0,6 \text{ cm}^2$. O código também permitia calcular o percentual e a área classificados em função da quantidade total de píxeis na imagem. Para a Figura 71 (a), o percentual de manchas foi de 3,09% e área com manchas igual a $1,99 \text{ m}^2$ e para a Figura 71 (b) o percentual aumentou para 3,70% e a área aumentou para $2,37 \text{ m}^2$.

Figura 71 - (a) Mapa de danos da fachada da Biblioteca Central da UnB para as manchas maiores que 12 cm^2 ; (b) Mapa de danos da fachada da Biblioteca Central da UnB para as manchas maiores que $0,6 \text{ cm}^2$



(a)

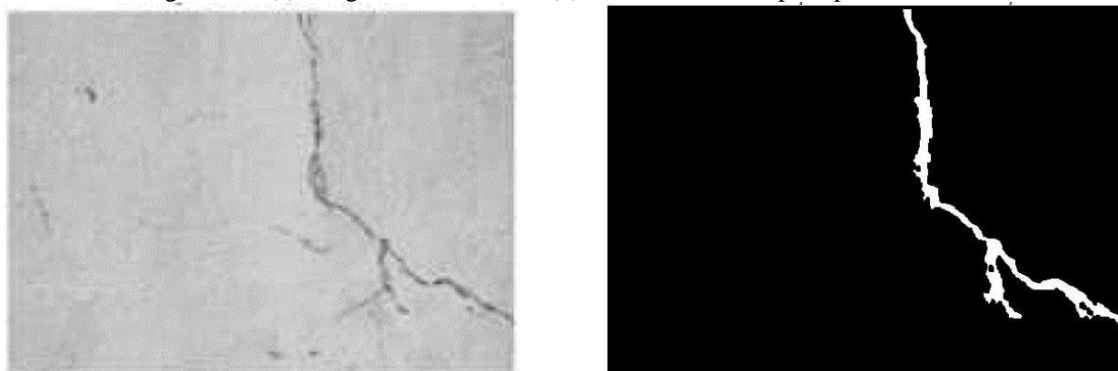


(b)

Fonte: Melo Júnior e colaboradores (2014).

Pereira (2015) desenvolveu códigos para avaliar a existência de fissuras em fachadas em MATLAB visando a embarcação em VANTs. Um dos códigos (algoritmo A) foi desenvolvido baseado na segmentação por detecção de bordas pelo operador Sobel, a partir, além da aquisição de imagens, dos seguintes passos: transformação em escalas de cinza; detecção de borda pelo operador Sobel; transformação de limiar; dilatação da imagem; preenchimento da imagem; erosão da imagem; identificação dos objetos; descrição dos objetos da imagem processada; eliminação dos segmentos fora do padrão; obtenção de detalhes do objeto detectado; e armazenamento das detecções. A Figura 72 apresenta a imagem da fachada com a fissura e a classificação realizada pelo operador Sobel e demais etapas.

Figura 72 - (a) Imagens com fissuras; (b) Fissura detectada por operador Sobel



(a)

(b)

Fonte: Pereira (2015).

O autor concluiu em sua pesquisa que o operador Sobel permitiu enfatizar melhor as bordas das fissuras diagonais. A outra técnica empregada para detecção das fissuras foi o filtro de partículas, que se utiliza de uma abordagem estatística.

Quanto à aplicação de operador Canny, Alshawabkeh e El-Khalili (2013) desenvolveram um código com a finalidade de detectar fissuras de ortoimagens e monitorar o dano estrutural no Palácio Amra, no deserto da Jordânia (Figura 73).

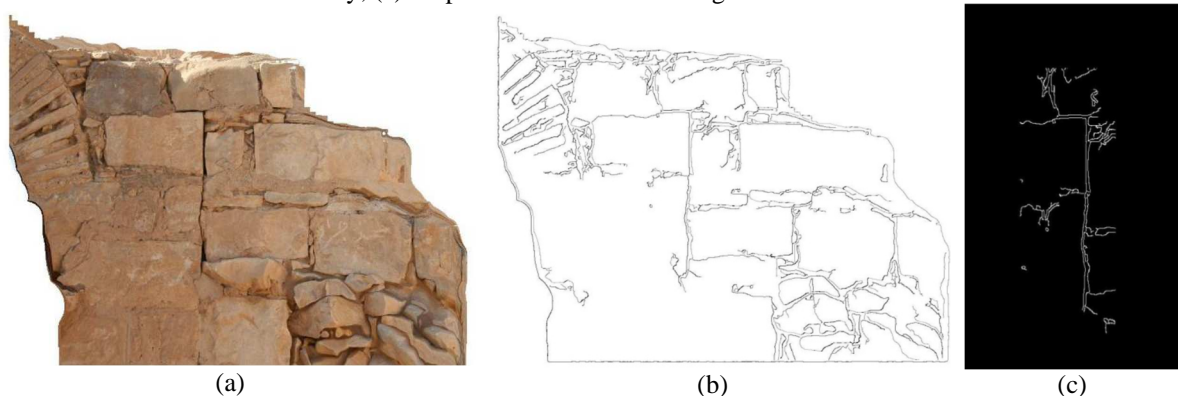
Figura 73 – Palácio Amra



Fonte: Alshawabkeh e El-Khalili (2013).

A extração das fissuras foi realizada por código que visa a segmentação, que se baseia na diferença de valores de cinza nas imagens. Os autores afirmam que as fissuras se diferenciam facilmente da superfície, pois apresentam coloração mais escura. Assim, para a extração das bordas das fissuras, o operador Canny foi aplicado, sendo gerada uma imagem binária por meio da aplicação do método de limiarização, conforme ilustrado na Figura 74.

Figura 74 – (a) Ortoimagem do Palácio Amra; (b) Mapa de borda binário das fissuras extraído pelo operador Canny; (c) Mapa de borda binário da região de interesse



Fonte: Alshawabkeh e El-Khalili (2013).

Outras linguagens computacionais também podem ser utilizadas para extração de informações em imagens por meio das técnicas de processamento digital de imagens. Uma destas linguagens é a C# (pronuncia-se: C Sharp), que é uma linguagem considerada moderna, como a Java e Python e que têm os códigos fontes transformados em linguagem intermediária, que será interpretada pela máquina virtual da linguagem quando o programa for executado. O processo de interpretação da linguagem consiste na tradução dos comandos da linguagem intermediária (código fonte) para a linguagem da máquina.

4.6 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CAPÍTULO 4

Neste capítulo, foi trazida a contextualização sobre os aspectos gerais do processamento digital de imagens, visando fundamentar a sua aplicação à geração de mapas de danos por processo automático.

A etapa de segmentação é preponderante para a obtenção de bons resultados, mas também uma tarefa difícil de realizar e pode ser realizada sobre vários espaços de cores, como RGB, escalas de cinza e HSV. As técnicas de processamento digital de imagens já são aplicadas em estudos, com a finalidade de classificar objetos de interesse.

As linguagens computacionais permitem a obtenção de informações em imagens digitais por meio de várias técnicas, pois são lidas como matrizes bidimensionais, em que cada unidade de pixel corresponde a uma posição da matriz por um número. Para os espaços em *true colors*, estas matrizes são tridimensionais.

Por todos estes aspectos, almeja-se o estudo aprofundado das técnicas de processamento digital de imagens com o intuito de extrair as informações danos em fachadas, principalmente nas ortoimagens, a partir dos espaços de cores distintos, detectores de bordas Sobel e Canny, assim como a avaliação de histogramas de frequência de píxeis, dentre outros aspectos.

5 EXPERIMENTOS DA GERAÇÃO DE MODELOS POR DSM

Neste capítulo, serão apresentados os experimentos realizados com o uso de diversas ferramentas, as quais envolvem as câmeras fotográficas, os VANTs (veículos aéreos não tripulados) e programas de fotogrametria digital para a geração dos modelos geométricos e as ortoimagens. Entre os programas usados nos experimentos, citam-se: 123D Catch, Photosynth, VisualSFM associado ao MeshLab e PhotoScan.

Outros aspectos são relevantes para se alcançar resultados satisfatórios, destacando-se: planejamento, características da câmera e a capacidade de gerar informações desejadas em função da resolução e distância ao objeto, podendo ser estimado a partir do cálculo de tamanho do píxel (TP) e estimativa da quantidade de fotos necessárias para se alcançar a sobreposição desejada. Todos estes aspectos serão apresentados inicialmente nos subitens a seguir.

5.1 PLANEJAMENTO

A etapa do planejamento deve ser orientada pela finalidade do levantamento, tipo de processamento, características das edificações e às informações que se pretendem extrair dos produtos gerados.

Esta pesquisa está direcionada ao levantamento de danos em fachadas, o que leva à necessidade, dentre outras, de imagens com maiores resoluções que são fundamentais para a visualização de detalhes. Por se tratar da obtenção de modelos fotogramétricos por técnica de nuvem de pontos, aconselha-se que as imagens das fachadas sejam capturadas com a câmera posicionada perpendicularmente ao plano externo do edifício e, dessa forma, para edificações altas faz-se imprescindível o emprego de VANTs. Por meio deste veículo, também é possível realizar os registros fotográficos com uma maior proximidade, o que leva a um aumento da visualização dos detalhes e danos das fachadas pela maior resolução.

Assim, é importante analisar o entorno do edifício, porque obstáculos (vegetação, fiação elétrica e outras edificações) podem limitar ou impossibilitar que os voos e os registros fotográficos possam ser realizados. A experiência do profissional responsável por pilotar VANTs também é

fundamental, pois só com as habilidades de voo e conhecimento técnico este poderá sobrevoar próximo aos edifícios sem pôr em risco a edificação, os equipamentos e os civis.

5.2 EQUIPAMENTOS

Os materiais que foram utilizados para a obtenção das imagens são as câmeras fotográficas compactas e os veículos aéreos não tripulados (*drone* ou UAV-*unmanned aerial vehicle*). As câmeras utilizadas são câmeras compactas, não métricas, de baixa relação custo e benefício, o que permite serem embarcadas em μ VANTs. Os veículos aéreos utilizados foram os VANTs de asa rotativa ou multirrotores, mais apropriados para voos ascendentes ou descendentes e que permitiram voos mais próximos às fachadas dos edifícios.

5.2.1 Câmeras fotográficas

A obtenção de imagens com maiores resoluções é possível com a utilização de câmeras com maiores resoluções ou com a redução da distância entre a câmera e o objeto a ser fotografado. As câmeras utilizadas nesta pesquisa estão apresentadas no Quadro 10, com alguns das especificações técnicas.

Quadro 10 – Câmeras fotográficas e especificações técnicas

Câmera	Nikon 1 J1	Sony RX100	Canon SX270 HS	Panasonic DMC-GF2	Canon EOS Rebel SL1
Máxima resolução (píxel)	3.872 x 2.592	5.472 x 3.648	4.000 x 3.000	4.000 x 3.000	5.184 x 3.456
Píxeis efetivos (MP)	10	20	12	12	18
Sensor (mm)	13,2 x 8,8	13,2 x 8,8	6,17 x 4,55	17,3 x 13,0	22,3 x 14,9
Distância focal (mm)	10-30	28-100	25-500	14-42	18-55
Tipo de sensor	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS

Fonte: próprio autor.

Para todas as capturas de imagens para o processamento nos programas de fotogrametria digital dos modelos, foi utilizada a distância focal mínima em todas as câmeras. Alguns parâmetros estão diretamente ligados ao nível de precisão e qualidade das imagens, destacando-se:

- distância focal: importante para determinar o ângulo de visão de uma objetiva quando se fotografa um objeto focalizado sobre uma dada mídia;
- abertura do diafragma ou escala de número f: capacidade de captura de luz da lente através da abertura da mesma e quanto maiores os valores da escala f, melhor a profundidade de campo. Desta maneira, buscou-se utilizar valores maiores para f nas câmeras embarcadas nos VANTs, entre 2,8 e 7,1;
- tempo de exposição: o obturador controla o tempo de exposição ao qual o sensor está exposto à luz. Para maior abertura do diafragma, deve-se configurar um menor tempo de exposição, ou seja, velocidades mais altas. A captura de imagens aéreas naturalmente exige maiores velocidades, tais como: 1/800, 1/1000, 1/1250 e 1/1600;
- sensibilidade ISO: define a sensibilidade do sensor, significando que quanto menor este número, menor a sensibilidade. Importante lembrar que para valores baixos de ISO, pouca luz é captada, no entanto, quase não apresenta ruído e os contornos ficam mais nítidos. Utilizou-se nesta pesquisa tipicamente ISO 125, 200 e 400.

Além da configuração da exposição manual que deve ser usada, os valores dos parâmetros são importantes para assegurar que as imagens garantam profundidade de campo aceitável e minimizem o fenômeno de difração que pode ser gerado pelas lentes da objetiva. Assim, para cada trabalho em campo e em função das características do revestimento da fachada e da luminosidade natural, os parâmetros foram ajustados, variando cada caso.

Somente as câmeras Sony RX 100, Canon SX270 HS e Canon EOS Rebel SL1 foram usadas nos VANTs em função do peso devido ao limite de carga paga dos veículos. Por estas câmeras, as fotografias foram registradas automaticamente, isto é, o equipamento estava configurado para fazer o disparo da câmera numa relação de 40 fotografias por minuto, ou seja, aproximadamente 1 foto a cada 1,5 s. As imagens foram armazenadas em formato JPEG (*Joint Photographic Experts Group*). As demais câmeras foram utilizadas em tomadas terrestres.

5.2.1.1 Posição da câmera pela distância à edificação

O primeiro aspecto a ser mencionado quanto à posição da câmera (embarcada no VANT) foi a distância da tomada fotográfica em relação ao edifício, primordial para estabelecer a capacidade de visualização de danos nos modelos finais, baseando-se na resolução da imagem.

Dentre os danos por inspeção visual, as fissuras são os problemas que podem se tornar mais difíceis de serem detectados visualmente sem o uso de equipamentos ou instrumentos de auxílio a distâncias maiores, devido à sua dimensão (abertura). Por isso, a maior resolução da imagem é importante para se obter uma maior visualização, especialmente para este tipo de dano. A maior proximidade à fachada pode propiciar um menor tamanho dos píxeis (TP) e, conseqüentemente, uma maior resolução da imagem. Assim, a distância do voo para o edifício deve ser tão menor quanto possível, desde que se garantam os requisitos de segurança de voo.

Enfim, para a estimativa da capacidade de percepção da fissura em função do TP (mm/píxel), são apresentadas as Equações (5) e (13), ambas com a mesma finalidade, porém com métodos diferentes. Para a Equação (5), aplicam-se os valores referentes ao sensor da câmera, distância da câmera ao objeto ou cena, distância focal e número de píxeis.

Como proposta deste trabalho, é apresentada a Equação (13) como alternativa, onde para o cálculo do TP aplicam-se os valores de distância ao objeto, ângulo de abertura da lente e número de píxeis.

$$TP_2 = \frac{2000 \cdot d \cdot \tan \frac{\alpha}{2}}{NP} \quad (13)$$

Em que: d é a distância da câmera ao objeto ou cena (m); α é o ângulo da visão da lente da câmera (graus); e NP é o número de píxeis (píxel). Para cálculo da tangente de α , empregou-se a relação trigonométrica de triângulo retângulo, dividindo-se o cateto oposto pelo adjacente.

Para as câmeras Sony RX100, Canon SX270 HS e EOS Rebel SL1, que foram utilizadas embarcadas ao VANT, foram calculados os tamanhos de píxeis em função das distâncias possíveis para se realizar os voos e também dos parâmetros das câmeras, para se ter uma referência quanto à capacidade de se detectar fissuras presentes nas fachadas, apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 - Valores de TP em função das distâncias

d (m)	Sony RX100		Canon SX270 HS	Canon EOS Rebel SL1
	TP_1 (mm/píxel)	TP_2 (mm/píxel)	TP_2 (mm/píxel)	TP_2 (mm/píxel)
2	0,56	0,56	0,77	0,48
3	0,83	0,84	1,15	0,72
4	1,11	1,12	1,54	0,96
5	1,39	1,40	1,92	1,20
6	1,67	1,68	2,30	1,43
7	1,94	1,96	2,69	1,67
8	2,22	2,24	3,07	1,91
9	2,50	2,52	3,45	2,15
10	2,78	2,80	3,84	2,39

Fonte: Próprio autor.

Pelas equações, supostamente haveria uma maior dificuldade para percepção de fissuras com aberturas menores que 1 mm, uma vez que as distâncias de voo, por segurança, devem ser maiores que 3 m.

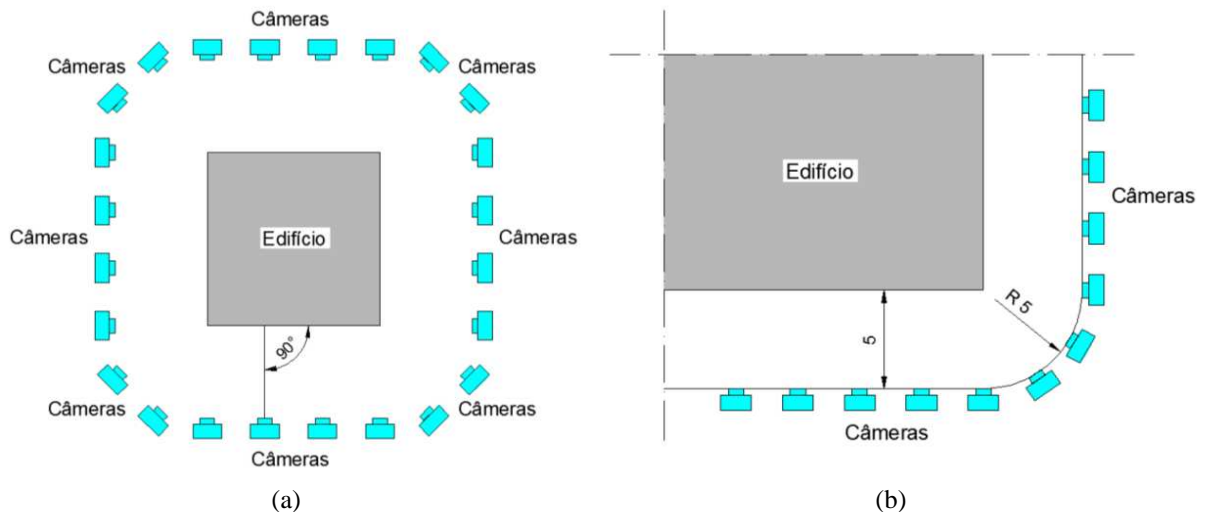
De acordo Meneses e Almeida (2012), a resolução espacial é um importante parâmetro do sensor porque define a dimensão do menor objeto que poderá ser identificado numa imagem. Os autores definem que um objeto só pode ser visto numa imagem se o tamanho deste objeto for igual ou maior que a resolução espacial. Os autores explicam que, entretanto, as experiências têm demonstrado que para um objeto ser resolvido numa imagem a sua resolução espacial nominal deve ser no mínimo a metade da resolução espacial na sua menor dimensão e ainda ter que apresentar um bom contraste de refletância entre os elementos vizinhos.

Assim, considerando a menor distância de voo possível entre a fachada (3 m) e utilizando a câmera Canon EOS Rebel SL1, acredita-se que seja possível a visualização de fissuras de aproximadamente 0,3 mm, desde que esta imagem apresente um bom contraste entre a fachada fotografada e o dano. Por fim, deixa-se claro que a câmera Canon EOS Rebel SL1 apresentou um menor TP em função do tamanho maior do seu sensor e da menor distância focal, comparando-se com a câmera Sony RX100, que possui uma maior quantidade de píxeis efetivos. Assim, vários parâmetros de uma câmera precisam ser avaliados para se chegar à sua capacidade de visualizar pequenos detalhes presentes numa imagem.

Quanto a outro aspecto de posicionamento, as câmeras devem estar o mais próximo da perpendicular da fachada no momento do registro fotográfico. No entanto, lembra-se que alguns autores relatam que o programa PhotoScan consegue processar fotografias com até 45° de

inclinação em relação ao plano da fachada. Quando as tomadas fotográficas se aproximam dos vértices da edificação, a câmera deve ser posicionada acompanhando uma projeção de raio igual à distância original da câmera em relação ao edifício (Figura 75).

Figura 75 – Posicionamento das câmeras em relação ao edifício: (a) Planta esquemática sem escala da posição da câmera em relação ao plano da fachada; (b) Posicionamento da câmera em relação ao vértice do edifício



Fonte: próprio autor.

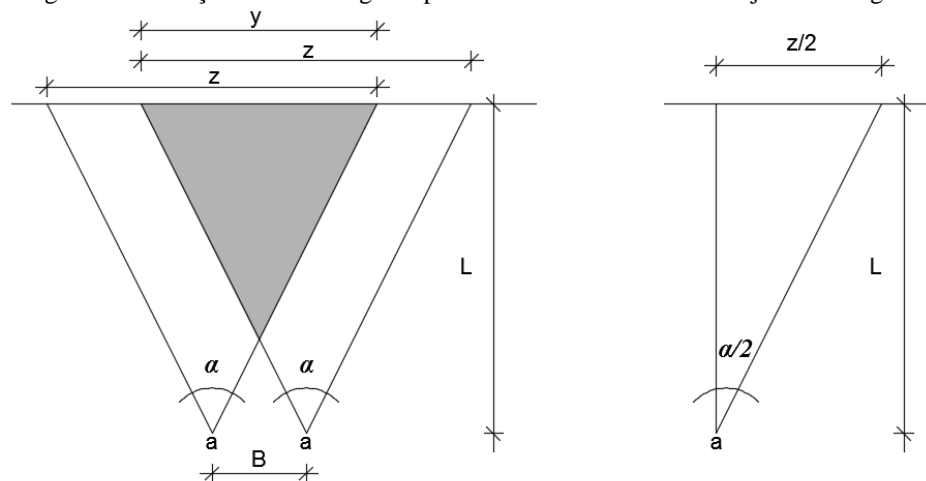
5.2.1.2 Posição da câmera pela distância entre as tomadas – sobreposição de imagens

Apesar de alguns autores afirmarem que a sobreposição longitudinal entre imagens consecutivas para a aerofotogrametria é na ordem de 60% e a sobreposição lateral de 30% com a finalidade de atender os requisitos de estereoscopia, a sobreposição estabelecida nesta pesquisa no sentido longitudinal foi de 80% e lateral de 40%.

Estabelecida a distância entre a câmera e a fachada do edifício, chega-se ao valor da distância entre as posições das tomadas das fotografias por meio de equações, objetivando as sobreposições próximas aos valores desejados. A Equação (8) é a maneira mais simples de assegurar a precisão geométrica do produto e de não ter grandes variações entre os conjuntos de pixels a serem comparados no processamento fotogramétrico, sem a necessidade dos valores específicos da câmera.

Uma alternativa para calcular a distância entre as tomadas fotográficas em função de valores de sobreposição desejados, distância entre a câmera e o objeto, valor do ângulo de visão da lente da câmera foi desenvolvida a partir da Figura 76. Assim, inicialmente, por meio de relações trigonométricas, como ilustrado na, pode-se subentender que $B + y = 2B + z$ ou $B = z - y$.

Figura 76 - Relações entre triângulos para cálculo do tamanho do objeto na imagem



Fonte: próprio autor.

Pela Figura 76, tem-se a como o posicionamento da câmera no momento da tomada fotográfica, L a distância para o objeto a ser fotografado (em metro), z a área de alcance determinada pelo ângulo de abertura da lente (em metro) e y a sobreposição entre as fotografias, dada em percentagem. Deste modo, para a obtenção de B , ou seja, distância entre as posições das câmeras em função da sobreposição que se pretende obter, pode ser aplicada a Equação (14), apresentada a seguir.

$$B = 2 \tan \frac{\alpha}{2} L \cdot (1 - p/100) \quad (14)$$

Em que: L é a distância da câmera ao objeto ou cena (m); α é o ângulo da abertura da lente da câmera (graus); e p é o percentual de sobreposição (%). Nesta equação, p é o valor dado em percentagem de sobreposição de uma fotografia em relação à outra, aspecto necessário para se realizar os processos fotogramétricos.

O Quadro 12 apresenta os valores de distância entre as tomadas para alcançar a sobreposição de 80% pelas Equações (8) e (14), para a câmera Sony RX100.

Quadro 12 - Valores de B em função de L para câmera Sony RX 100, em função de α (75°) e sobreposição de 80% ou $R = 0,3$

L (m)	B (m) (Equação 14)	Variação de B (m) em função de R (Equação 8)				
		$R = 0,1$ (Sobreposição de 96,74%)	$R = 0,2$ (Sobreposição de 93,48%)	$R = 0,3$ (Sobreposição de 90,22%)	$R = 0,4$ (Sobreposição de 86,96%)	$R = 0,5$ (Sobreposição de 83,70%)
2	0,61	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
3	0,92	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
4	1,23	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
5	1,53	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
6	1,84	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0
7	2,15	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5
8	2,45	0,8	1,6	2,4	3,6	4,0

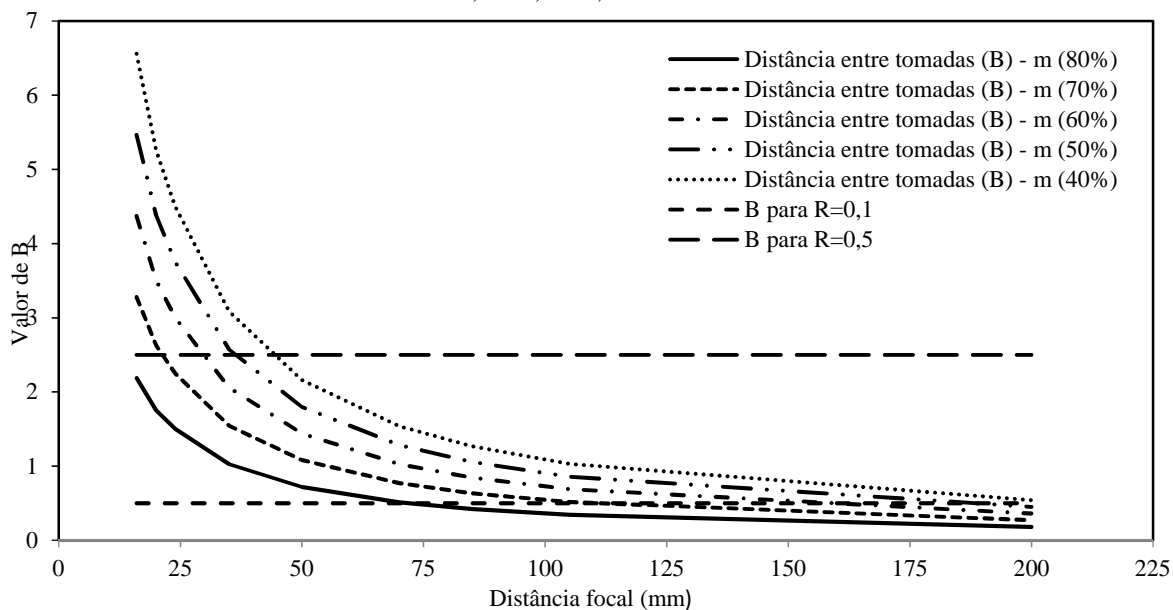
Fonte: próprio autor.

Pela análise do Quadro 12, observa-se que os valores de B determinados pela Equação (14) correspondem à $R = 0,3$. Aplicando-se os valores gerais de B e L na Equação (14), determinaram-se os valores de p , em que o valor de R igual a 0,1 proporciona uma sobreposição de 96,74%, R igual a 0,2 proporciona uma sobreposição de 93,48%, R igual a 0,3 proporciona uma sobreposição de 90,22%, R igual a 0,4 proporciona uma sobreposição de 86,96% e R igual a 0,5 proporciona uma sobreposição de 83,70%, para a câmera Sony RX100.

Porém, verificou-se que os valores de R devem ser utilizados levando-se em consideração o ângulo de visão da lente da câmera; para maiores ângulos de visão devem-se utilizar valores próximos a 0,4 e para lentes com pequenos ângulos de visão, valores em torno de 0,1, como demonstrado na Figura 77, para a sobreposição de 80%. A curva visualizada na Figura 77 foi determinada pela Equação (14), considerando-se uma distância entre a câmera e o objeto igual a 5 m.

As curvas visualizadas na Figura 77 foram determinadas pela Equação (14), considerando-se uma distância entre a câmera e o objeto igual a 5 m. Constatou-se também que a relação $R = B / L$, para sobreposição de 80% e qualquer distância, somente se aplica para câmeras com lentes focais de 20 a 70 mm, aproximadamente. Para a sobreposição de 40% e distância qualquer, a relação $R = B / L$ aplica-se para câmeras com lentes focais de 50 a 200 mm, conforme pode-se observar na Figura 77. A curva visualizada na Figura 77 também foi determinada pela Equação (14). Para os demais valores de sobreposição (50%, 60 e 70%), a relação $R = B / L$ aplica-se às lentes focais especificadas na Figura 77.

Figura 77 – Gráfico da relação entre a distância focal (mm) e valor de R ; Distância de 5 m e sobreposição de 80%, 70%, 60%, 50% e 40%



Fonte: próprio autor

Por estas conclusões, é recomendado que os valores de B (distâncias entre as tomadas fotográficas) sejam calculados pela Equação (14), para se garantir a sobreposição desejada e a eficiência nos processos fotogramétricos para obtenção de modelos por DSM.

Para as tomadas no sentido vertical, a sobreposição longitudinal foi garantida em função da relação entre a velocidade média de voo do VANT e a quantidade de fotografias tiradas em determinado período em função do processo automatizado de disparo, a câmera RX-100, por exemplo, é capaz de obter 40 fotografias por minuto. A sobreposição lateral foi garantida com marcações posicionadas no solo por cones na cor laranja, como ilustrado na Figura 78. Estes cones marcaram os pontos de decolagem e aterrissagem do VANT.

Figura 78 - Determinação dos pontos de voo vertical para o VANT



Fonte: próprio autor.

5.2.1.3 Cálculo do número de fotografias

Neste trabalho, foi adotado que a área de cobertura única (sem sobreposição) das fotografias aéreas corresponderia ao produto da dimensão representativa de 20% do lado da foto no sentido longitudinal e 60% do lado da foto no sentido lateral, valores referentes à subtração entre a área real (100%) e área de sobreposição longitudinal (80%) e área de sobreposição lateral (40%), respectivamente. A $\text{Área}_{\text{única}}$, então, foi calculada pelo produto da dimensão representativa (12%) pela área da foto ($\text{Área}_{\text{foto}}$), apresentada na Equação (15).

$$\text{Área}_{\text{única}} = 12\% \cdot \text{Área}_{\text{foto}} \quad (15)$$

Para se chegar ao valor da $\text{Área}_{\text{foto}}$, aplica-se, inicialmente, a Equação (16) para obter a dimensão da base e da altura alcançada na fotografia a uma distância d e, posteriormente, multiplica-se a base pela altura.

$$z = (\tan \alpha/2) \cdot 2d \quad (16)$$

Em que: z é a dimensão da base e altura na imagem (m); α é ângulo horizontal e vertical da abertura da lente da câmera (graus); e d é distância da câmera ao objeto ou cena (mm).

Para se obter uma estimativa da quantidade de fotos (N°_{fotos}) necessárias para cobrir uma determinada área, divide-se o valor da área de interesse pelo valor da Área_{única} da foto, conforme Equação (4).

$$N^{\circ}_{\text{fotos}} = \frac{\text{Área}}{\text{Área}_{\text{única}}} \quad (4)$$

5.2.2 Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)

Os VANTs utilizados foram os multirrotoreiros de 4 asas rotativas (quadricópteros) (Figura 79) desenvolvido no âmbito do projeto μ VANT em execução no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB. Estes equipamentos possuem sistema de controle e estabilização automáticos, motorização elétrica com uso de baterias de lítio, fixação da posição de aquisição das imagens com uso de bússola eletrônica e coordenadas obtidas por GPS. A vantagem do emprego específico do multirrotor é a possibilidade de voos paralelamente ao plano das fachadas. O VANT multirrotor da Figura 79 (a) possui a capacidade de carga embarcada de 500 g e foi utilizado para as câmeras Sony RX100 e Canon SX270 HS, enquanto o VANT multirrotor da Figura 79 (b) possui a capacidade de carga embarcada de 600 g e foi utilizado para a câmera Canon EOS Rebel SL1.

Figura 79 - VANTs multirrotoreiros (quadricópteros); (a) Multirrotor com carga embarcada de 500 g; (b) Multirrotor com carga embarcada de 600 g



Fonte: próprio autor.

O aspecto que caracteriza a fotografia aérea é a posição da câmera em relação ao objeto a ser fotografado e ao VANT onde está embarcada. A direção do voo, também com base no objeto de interesse (fachadas), foi no sentido vertical, diferentemente de voos no sentido horizontal

comuns aos VANTs de asa fixa. Desta maneira, fundamentalmente, utilizou-se como método a fotografia horizontal. A captura das imagens dos edifícios geralmente aconteceu em duas etapas: voos verticais ascendentes (do nível do solo para o último pavimento) e voos verticais descendentes (do último pavimento para o nível do solo).

A captura das imagens tanto na ascendente quanto na descendente ocorreu pelo fato de que a câmera estava no modo automático de disparo. Para edifícios específicos, como o do Museu Nacional Honestino Guimarães, algumas particularidades foram tomadas para a captura das fotografias e serão explicadas melhores no subitem que trata do respectivo edifício.

Com base no que foi discutido, a utilização do VANT na captura das imagens é importante, uma vez que:

- para geração dos modelos fotogramétricos por nuvem de pontos, todas as partes do edifício devem ser fotografadas garantindo-se a sobreposição entre as imagens e para edificações baixas se é possível pela fotogrametria terrestre. Entretanto, para edifícios altos, isso só é possível utilizando outras técnicas, como a captura de imagens por VANTs;
- por meio do VANT, se é possível alcançar as partes mais altas dos edifícios e, desta maneira, alcançar uma maior resolução da imagem pela proximidade da câmera à fachada, o que permite a visualização de detalhes, como fissuras;
- também por meio de VANTs e de acordo com a revisão literária, elimina-se as zonas de oclusões que podem ser geradas por objetos salientes ou reentrantes das fachadas (sacadas, elementos ou volumes arquitetônicos e construtivos), aspectos inevitável nos produtos oriundos da fotogrametria terrestre.

5.2.3 Hardware

Utilizou-se para os experimentos envolvendo a geração de modelos por DSM um computador de mesa (*desktop*) com processador Intel (R) Core (TM) i7-4770 CPU 3,40 GHz, 32 GB de memória instalada (RAM), sistema operacional de 64 bits.

5.3 PROCESSAMENTO

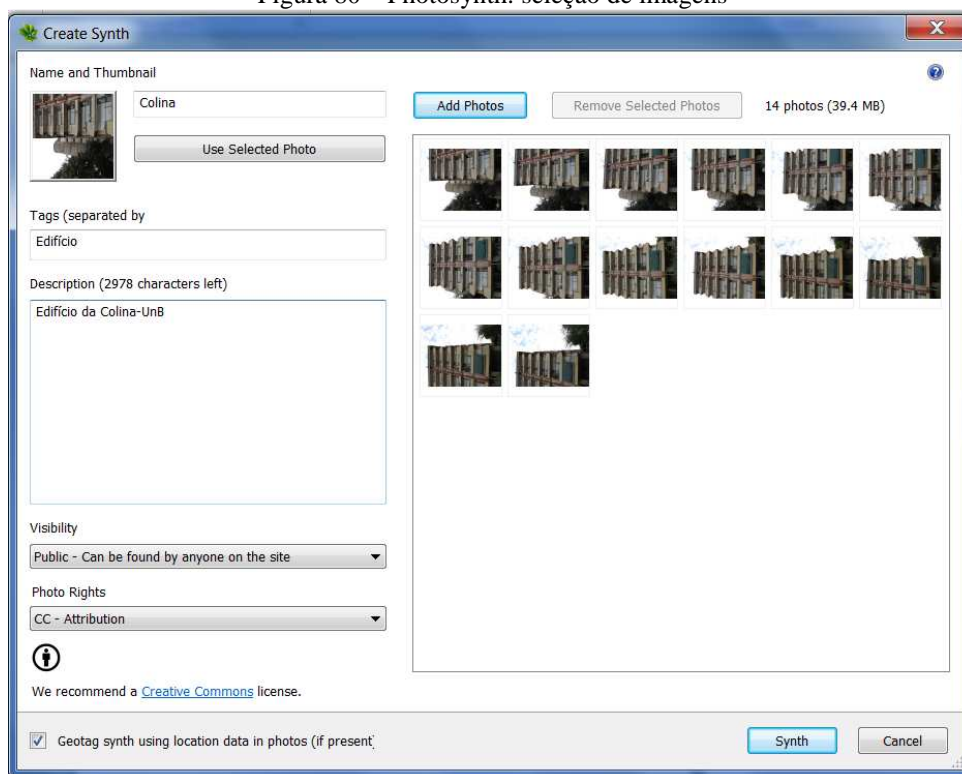
O processamento para a obtenção dos modelos foi realizado em quatro programas disponíveis atualmente no mercado, a saber: Photosynth (programa via *web*); 123D Catch (programa via *web*); VisualSfM e MeshLab (programa livre e gratuito) e o PhotoScan (programa comercial). Para nenhum destes programas foi necessária a realização da orientação interna ou a calibração das câmeras utilizadas.

Para se alcançar um dos objetivos específicos dessa pesquisa, a exportação de ortoimagens para geração de mapas de danos é uma etapa imprescindível. No entanto, alguns dos programas utilizados não possuem este recurso, mas foram utilizados para avaliar o método de aquisição de imagens, a geração de nuvens de pontos e a qualidade visual do modelo geométrico. A seguir serão descritas algumas particularidades dos programas citados.

5.3.1 Photosynth

O Photosynth é um programa livre, disponível na internet para *download*, desenvolvido pela Microsoft e a Universidade de Washington por meio de pesquisas em parceria e é uma ferramenta para captura de imagens digitais e geração de nuvens de pontos. A partir da comparação entre píxeis das imagens, as nuvens de pontos são criadas e, assim, é possível navegar tridimensionalmente devido à orientação externa. A Figura 80 é a ilustração da interface do Photosynth, mostrando a etapa de seleção de imagens.

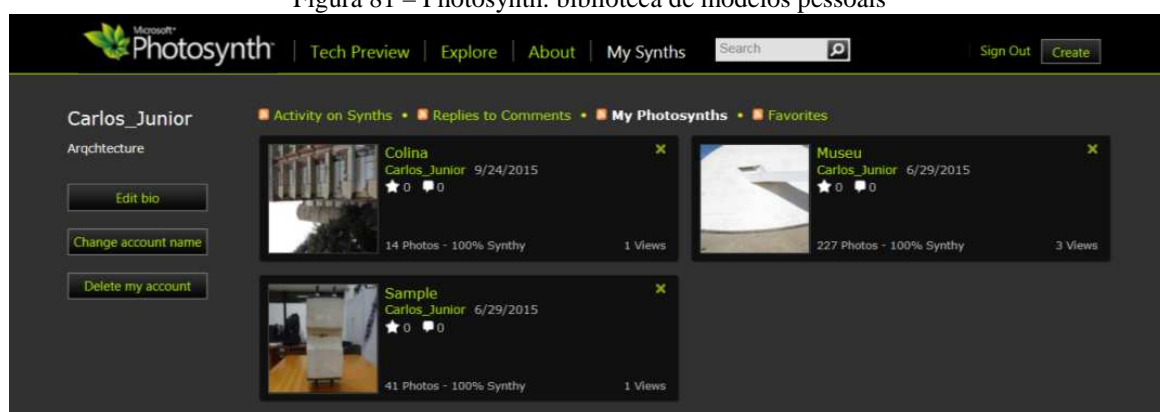
Figura 80 – Photosynth: seleção de imagens



Fonte: próprio autor.

Posteriormente, faz-se necessário acessar a conta para a visualização dos modelos dentro da biblioteca pessoal, ilustrada na Figura 81. Por fim, o Photosynth só permite que os modelos sejam visualizados pelo navegador *Internet Explorer* e não permite a exportação de ortomagens.

Figura 81 – Photosynth: biblioteca de modelos pessoais

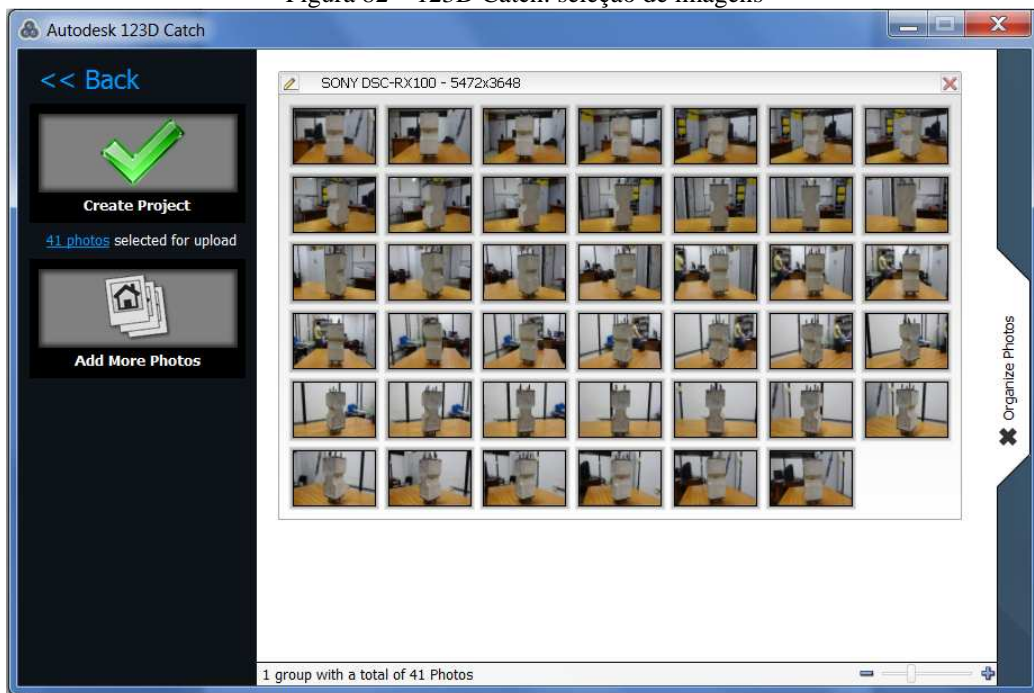


Fonte: próprio autor.

5.3.2 123D Catch

O 123D Catch é um programa livre para *download* em que o processamento é por meio do carregamento (*upload*) de imagens para os servidores da Autodesk e, após etapas de orientação externa, o produto é gerado, podendo-se visualizar, como opções, a malha triangular e a textura aplicada. A Figura 82 apresenta a interface gráfica do 123D Catch.

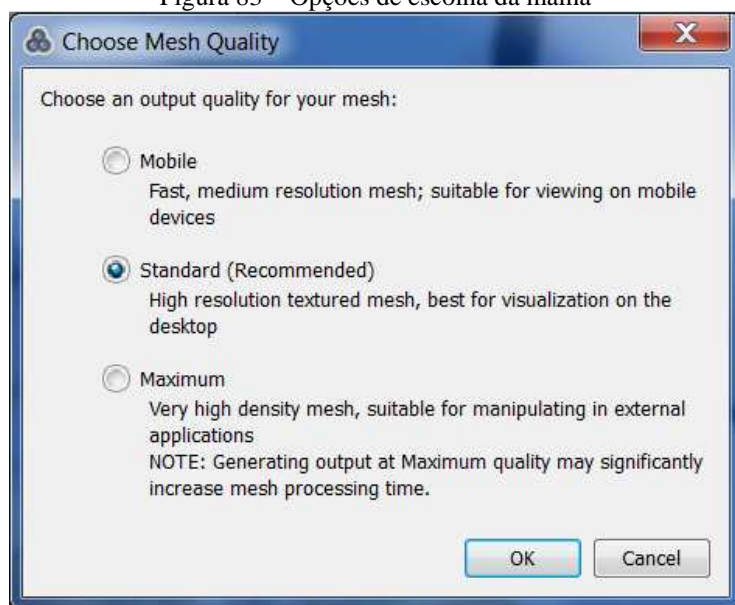
Figura 82 – 123D Catch: seleção de imagens



Fonte: próprio autor.

A partir da opção *Choose Mesh Quality*, o usuário pode alterar o refinamento da malha, sendo oferecidas pelo programa três possibilidades: *mobile*, *standand* e *maximim*, como pode ser visto na Figura 83, em ordem crescente de refinamento.

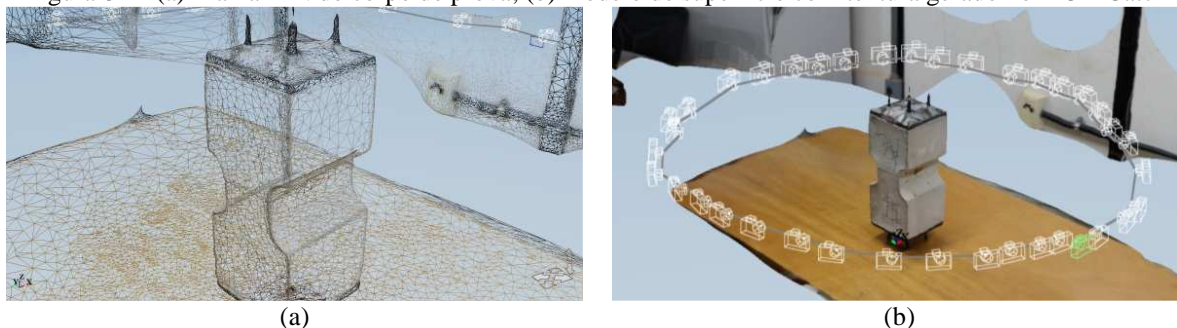
Figura 83 – Opções de escolha da malha



Fonte: próprio autor.

Dentre outras poucas possibilidades do programa, o 123D Catch permite a visualização do posicionamento da câmera no momento da fotografia e a malha poligonal criada para o objeto, como ilustrado na Figura 84.

Figura 84 – (a) Malha TIN do corpo de prova; (b) modelo de superfície com textura gerado no 123D Catch



Fonte: próprio autor.

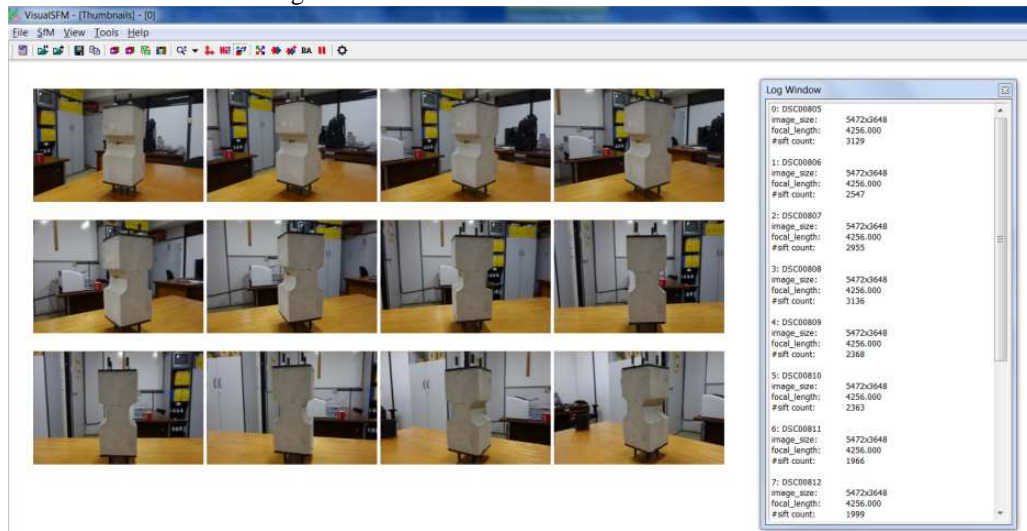
O 123D Catch permite a obtenção de medidas dos objetos por ferramentas específicas após a orientação externa absoluta e também não possui a opção de exportação de ortoimagens.

5.3.3 VisualSfM

O VisualSfM é um programa livre utilizado para a construção de nuvens esparsas e densas. No entanto, para a construção da nuvem densa foi instalado o *software* CMVS desenvolvido por Yasutaka Furukawa para a sua geração. A operação no VisualSfM inicia-se com o carregamento

das imagens e posteriormente a geração da nuvem esparsa através do comando *Reconstruct Sparse* ou *Compute 3D Reconstruction*.

Figura 85 – Interface de trabalho do VisualSfM



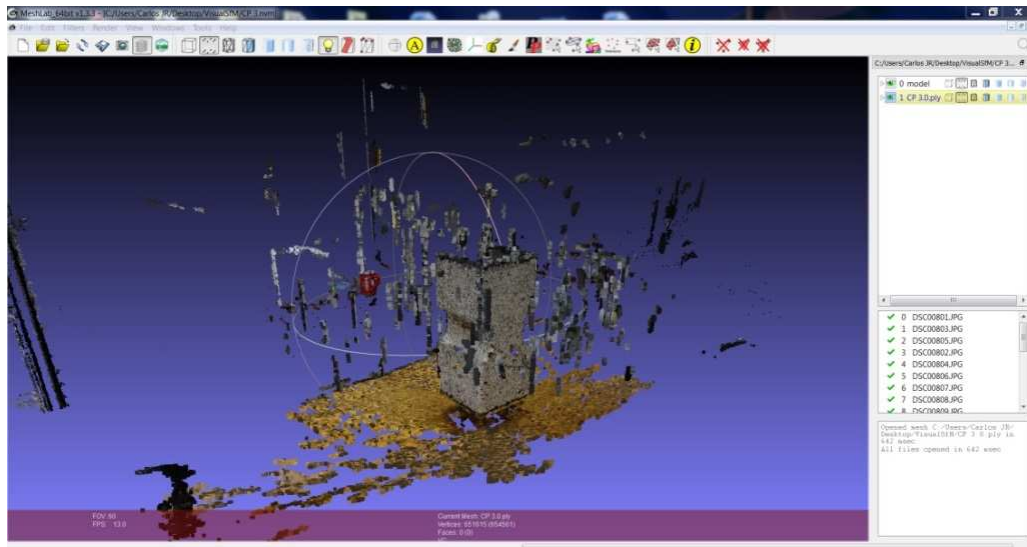
Fonte: próprio autor.

A operação para a reconstrução da nuvem densa é realizada a partir da opção *Run Dense Reconstruction*, em que uma janela é aberta para salvar o modelo e o processamento é realizado. Para a visualização do modelo de nuvem de pontos densa, usa-se a tecla *Tab*.

5.3.4 MeshLab

O MeshLab é um programa empregado para a processamento de nuvens de pontos para a geração de malhas poligonais e aplicação de texturas. A primeira etapa consiste em abrir o projeto desejado (*Open Project*) e também importar a nuvem (*Import Mesh*). Após importação da nuvem, os pontos da nuvem que não possuem interesse devem ser selecionados pelo comando *Select Vertexes* e excluídos pelo comando *Delete the current set of selected vértices*. A Figura 86 ilustra a interface do programa MeshLab com um modelo de nuvem de pontos densa.

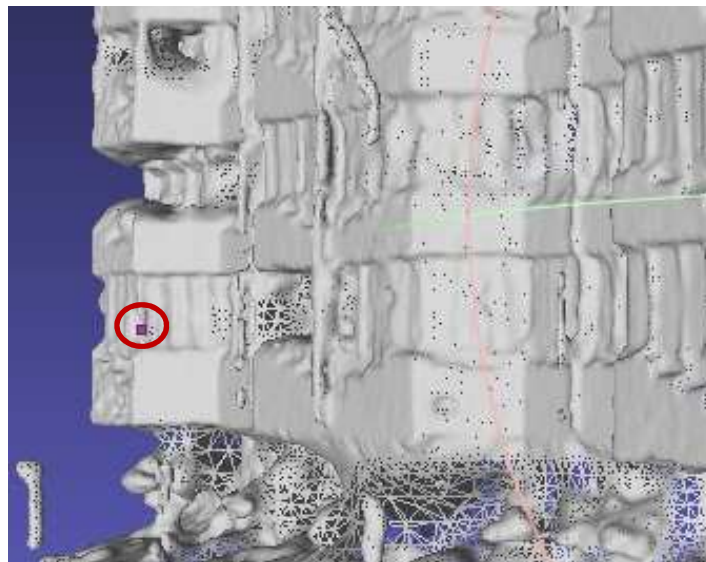
Figura 86 – Interface de trabalho do MeshLab



Fonte: próprio autor

Nesta próxima fase, a opção *Surface Reconstruction: Poisson* deve ser acionada, presente barra de ferramenta *Filter, Point Set*. Erros no modelo gerado podem ocorrer e esses podem ser visualizados pelas opções: *Show Non Manif Vertices* e *Show Non Manif Edges*, como ilustrado na Figura 87. Esses devem ser selecionados pela opção *Filter: Selection: Select Non Manifold Vertices* e *Edges* e finalmente excluídos pelos comandos *Delete Selected Vertices and Faces*.

Figura 87 – Erro detectado no vértice do modelo



Fonte: próprio autor

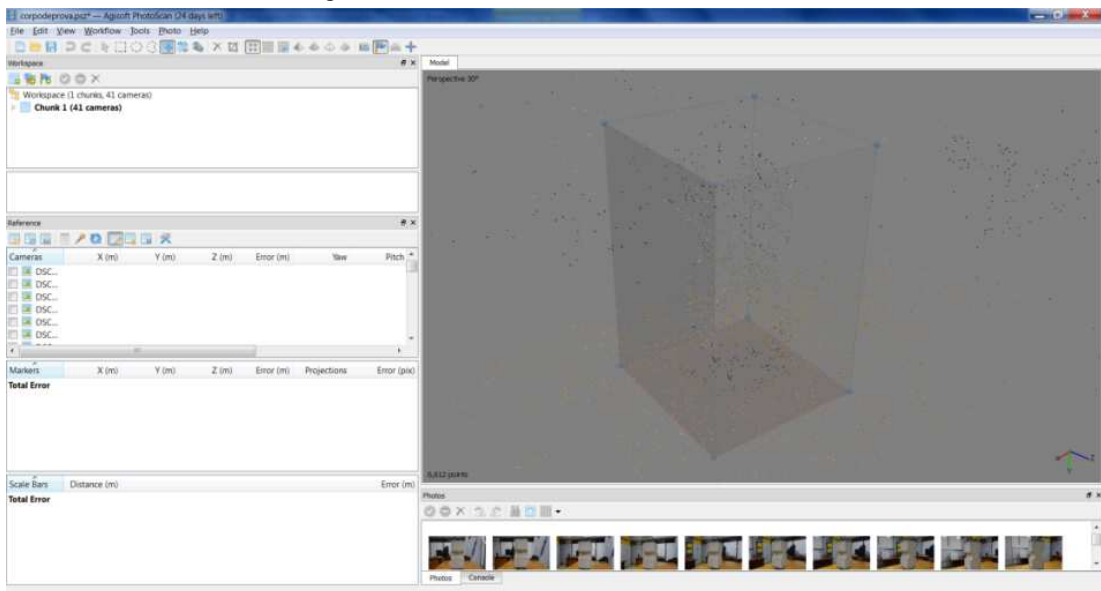
Após a construção da malha poligonal, vértices do modelo podem ser excluídos – caso não interessem como resultado – por meio da seleção e exclusão de pontos da nuvem. Para a

aplicação da textura é selecionada a opção: *Filters: Texture: Parameterization + Texturing from registered rasters*. Por fim, o MeshLab não tem a opção para exportação de ortoimagens.

5.3.5 PhotoScan

O PhotoScan versão 1.1.2 *build* (2014) possui etapas bastante definidas e uma interface prática no que diz respeito à operação, que segue os seguintes procedimentos: alinhamento de imagens e reconstrução da nuvem de pontos esparsa; delimitação da área para construção da nuvem densa; construção da nuvem densa; construção da malha (*mesh*); e aplicação da textura.

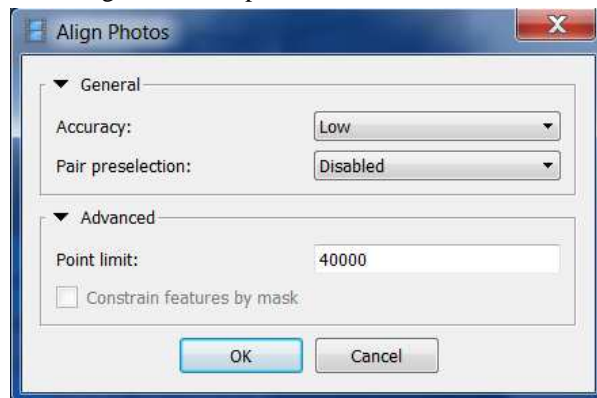
Figura 88 – Interface de trabalho do PhotoScan



Fonte: próprio autor

No alinhamento das imagens, *menu workflow*, são definidos parâmetros, como: a precisão (*accuracy*) e o par pré-selecionado (*pair preselection*). Maiores valores de *accuracy* permitem uma maior precisão do posicionamento da câmera. Para processamentos mais rápidos, a pré-seleção *generic* no campo *pair preselection* pode ser escolhida.

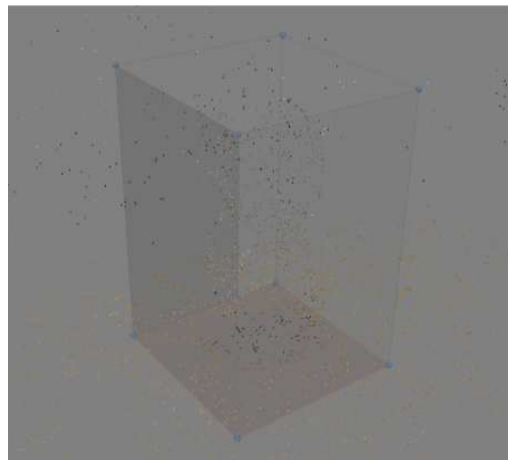
Figura 89 – Etapa de alinhamento das fotos



Fonte: próprio autor

Após a etapa de alinhamento, uma caixa com dimensões calculadas automaticamente é inserida, objetivando um refinamento por delimitação da nuvem esparsa a ser processada. A dimensão da caixa pode ser alterada, assim como rotacionada, abrangendo somente os pontos da nuvem de interesse.

Figura 90 – Caixa delimitadora da área de interesse para o processamento da nuvem densa



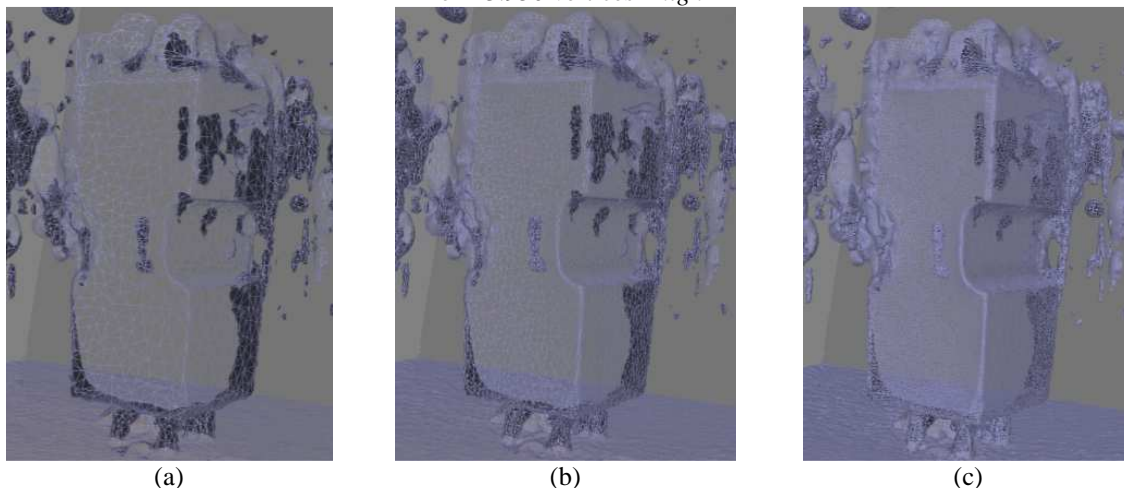
Fonte: próprio autor.

Na etapa de construção densa (*build dense cloud*), a partir das posições estimadas da câmera, o programa calcula as informações de profundidade para cada câmera para serem combinadas num único ponto da nuvem densa. A qualidade (*quality*) pode ser alterada, porém quanto maior for a qualidade requerida, maior o custo computacional. No recurso avançado, a filtragem de profundidade (*depth filtering*) apresenta as opções *aggressive* e *mild*. Quando a geometria da cena a ser reconstruída é complexa, com inúmeros pequenos detalhes sobre o plano e se deseja um processamento rápido e com poucos detalhes, é recomendado o modo *mild*. Importante

informar que pontos da nuvem densa, como ruídos, podem ser removidos a partir das ferramentas de seleção (*selection tools*) e o comando *delete/crop*, localizado na *toolbar*.

A malha (*mesh*) é gerada após a reconstrução da densa nuvem de pontos. Dentre os parâmetros, citam-se: *surface type*, *source data*, *face count* e *interpolation*. No modo *source data*, pode-se optar pela construção da malha a partir da nuvem de pontos esparsa ou densa, lembrando que a nuvem densa possui um nível de informações maior e com mais detalhes. A opção *face count* permite que se defina a quantidade de faces do modelo e esse número é baseado nas informações da nuvem de pontos densa. As opções para *face count* são: *high*, *medium*, *low* e *custom*. A Figura 91 seguir apresenta as três variações de número de faces para um modelo, como exemplificação.

Figura 91 – (a) Modelo em malha poligonal com 26.860 faces e 15.226 vértices – *low*; (b) Modelo em malha poligonal com 80.580 faces e 42.781 vértices – *medium*; (c) Modelo em malha poligonal com 241.742 faces e 123.950 vértices - *high*



Fonte: próprio autor.

A quantidade necessária de faces para um modelo estará relacionada ao nível de detalhamento que se espera de um modelo e quanto maior esse nível, maior também será o custo computacional, ou seja, tempo necessário para processamento e, enfim, o desempenho requerido do *hardware*. Se o modelo for gerado a partir da nuvem de pontos esparsa, naturalmente a quantidade de faces e vértices reduzirá.

A etapa de aplicação da textura (*build texture*) pode ser ignorada se o modelo sem textura já é suficiente como um resultado final. Como parâmetros a serem adotados para essa etapa, listam-se: *mapping mode*, *blending mode*, *texture size/count* e *enable color correction*. *Mapping mode* determina como a textura será aplicada ao objeto e o PhotoScan possui as seguintes opções:

generic, adaptive orthophoto, orthophoto, spherical, single photo e *keep uv*. O Quadro 13 apresenta a descrição de cada *mapping mode*.

Quadro 13 – Tipos de aplicação de textura do PhotoScan

Modos de textura	Indicação
<i>Generic</i>	Permite parametrizar a textura para os tipos de geometrias arbitrárias.
<i>Adaptive orthophoto</i>	Neste modo, a superfície do objeto é dividida em partes planas e regiões verticais, em que cada uma recebe a textura separadamente para obtenção da precisão.
<i>Orthophoto</i>	A superfície do objeto inteiro é texturizada por projeção ortográfica.
<i>Spherical</i>	Adequado para classe de objetos que possuem formato esférico.
<i>Single photo</i>	Permite gerar a textura a partir de uma única foto selecionada.
<i>Keep uv</i>	Usado para reconstruir texturas usando diferentes resoluções ou para gerar atlas de texturas para modelos parametrizados em outros programas.

Fonte: próprio autor.

Blending mode é a opção como os píxeis de diferentes imagens serão combinados na textura final, sendo estes: *mosaic* (permite melhor qualidade à ortoimagem), *average* (valor da média dos píxeis), *max intensity* (utiliza a foto com píxel de maior intensidade) e *min intensity* (utiliza a foto com píxel de menor intensidade). *Texture size/count* determina o tamanho da textura e o número de arquivos para a textura a ser exportada. *Enable color correction* importante para o processamento de dados que houve extrema variação de brilho, porém esse processo é lento e somente indicado para projetos que apresentaram pouca qualidade.

O programa PhotoScan permite que ortoimagens sejam exportadas. Recomenda-se que antes da exportação, a orientação externa absoluta seja realizada a partir de medidas extraídas do edifício: uma no sentido horizontal e outra no sentido vertical, em que as duas medidas formem também um ângulo de 90° entre si.

Figura 92 – Especificação de marcas para orientação externa absoluta no PhotoScan

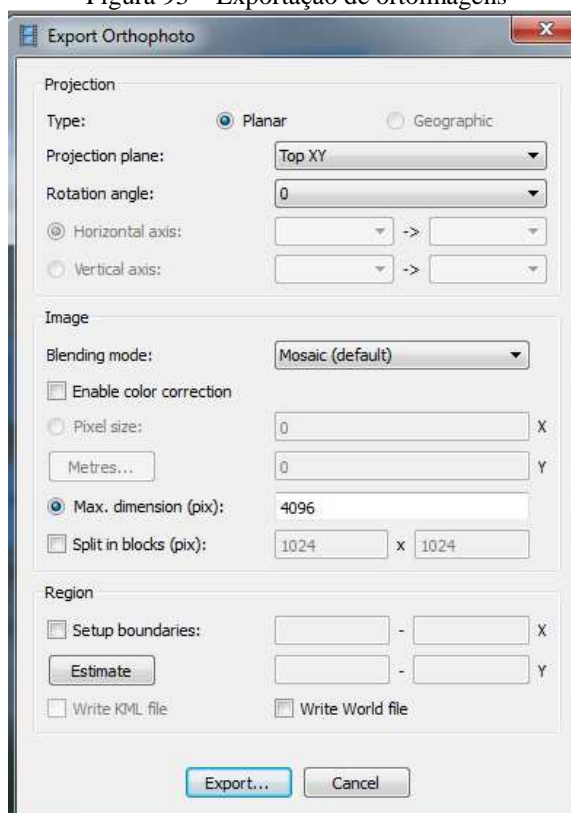


Fonte: próprio autor.

Em algumas edificações, estas medidas podem ser facilmente identificáveis sobre a superfície da fachada, sendo necessária somente a realização da medição com instrumentos, para posteriormente essas serem inseridas no modelo. Quando isso não é possível, a colocação de alvos sobre a fachada pode ser feita, permitindo que essas sejam obtidas posteriormente no modelo gerado.

Nesta etapa de exportação, pode ser definida a resolução da ortoimagem em função da quantidade de píxeis no sentido da maior dimensão da imagem pela opção: *Max. Dimension (pix)*, como ilustrado na Figura 93. Para todas as exportações, o formato de arquivo utilizado foi o TIFF (*Tagged Image File Format*).

Figura 93 – Exportação de ortoimagens



Fonte: próprio autor.

A configuração mínima para operação do PhotoScan no sistema operacional Windows é de Windows XP, com processador Intel Core 2 Duo e 2 GB de memória RAM, mas esta configuração limitará o número de fotos. Para o processamento de 20 a 30 fotos, pensando-se em fotos com 10 megapíxeis, o mínimo exigido de memória RAM é de 2 GB e para 200 a 300 imagens faz-se necessário 12 GB.

Cabe destacar que este *software* permite uma ampla faixa de operação quanto à qualidade do resultado final, desde resultados de baixa resolução a resultados altamente elaborados, com um custo computacional crescente neste sentido.

Algumas informações sobre o *software* PhotoScan foram baseadas na publicação Agisoft PhotoScan User Manual (2014).

5.4 APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS NA GERAÇÃO DE MODELOS POR DSM

Neste subitem serão apresentados os resultados gerados por DSM (*Dense Stereo Matching*) ou geração de modelos por nuvem de pontos de edificações e também modelos gerados de outro objeto: um corpo de prova de argamassa. Alguns experimentos, além, principalmente, da fotogrametria aérea, foram realizados também pela técnica de fotogrametria terrestre, inclusive para verificar uma possível diferença entre as técnicas, mais especificamente tratando-se de possíveis erros que podem surgir pelo uso da fotogrametria terrestre para edificações muito altas ou as oclusões causadas por outros elementos da fachada. Foram utilizados alguns tipos de programas, citando-se: via *web*, programas livres gratuitos e programas comerciais.

Algumas das edificações foram escolhidas pelo valor cultural e histórico no cenário arquitetônico, como: o Museu Nacional Honestino Guimarães, Torre de TV Digital de Brasília e o Prédio do Congresso Nacional – Anexo 1, todos do renomado arquiteto Oscar Niemeyer. Prédios com formas arquitetônicas e revestimentos nas fachadas distintos foram outras diretrizes para a escolha dos edifícios. Outro aspecto preponderante, é que as fachadas das edificações possuíssem alguma manifestação patológica perceptível, como: manchas, destacamento de revestimento, fissuras, dentre outras.

Houve certas delimitações no emprego dos programas, ou seja, nem todos os programas foram usados em todos os modelos por motivos específicos, como: a quantidade máxima de imagens por programa, o desempenho do *hardware* utilizado e a possibilidade de exportação de ortomagens. No entanto, para o modelo corpo de prova todos os programas citados foram utilizados.

5.4.1 Corpo de prova

Os experimentos realizados com um corpo de prova foram importantes para adquirir conhecimentos sobre os programas, gerar conhecimento da prática e analisar os resultados obtidos. O corpo de prova de argamassa colante foi usado em pesquisa de um dos alunos do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção (PECC) da Universidade de Brasília (UnB) e possuía altura de 28 cm e base quadrada de lado igual a 12 cm (Figura 94). A câmera utilizada foi a Sony RX100, abertura f/6,3, tempo de exposição de 1/4 s e sensibilidade ISO-125, e foram tiradas 41 fotos em torno do objeto. Por alguns programas, chegou-se simplesmente a geração de modelos de nuvem de pontos, devido às suas peculiaridades, e em outros programas foram obtidas também as malhas TIN e os modelos de superfície com textura. A Figura 94 é a ilustração de uma sequência de quatro imagens utilizadas na construção dos modelos.

Figura 94 – Corpo de prova



Fonte: próprio autor.

Photosynth

O resultado da nuvem de pontos gerada no programa via *web* da Photosynth está apresentado na Figura 95. As nuvens de pontos são importantes para passar informações sobre a geometria dos objetos, no entanto, apesar dos píxeis possuírem os atributos referentes à cor do objeto, não são capazes de apresentarem os detalhes finos de um modelo de superfície e o Photosynth somente gera as nuvens de pontos baseadas na orientação externa absoluta.

Figura 95 – Modelo de nuvem de pontos gerado no Photosynth



Fonte: próprio autor.

Por meio da orientação externa realizada pela identificação dos pontos homólogos, é possível rotacionar o modelo no Photosynth como se fosse realmente um modelo geométrico, já que as fotos estão orientadas, dando a ligeira impressão de um modelo de superfície (Figura 96).

Figura 96 – Imagem do corpo de prova após a orientação no Photosynth



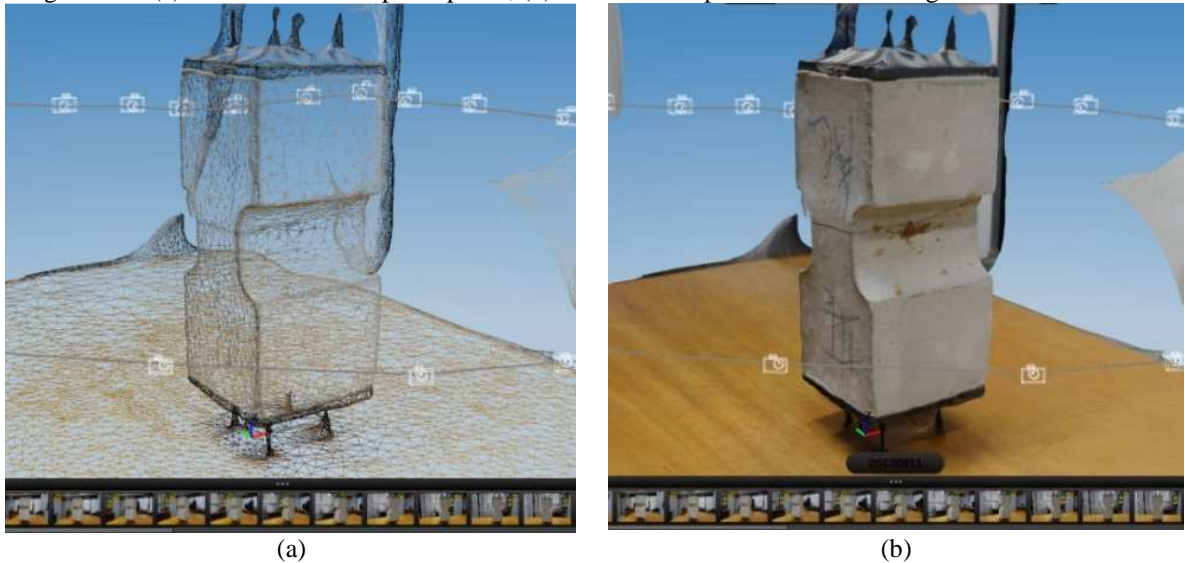
Fonte: próprio autor.

Em síntese, a malha TIN e os modelos de superfície não são gerados, somente a nuvem de pontos. O usuário visualiza o objeto tridimensionalmente a partir da orientação externa.

123D Catch

Outro programa via *web* utilizado foi o 123D Catch, no entanto neste programa é criada a malha TIN e também aplicada a textura sobre o modelo de superfície. As Figura 97 (a) e (b) apresentam, respectivamente, a malha TIN e o modelo de superfície do corpo de prova processado e os resultados foram satisfatórios.

Figura 97 – (a) Malha TIN do corpo de prova; (b) Modelo de superfície com textura gerado no 123D Catch

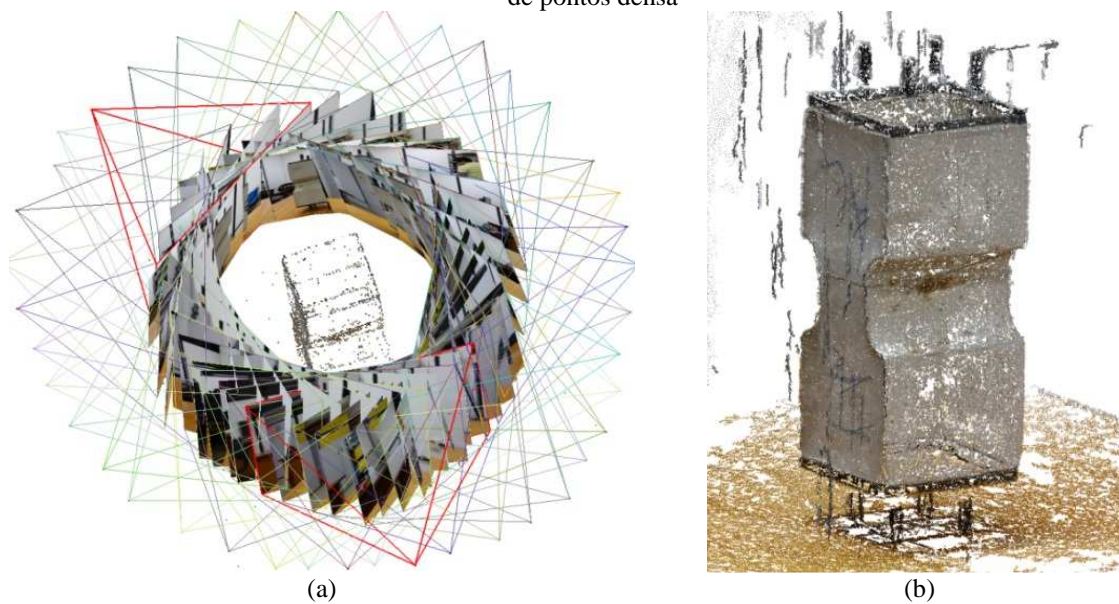


Fonte: próprio autor.

VisualSfM

Por meio do programa VisualSfM, modelos de nuvem de pontos densa foram gerados, após a etapa de geração da nuvem esparsa, apresentadas na Figura 98.

Figura 98 – Corpo de prova pelo VisualSfM; (a) Modelo de nuvem de pontos esparsa; (b) Modelo de nuvem de pontos densa

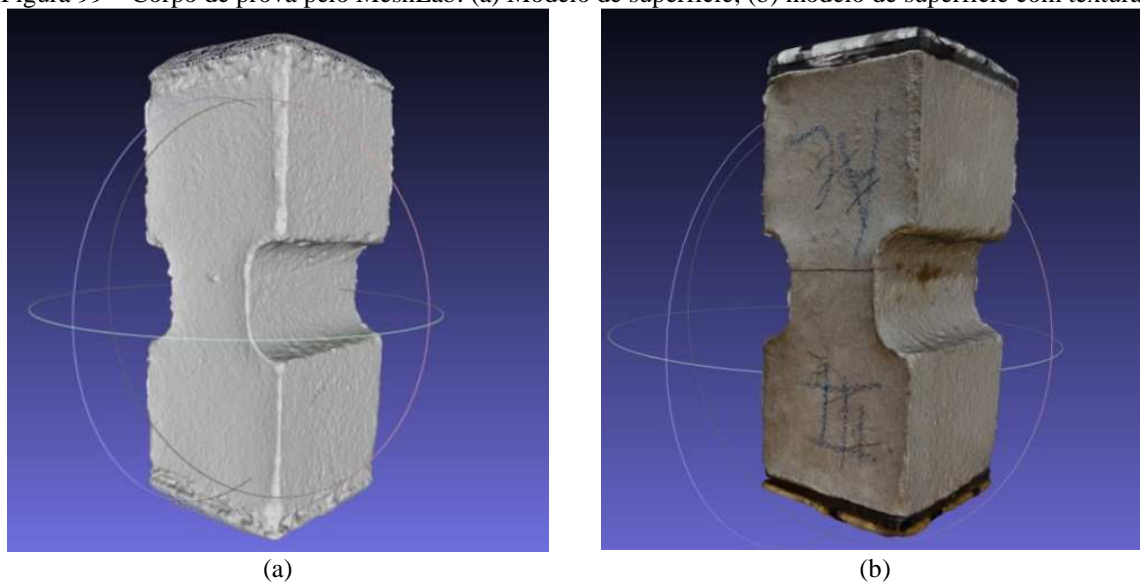


Fonte: próprio autor.

MeshLab

A nuvem de pontos do corpo de prova gerada no VisualSfM foi importada para o programa MeshLab, a malha TIN foi gerada e depois foi aplicada a textura sobre este modelo, obtendo-se um resultado também satisfatório, como pode ser visto na Figura 99.

Figura 99 – Corpo de prova pelo MeshLab: (a) Modelo de superfície; (b) modelo de superfície com textura



Fonte: próprio autor.

PhotoScan

O programa comercial PhotoScan da Agisoft LLC apresentou resultados tão satisfatórios quanto os gerados no 123D Catch e o MeshLab. No PhotoScan, foram criados três modelos com parâmetros específicos, apresentados no Quadro 14, variando precisão da etapa de alinhamento das fotos, qualidade da nuvem densa e a quantidade de faces do modelo, com a finalidade de avaliar visualmente o resultado final dos modelos.

Quadro 14 – Parâmetros utilizados no PhotoScan para o corpo de prova

Parâmetros	Modelo 1-CP	Modelo 2-CP	Modelo 3-CP
Align Photos			
<i>Accuracy</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>	<i>Disable</i>	<i>Disable</i>
Nuvem de pontos esparsa	8.574 pontos	6.695 pontos	6.408 pontos
Tempo de processamento	40 s	135 s (2 min e 15 s)	296 s (4 min e 56 s)
Build Dense Cloud			
<i>Quality</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Ultra High</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>
Nuvem de pontos densa	682.946 pontos	2.706.068 pontos	21.776.485 pontos
Tempo de processamento	54 s	382 s (6 min e 20 s)	14.560 s (4 h e 3 min)
Build Mesh			
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Low (20.000)</i>	<i>Medium (181.066)</i>	<i>High (4.359.977)</i>
Outras opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High (180.000)</i> <i>Medium (60.000)</i> <i>Custom (200.00)</i>	<i>High (541.207)</i> <i>Low (60.134)</i> <i>Custom (200.000)</i>	<i>Medium (1.451.762)</i> <i>Low (483.920)</i> <i>Custom (200.000)</i>
Tempo de processamento	27 s	103 s (1 min e 43 s)	1.111 s (18 min e 31 s)
Build Texture			
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>	<i>Generic</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1	4000x1	4000x1
Tempo de processamento	67 s (1 min e 7 s)	80 s (1 min e 20 s)	541 s (9 min e 1 s)

Fonte: próprio autor.

O Quadro 14 apresenta também o tempo gasto (ou custo computacional) em cada etapa de processamento. O maior tempo gasto, como esperado, foi para o modelo 3-CP, pelos níveis estabelecidos dos parâmetros (*high* e *ultra high*). Para este modelo, o tempo gasto para a construção da nuvem densa chamou a atenção, pois duraram 4 horas e 3 minutos para o processamento das 41 imagens. A etapa de construção da malha possibilitou para cada modelo opções de construção a partir de valores de nuvens densas, apresentado no Quadro 15. Os valores que foram usados para cada modelo estão em destaque no Quadro 15.

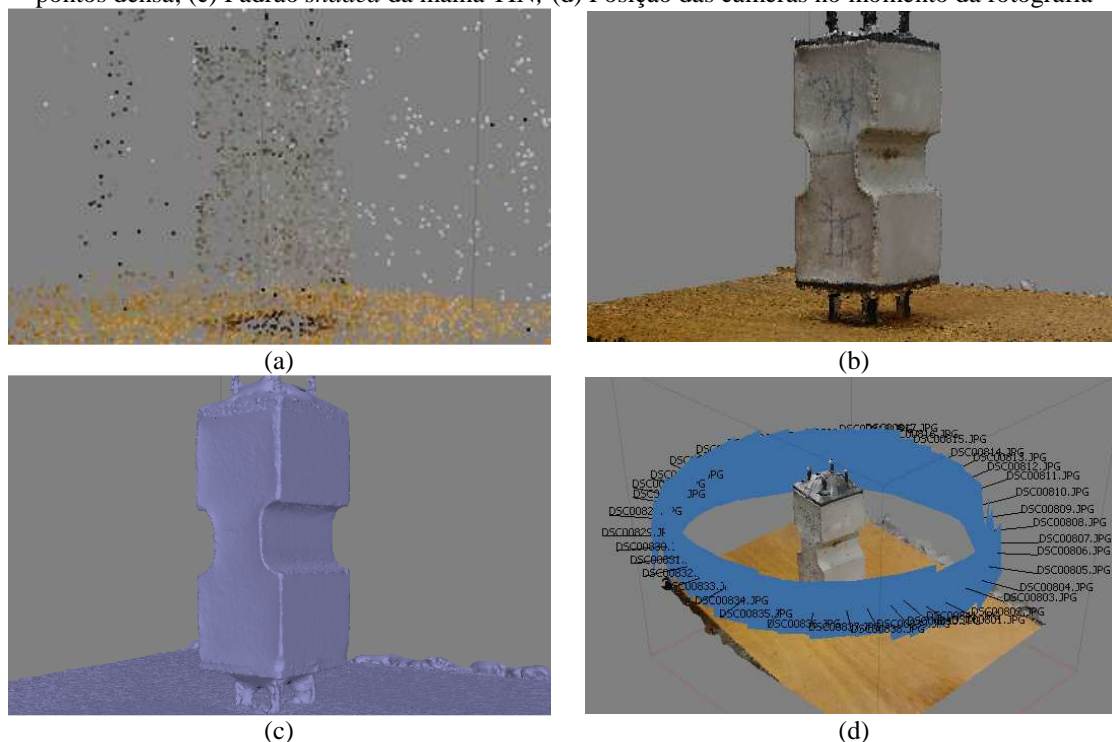
Quadro 15 – Opções de quantidades de faces para geração da malha TIN no PhotoScan para o corpo de prova

Modos	Modelo 1-CP	Modelo 2-CP	Modelo 3-CP
<i>Low</i> (quantidade de faces)	20.000	60.134	483.920
<i>Medium</i> (quantidade de faces)	60.000	181.066	1.451.762
<i>High</i> (quantidade de faces)	180.000	543.207	4.359.977

Fonte: próprio autor.

Na Figura 107 visualizam-se as imagens das etapas do processamento no PhotoScan: a nuvem de pontos esparsa, a nuvem de pontos densa, o padrão *shaded* da malha TIN e o posicionamento das câmeras no momento da foto do modelo 2-CP do corpo de prova.

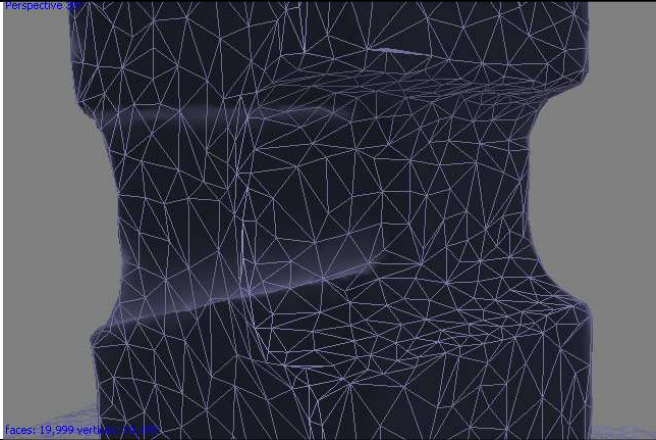
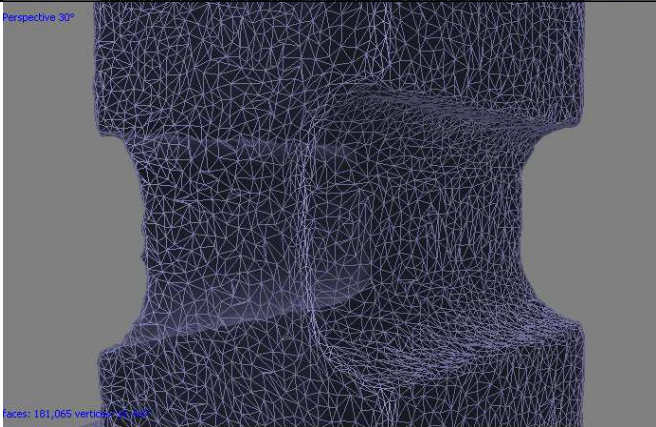
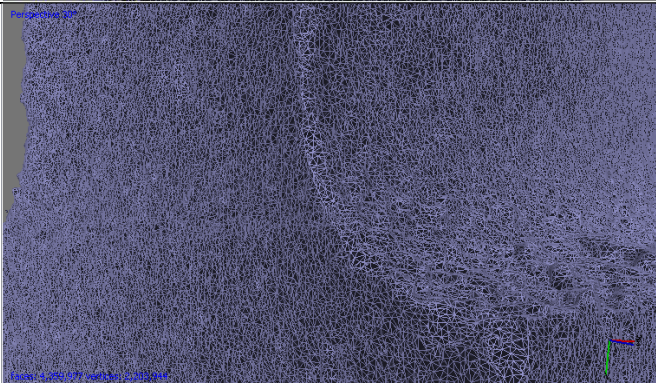
Figura 100 – Modelo 2_CP pelo programa PhotoScan: (a) Nuvem de pontos esparsa; (b) Nuvem de pontos densa; (c) Padrão *shaded* da malha TIN; (d) Posição das câmeras no momento da fotografia



Fonte: próprio autor.

O Quadro 16 apresenta as malhas obtidas para os três modelos e observa-se um aumento do refinamento da malha à medida em que os modos dos parâmetros aumentados. Destaca-se que ao refinar qualquer malha por meio, inicialmente, da geração de uma nuvem densa, maior será a quantidade de faces do modelo final e maior a aproximação com a forma real, importante, principalmente, para os objetos ou cenas com formas mais orgânicas e ricas em detalhes.




Quadro 16 – Malha triangular irregular (TIN) dos modelos 1, 2 e 3 do corpo de prova gerado no programa PhotoScan

Modelos	Malha triangular irregular
<p>Modelo 1-CP 20.000 faces</p>	
<p>Modelo 2-CP 181.066 faces</p>	
<p>Modelo 3-CP 4.359.977 faces</p>	

Fonte: próprio autor.

Verificou-se que após a etapa de alinhamento e geração da nuvem de pontos densa, os modelos com maiores valores dos parâmetros, média e alta precisão (*accuracy: médium e high*), apresentaram mais ruídos que o modelo gerado com baixa precisão, como se pode observar no Quadro 17.

Quadro 17 – Ruídos dos modelos 1, 2 e 3 do corpo de prova gerado no programa PhotoScan







Modelos	Modelos geométricos
Modelo 1-CP	
Modelo 2-CP	
Modelo 3-CP	

Fonte: próprio autor

Para a construção das malhas, os ruídos foram excluídos com a ferramenta de seleção e o comando *delete/crop*, para ocorrerem menos interferências no processamento da malha e um menor custo computacional.

Após a etapa de construção da malha pelo processo de triangulação, as texturas foram aplicadas nos modelos de superfície, e as imagens ampliadas de parte do corpo de prova dos três modelos podem ser vistas no Quadro 18.

Quadro 18 – Partes ampliadas do corpo de prova dos modelos 1, 2 e 3 geradas no programa PhotoScan




Modelos	Faces dos modelos	
Modelo 1-CP		
Modelo 2-CP		
Modelo 3-CP		

Fonte: próprio autor.

Os resultados nos três modelos obtidos apresentam pequenas variações da textura, quase que imperceptíveis, com qualidade visual semelhantes, não sendo determinantes os parâmetros de: precisão para o alinhamento das fotos e construção da nuvem de pontos esparsa, qualidade da nuvem de pontos densa e a quantidade de faces da malha.

Quanto ao aspecto da forma, mesmo com diferentes refinamentos da malha, os três modelos apresentaram resultados finais semelhantes. Para os modelos 1 e 2, observou-se que a parte da mesa à qual se posicionou o corpo de prova foi modelada completamente, enquanto que, para o modelo 3, parte da superfície não foi modelada, como demonstrado no Quadro 19.

Quadro 19 – Ruídos dos modelos 1, 2 e 3 do corpo de prova gerado no programa PhotoScan

Modelos	Modelos geométricos
Modelo 1-CP	
Modelo 2-CP	
Modelo 3-CP	

Fonte: próprio autor

Uma das hipóteses que se justifica a última afirmação é que se processando com parâmetros mais criteriosos, como a alta precisão do alinhamento e geração de nuvens de pontos esparsas, a necessidade de quantidade maior de fotos ou uso de equipamento fotográfico calibrado seja necessário para uma maior eficiência do processamento e posicionamento correto dos pontos que caracterizarão a geometria do objeto.

Para este modelo, todos os programas apresentaram resultados satisfatórios quanto ao aspecto da forma final do objeto e qualidade da textura. Dentre as ferramentas aplicadas, confirmou-se que o VisualSfM, juntamente ao MeshLab, e o PhotoScan necessitam de uma interação maior do usuário.

5.4.2 Edifícios residenciais

Neste item são apresentados experimentos realizados em edifícios residenciais que possuem diferentes alturas e tipos de acabamento e, em casos específicos, foram empregadas a fotogrametria terrestre e a fotogrametria aérea.

5.4.2.1 Edifício A

O primeiro modelo de edificação criado a partir de nuvem de pontos neste trabalho foi de um prédio residencial localizado em Brasília no setor Sudoeste que possui quatro pavimentos e revestimento em peça cerâmica. Pela posição da câmera em relação ao edifício, enquadra-se na classificação de fotogrametria à curta distância (fotografias feitas a menos de 300 m do edifício) e de fotogrametria terrestre porque não foi utilizado VANT para aquisição das fotos.

Foram feitas 70 fotografias em torno do edifício e a câmera utilizada para captura das imagens foi a Nikon 1 J1 com escala de número f/6,3, tempo de exposição de 1/125 s e sensibilidade ISO-100. A distância das tomadas fotográficas em relação ao prédio foi de 10 m e, assim, para alcançar a sobreposição de 80%, a distância entre as tomadas fotográficas foi de 3 m, baseando-se na Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Somente foram registradas as fachadas leste, oeste e sul, pois a fachada norte possuía muitas árvores próximas à edificação, que limitaram o registro por total desta fachada. A Figura 101 ilustra uma sequência de três imagens das 70 imagens utilizadas na construção dos modelos.

Figura 101 – Sequência de três imagens utilizadas na construção dos modelos do Edifício A



Fonte: próprio autor.

123D Catch

As imagens do Edifício A foram processadas no 123D Catch e o modelo geométrico foi gerado, como ilustrado na Figura 102.

Figura 102 – Edifício A pelo 123D Catch: (a) Modelo de nuvem de pontos esparsa; (b) Modelo de nuvem de pontos densa



Fonte: próprio autor.

O modelo foi gerado com êxito, apresentando limitações para as regiões da sacada. Quando se é realizada a tomada fotográfica no nível do solo, há sempre partes do edifício que não são

registradas, principalmente quando existem diferenças de planos, o que levou o programa a criar um modelo

VisualSfM

As nuvens de pontos foram obtidas no programa VisualSfM, como apresentadas na Figura 103, em que a Figura 103 (a) ilustra a nuvem de pontos esparsa e a Figura 103 (b) apresenta o modelo de nuvem de pontos densa.

Figura 103 – Modelo geométrico pelo VisualSfM do Edifício A: (a) Modelo de nuvem de pontos esparsa; (b) Modelo de nuvem de pontos densa

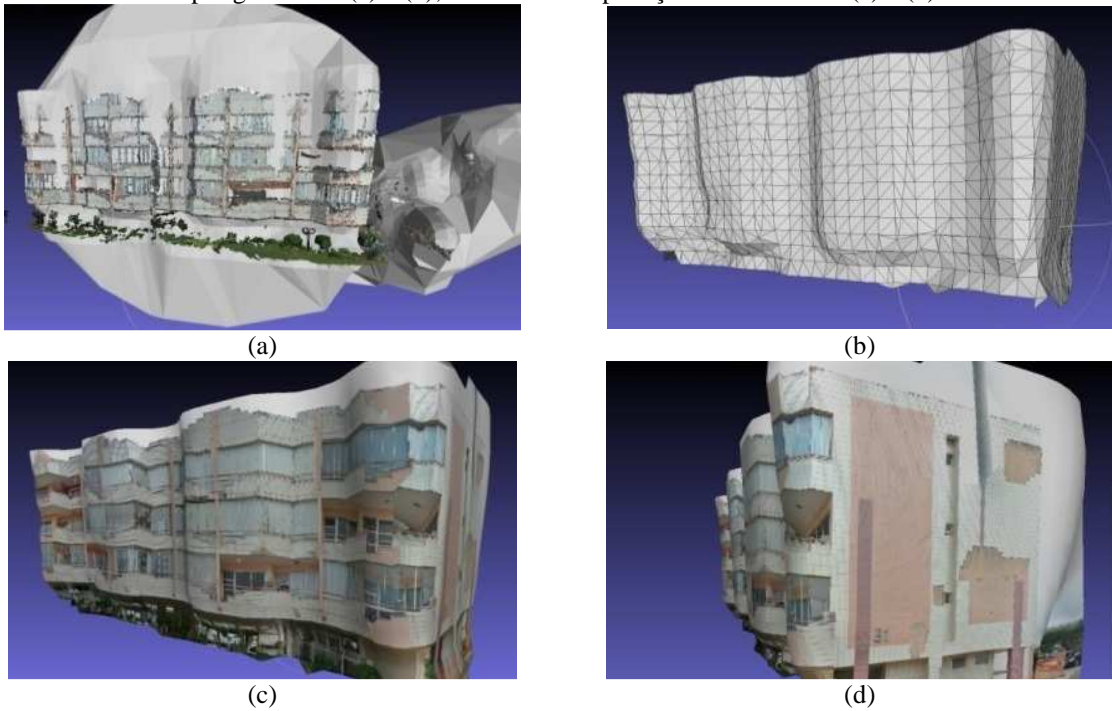


Fonte: próprio autor.

MeshLab

A nuvem densa de pontos do edifício foi importada para o MeshLab com o objetivo de gerar o modelo de malha poligonal triangular (malha TIN) e aplicação de textura. Devido à ausência de nuvem de pontos na cobertura e fachada norte, uma vez que estas não foram registradas por fotografias, o programa MeshLab gerou vértices aleatórios e um modelo final distintos da forma real da edificação (Figura 104 (a)). Assim, pontos da nuvem foram excluídos para redefinição do formato da edificação (Figura 104 (b)) e após esta etapa a textura foi aplicada obtendo o modelo apresentado nas Figura 104 (c) e (d).

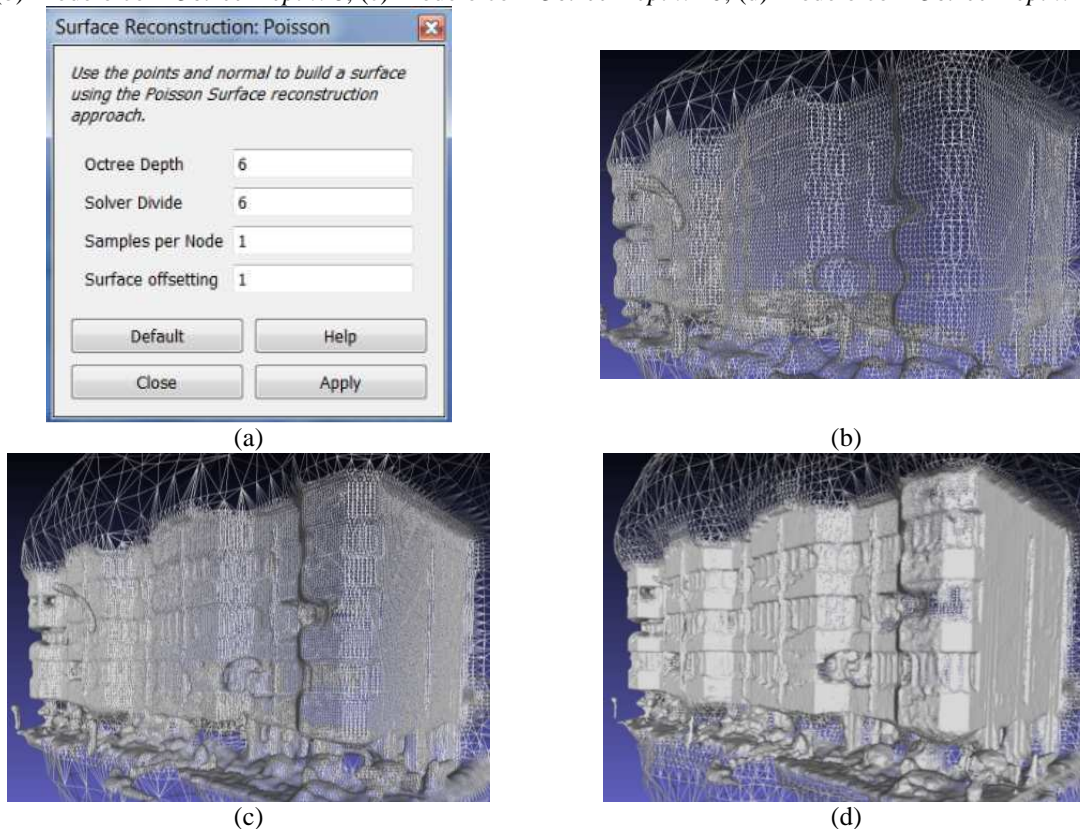
Figura 104 – Fases do processo de criação do modelo fotogramétrico no MeshLab: Modelo de malhas poligonais em (a) e (b); Modelo com aplicação da textura em (c) e (d)



Fonte: próprio autor.

Neste modelo, notou-se que a malha gerada não foi necessariamente refinada ao ponto de representar maiores detalhes do edifício e seu formato do real. Para alcançar estes propósitos, aumentou-se o valor de *Octree Depth* presente na etapa de *Surface Reconstruction: Poisson*. O modelo da Figura 104 foi gerado com *Octree Depth*: 6. A Figura 105 apresenta a janela com a opção *Octree Depth* e o refinamento da malha poligonal para o Edifício A, com valores para *Octree Depth* de 8, 10 e 12.

Figura 105 – Refinamento da malha poligonal da Edificação A; (a) Janela com a opção *Octree Depth*; (b) Modelo com *Octree Depth*: 8; (c) Modelo com *Octree Depth*: 10; (d) Modelo com *Octree Depth*: 12



Fonte: próprio autor.

O Quadro 20 contém a quantidade de faces e vértices que constituem os modelos com *octree depth*: 6, 8, 10 e 12.

Quadro 20 – Valores de *octree depth*, faces e vértices

<i>Octree depth</i>	Faces	Vértices
6	4.658	2.339
8	65.578	32.825
10	758.314	379.228
12	1.398.680	699.460

Fonte: próprio autor.

A partir do refinamento da malha por meio do aumento dos valores de *octree depth*, verificou-se um aumento representativo de faces e vértices e, assim, um maior nível de detalhamento do formato da edificação.

PhotoScan

O modelo do Edifício A também foi processado no PhotoScan a partir das mesmas 70 fotos e no Quadro 21 estão apresentados os parâmetros definidos para o modelo 1-EdA, gerado a partir da alta precisão no alinhamento das fotos, alta qualidade (*ultra high*) para a construção da nuvem densa e número máximo de faces no processo de construção da malha. A Figura 106 ilustra as posições da câmera nos momentos dos registros fotográficos, representadas pelos retângulos azuis.

Figura 106 – Posicionamento das câmeras



Fonte: próprio autor.

Quadro 21 – Modelo 1-EdA: parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 1 do Edifício A

Align Photos	
<i>Accuracy</i>	<i>High</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>
Tempo	401 s (6 min e 41 s)
Build Dense Cloud	
<i>Quality</i>	<i>Ultra high</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>
Tempo	12.292 s (3 h e 25 min)
Build Mesh	
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>High</i> (5.416.607) <i>Medium</i> (1.805.535) <i>Low</i> (601.845) <i>Custon</i> (200.000)
Tempo	990 s (16 min e 30 s)
Build Texture	
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1
Tempo	123 s (2 min e 3 s)

Fonte: próprio autor.

Para a construção da malha, quatro valores das quantidades de faces (*face count*) foram apresentados como opção para processamento, como visto no Quadro 21. Como o modelo apresentou muitos ruídos, foi necessário excluir muitos pontos da nuvem densa, visando à qualidade do produto final. Os valores de *face count* após esta exclusão passaram a corresponder a: *high*: 4.727.117; *medium*: 1.575.705; *low*: 525.235; e *custom*: 200.000, uma vez que houve redução do número de pontos da nuvem densa. A Figura 107 apresenta a nuvem densa original com ruídos, a nuvem densa após a eliminação de parte destes ruídos e a malha TIN do modelo.

A tarefa de eliminação de ruídos exige certos cuidados, pois parte da nuvem inerente ao objeto pode ser eliminada, resultando em modelos finais incompletos. Portanto, parte destes ruídos foi mantida devido à proximidade com as partes da fachada e o risco destas serem excluídas também, e notou-se também que muitos destes formaram-se essencialmente na parte superior da edificação. A Figura 108 ilustra o resultado final após todas as etapas de processamento.

Outros modelos também foram criados a partir da precisão média na etapa de alinhamento das fotos e a especificação dos demais parâmetros encontra-se no Quadro 22.

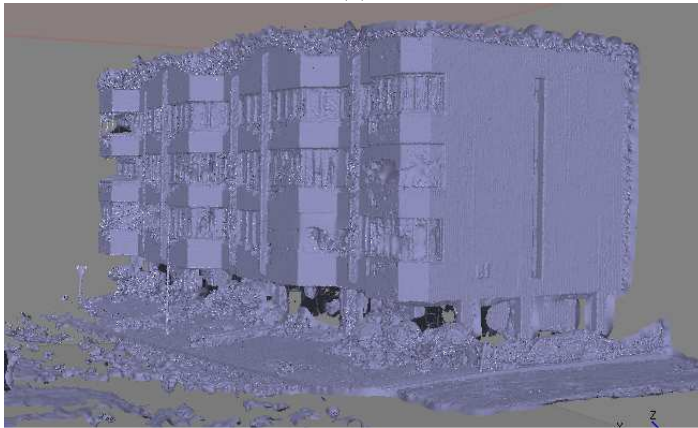
Figura 107 – Modelo 1-EdA pelo programa PhotoScan: (a) Nuvem de pontos densa; (b) Nuvem de pontos densa após exclusão de parte dos ruídos; (c) Padrão *shaded* da malha TIN



(a)



(b)



(c)

Fonte: próprio autor.

Figura 108 – Modelo 1-EdA pelo programa PhotoScan em (a) e (b)



(a)



(b)

Fonte: próprio autor

Quadro 22 – Parâmetros utilizados no PhotoScan para os modelos 2, 3 e 4 do Edifício A

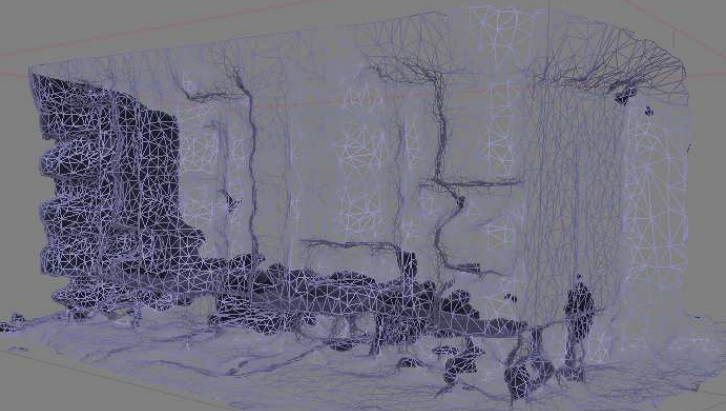

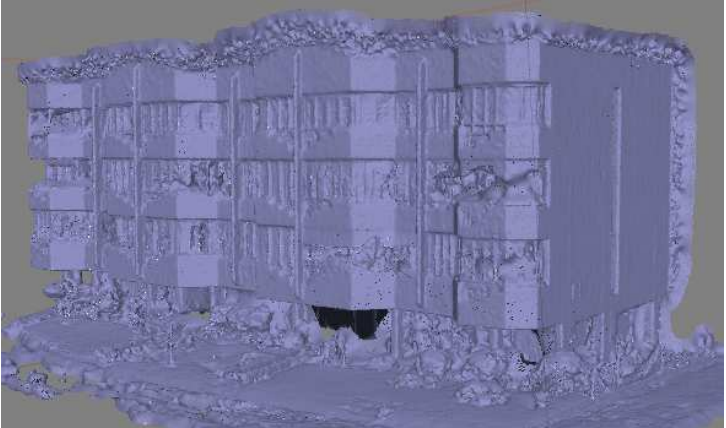
Parâmetros	Modelo 2-EdA	Modelo 3-EdA	Modelo 4-EdA
Align Photos			
<i>Accuracy</i>	<i>Medium</i>		
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>		
Tempo de processamento	103 s (1 min e 43 s)		
Build Dense Cloud			
<i>Quality</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>
Tempo de processamento	63 s (1 min e 3 s)	207 s (3 min e 27 s)	870 s (14 min e 30 s)
Build Mesh			
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Low</i> (20.000)	<i>Medium</i> (98.038)	<i>High</i> (1.206.538)
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High</i> (180.000) <i>Medium</i> (60.000) <i>Custom</i> (200.000)	<i>High</i> (294.114) <i>Low</i> (32.679) <i>Custom</i> (200.000)	<i>Medium</i> (402.179) <i>Low</i> (134.059) <i>Custom</i> (200.000)
Tempo de processamento	16 s	60 s	223 s
Build Texture			
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>	<i>Generic</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1	4000x1	4000x1
Tempo de processamento	27 s	46 s	75 s

Fonte: próprio autor.

O Quadro 23 apresenta as malhas para estes três modelos e mais uma vez é comprovado que quanto maior os parâmetros, maior é o refinamento da malha, que é importante para a geração de modelos com maior riqueza de detalhes da sua geometria.

O Quadro 24 apresenta os modelos geométricos para o modelo 2-EdA, modelo 3-EdA e modelo 4-EdA com a aplicação da textura. Observou-se uma maior definição dos contornos e arestas do modelo 4-EdA, devido ao seu maior refinamento da malha em relação ao modelo 2-EdA e modelo 3-EdA.

Quadro 23 – Malha triangular irregular (TIN) do Edifício A gerados no programa PhotoScan

Modelos	Malhas triangulares irregulares
Modelo 2-EdA	
Modelo 3-EdA	
Modelo 4-EdA	

Fonte: próprio autor.

Quadro 24 – Modelos geométricos com textura do Edifício A gerados no programa PhotoScan

Modelos	Modelos geométricos com textura
Modelo 2-EdA	
Modelo 3-EdA	
Modelo 4-EdA	

Fonte: próprio autor.

Entretanto, observou-se que partes da fachada dos modelos não possuíram bons resultados, como as sacadas e as partes envidraçadas, assim como no modelo gerado pelo programa 123D Catch. Os programas de fotogrametria digital por DSM têm dificuldade em processar elementos que possuem grandes mudanças de profundidade, principalmente quando a quantidade de fotos é pouca. Isto ocorreu nesta modelagem, justamente por ter se utilizado da fotogrametria terrestre, que limitou a quantidade de fotos no sentido vertical, não obtendo imagens de partes

ocultas. Outro aspecto é em referência às superfícies envidraçadas que dificultam a identificação dos pontos homólogos e causam resultados que não representam a forma real. A Figura 109 apresenta um exemplo destas limitações no modelo do edifício, em que se percebe o resultado delimitado de regiões de sacada e superfícies envidraçadas.

Figura 109 – Modelo do Edifício A gerado no PhotoScan



Fonte: próprio autor.

Apesar do revestimento cerâmico da fachada não ser favorável para a etapa de identificação de pontos homólogos pelo padrão repetitivo da textura em algumas partes, o edifício, desconsiderando as sacadas e as partes envidraçadas, apresentou um resultado satisfatório do ponto de vista da forma e da textura.

A Figura 110 apresenta outro modelo, em que a Figura 110 (b) é a ortoimagem da fachada leste da edificação gerada também no PhotoScan a partir de 6 fotos registradas com a câmera Panasonic DMC-GF2, em que se pode ver a presença de algumas manifestações patológicas, estando em maior evidência o destacamento de revestimento cerâmico e algumas manchas formadas sobre as áreas com destacamento.

Figura 110 – (a) Fotografia da Edificação A; (b) Ortoimagem do Edifício A gerado no PhotoScan



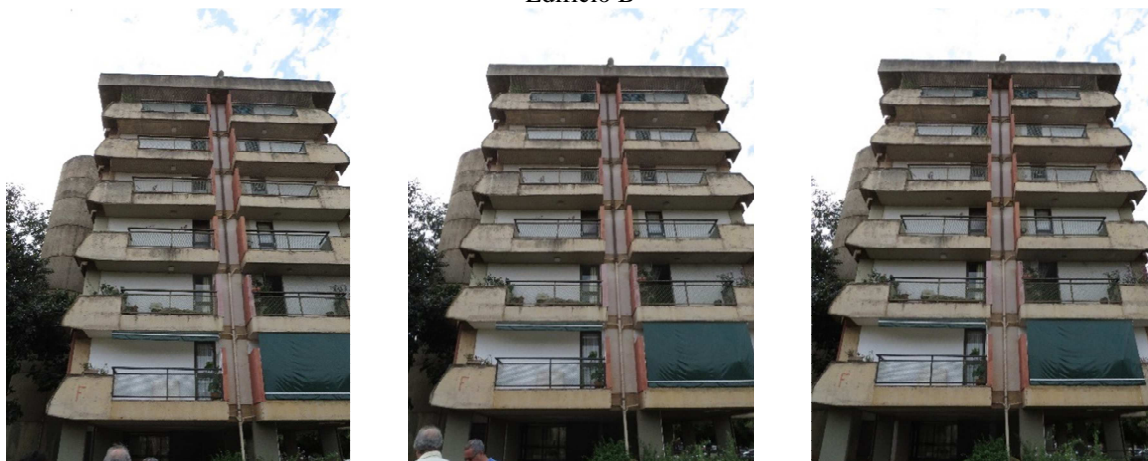
Fonte: próprio autor.

5.4.2.2 Edifício B

Para esta edificação, foram utilizadas a fotogrametria terrestre e a aerofotogrametria com a finalidade de verificar as possíveis diferenças no processo de modelagem e resultados dos modelos.

O Edifício B possui sete pavimentos e acabamento em concreto aparente com partes da sacada da varanda pintadas e somente conseguiu-se autorização para o registro fotográfico da fachada sul. A câmera utilizada foi Canon SX270 HS, com os seguintes parâmetros: escala de número f/5, tempo de exposição de 1/1000 s e sensibilidade ISO-400. As imagens, no modelo por fotogrametria terrestre, foram tiradas à distância de 12 m, sendo a posição da câmera no sentido vertical, para que pudesse enquadrar todo o prédio a uma distância menor, totalizando 14 imagens. O valor de sobreposição neste caso foi maior que 80%. A Figura 111 apresenta uma sequência de três imagens das 14 imagens utilizadas na construção dos modelos.

Figura 111 – Sequência de três imagens de fotografia terrestre utilizadas na construção dos modelos do Edifício B



Fonte: próprio autor.

PhotoScan

Foram gerados três modelos a partir das fotografias terrestres. O modelo 1-EdB foi criado com os mínimos parâmetros disponibilizados pelo programa PhotoScan, o modelo 2-EdB com parâmetros médios e o modelo 3-EdB com parâmetros máximos, visando a comparação entre os resultados para avaliação da qualidade dos produtos fotogramétricos. Os parâmetros utilizados em cada modelo podem ser visualizados no Quadro 25.

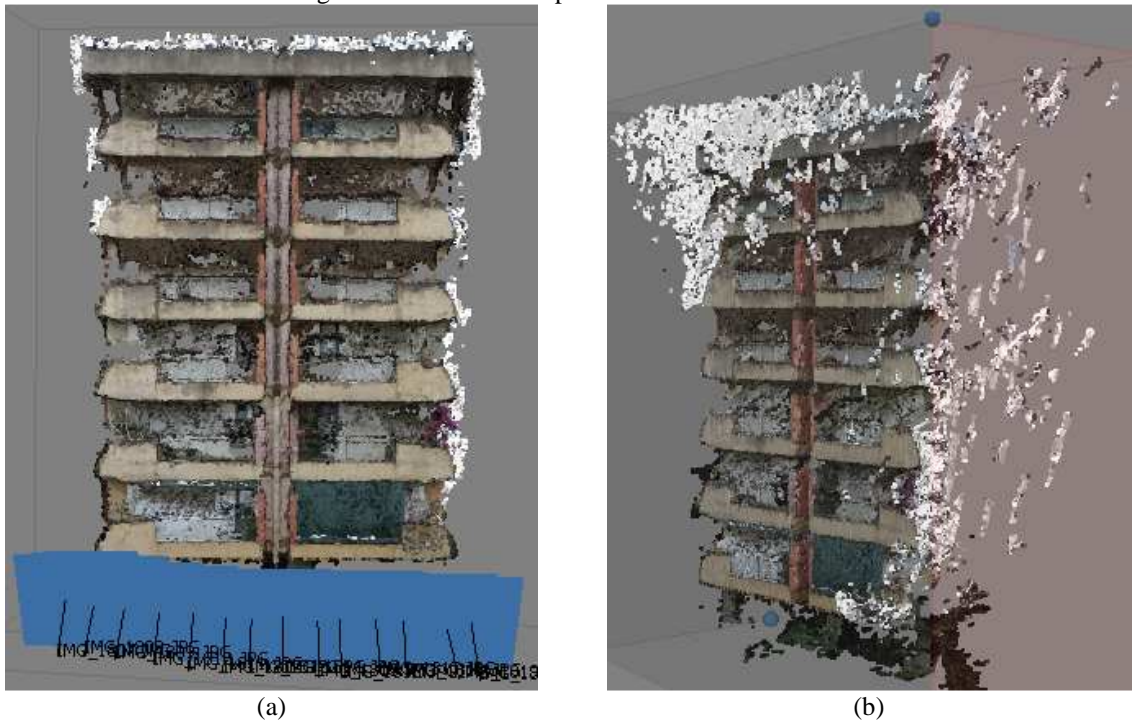
Quadro 25– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 1-EdB, modelo 2-EdB e modelo 3-EdB, a partir das 14 fotos

Parâmetros	Modelo 1--EdB	Modelo 2--EdB	Modelo 3--EdB
Align Photos			
<i>Accuracy</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>	<i>Disable</i>	<i>Disable</i>
Tempo de processamento	6 s	13 s	40 s
Build Dense Cloud			
<i>Quality</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>
Tempo de processamento	18 s	114 s	391 s (14 min e 30 s)
Build Mesh			
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Low (20.000)</i>	<i>Medium (60.000)</i>	<i>High (606.893)</i>
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High (180.000)</i> <i>Medium (60.000)</i> <i>Custom (200.000)</i>	<i>High (180.000)</i> <i>Low (20.000)</i> <i>Custom (200.000)</i>	<i>Medium (202.297)</i> <i>Low (67.432)</i> <i>Custom (200.000)</i>
Tempo de processamento	11 s	39 s	138 s
Build Texture			
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>	<i>Generic</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1	4000x1	4000x1
Tempo de processamento	18 s	38 s	61 s

Fonte: próprio autor.

Os três modelos também apresentaram muitos ruídos na parte superior dos modelos geométricos, como ilustrado na Figura 112 (b) e também como observado no Edifício A. A Figura 112 (a) apresenta as posições da câmera no momento do registro fotográfico, com uma parte dos ruídos já excluídos.

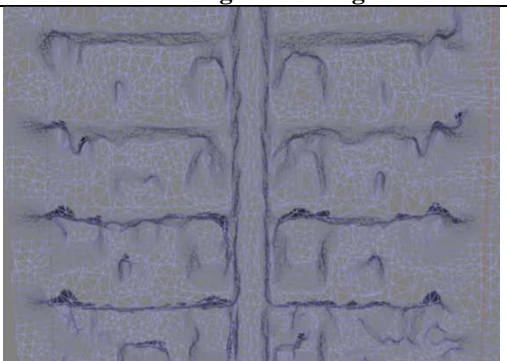
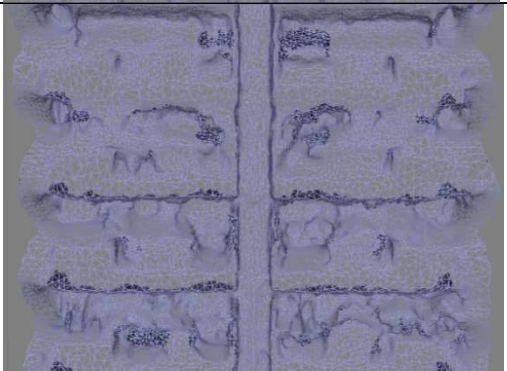
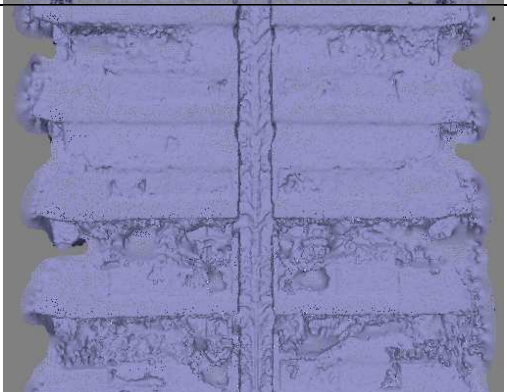
Figura 112 – Nuvem de pontos do modelo 2-EdB



Fonte: próprio autor.

Pelos parâmetros estabelecidos, o modelo 3-EdB apresentou maior refinamento da malha, contribuindo para o maior nível de detalhes da representação da fachada, como ilustrado no Quadro 26.

Quadro 26 – Malha triangular irregular (TIN) do modelo 1-EdB, modelo 2-EdB e modelo 3-EdB gerados no programa PhotoScan

Modelos	Malhas triangulares irregulares
Modelo 1-EdB	
Modelo 2-EdB	
Modelo 3-EdB	

Fonte: próprio autor.

Após todas as etapas de processamento, foram exportadas as ortoimagens dos três modelos, presentes no Quadro 27.

Quadro 27 – Ortoimagens do modelo 1-EdB, modelo 2-EdB e modelo 3-EdB gerados no programa PhotoScan



Fonte: próprio autor.

Houve diferenças significativas entre os três modelos gerados com os parâmetros de baixa, média e alta. O modelo 3-EdB, com parâmetros de alta precisão do alinhamento, alta qualidade da construção da nuvem densa e alto número de faces, apresentou o melhor resultado que os modelo 1-EdB e o modelo 2-EdB. Verificou-se que nos três modelos a representação dos pavimentos superiores do edifício apresentou-se distorcida, sem muita precisão das formas, diferentemente dos pavimentos inferiores dos modelos da edificação, como pode ser observado na Figura 113. Como já mencionado no Capítulo 2, para a obtenção de modelos geométricos por meio de nuvem de pontos, é necessário que a posição da câmera esteja perpendicular ao objeto e para o enquadramento de todo este edifício, a câmera precisou ser inclinada para o alto. A maior distância do centro perspectivo da câmera às partes mais altas da edificação pode ter causado uma imprecisão na identificação dos pontos homólogos, levando a erros que geraram as formas distorcidas nos últimos pavimentos.

Figura 113 – Modelos do Edifício B pelo PhotoScan: Últimos pavimentos do modelo 1-EdB e modelo 3-EdB, respectivamente, em (a) e (b); Primeiros pavimentos do modelo 1-EdB e modelo 3-EdB, respectivamente, em (c) e (d)

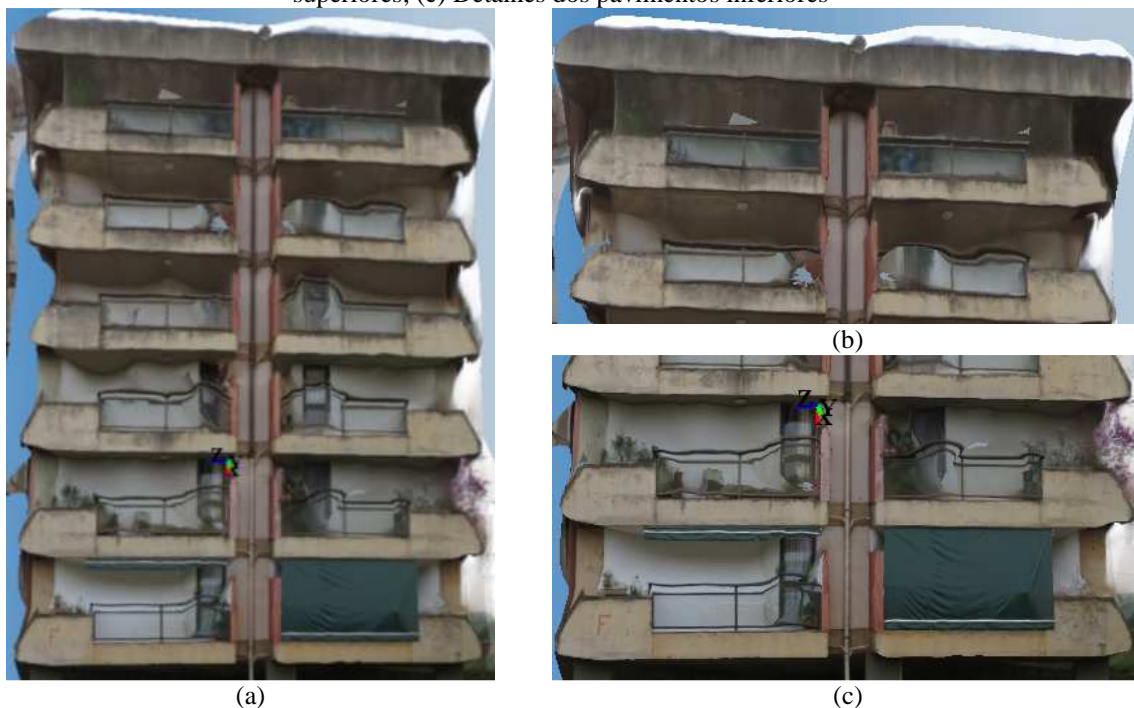


Fonte: próprio autor.

123D Catch

O resultado obtido utilizando o programa 123D Catch a partir das 14 fotografias terrestres também apresentou distorções dos pavimentos superiores no modelo, como observado no programa PhotoScan, e podem ser visualizadas na Figura 114.

Figura 114 – Edifício B modelado no 123D Catch: (a) Fachada da Edificação B; (b) Detalhe dos pavimentos superiores; (c) Detalhes dos pavimentos inferiores



Fonte: próprio autor.

PhotoScan

Para a aerofotogrametria, a distância do registro fotográfico em relação ao prédio foi de aproximadamente 3 m e foram criados os modelos: modelo 4-EdB, modelo 5-EdB e modelo 6-EdB, estabelecendo também diferentes parâmetros, como apresentado no Quadro 28. A Figura 115 apresenta a ilustração de uma sequência de três imagens das 209 imagens utilizadas na construção dos modelos.

Figura 115 – Sequência de três imagens capturadas por VANT utilizadas na construção dos modelos do Edifício B



Fonte: próprio autor.

Quadro 28– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 4-EdB, modelo 5-EdB e modelo 6-EdB, a partir das 209 fotos

Parâmetros	Modelo 4-EdB	Modelo 5-EdB	Modelo 6-EdB
Align Photos			
<i>Accuracy</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>	<i>Disable</i>	<i>Disable</i>
Tempo de processamento	532 s (8 min e 52 s)	1.728 s (28 min e 48 s)	5.432 s (1 h e 31 min)
Build Dense Cloud			
<i>Quality</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>
Tempo de processamento	121 s (2 min e 1 s)	641 s (10 min e 41 s)	1.634 s (27 min e 14 s)
Build Mesh			
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Low (75.789)</i>	<i>Medium (871.008)</i>	<i>High (5.376.042)</i>
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High (180.000)</i> <i>Medium (60.000)</i> <i>Custom (200.000)</i>	<i>High (294.114)</i> <i>Low (32.679)</i> <i>Custom (200.000)</i>	<i>Medium (402.179)</i> <i>Low (134.059)</i> <i>Custom (200.000)</i>
Tempo de processamento	181 s (3 min e 1 s)	705 s (11 min e 45 s)	1.353 s (22 min e 33 s)
Build Texture			
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>	<i>Generic</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1	4000x1	4000x1
Tempo de processamento	86 s (1 min e 26 s)	103 s (1 min e 43 s)	145 s (2 min e 25 s)

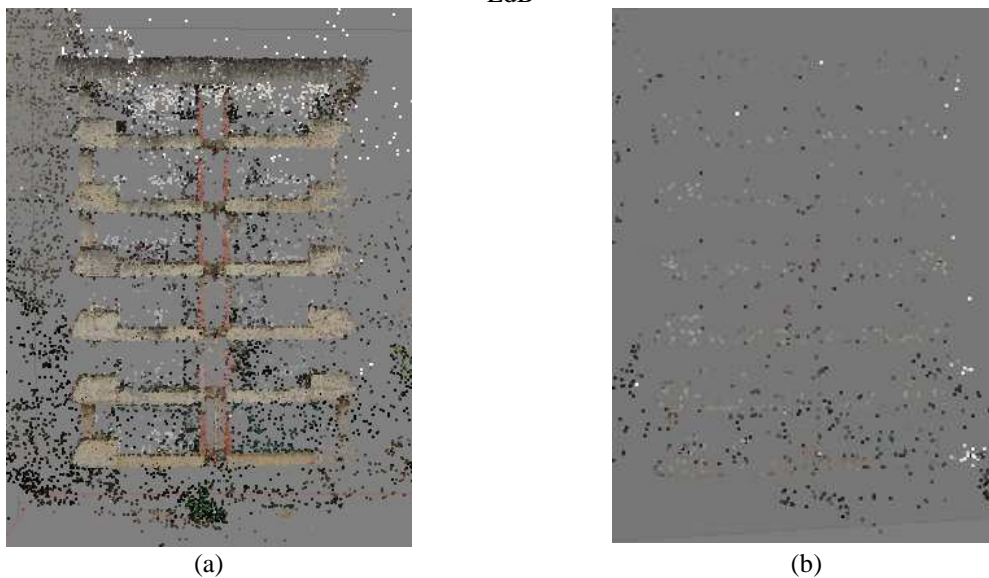
Fonte: próprio autor.

A Figura 116 apresenta as nuvens de pontos esparsas geradas na etapa de alinhamento do modelo 1-EdB e do modelo 4-EdB para comparação. Percebe-se que no modelo 4-EdB, gerado a partir de 209 fotos, a quantidade de pontos da nuvem é maior. Percebeu-se também que no modelo 1-EdB, modelo 2-EdB e modelo 3-EdB a quantidade de pontos da nuvem esparsa sempre foi menor e também menor a quantidade na parte superior dos modelos, o que explica também a imprecisão nos resultados finais destes modelos, demonstrada pelas irregularidades nos pavimentos superiores.

Analisando a quantidade de ruídos gerados no modelo 4-EdB, modelo 5-EdB e modelo 6-EdB, esta foi menor que a quantidade observada no modelo 1-EdB, modelo 2-EdB e modelo 3-EdB, principalmente na parte superior dos modelos, que pode ter ocorrido pelos poucos pontos da nuvem esparsa. Os pontos da nuvem esparsa são fundamentais para a geração da nuvem densa que garante a precisão e detalhamento dos objetos. A

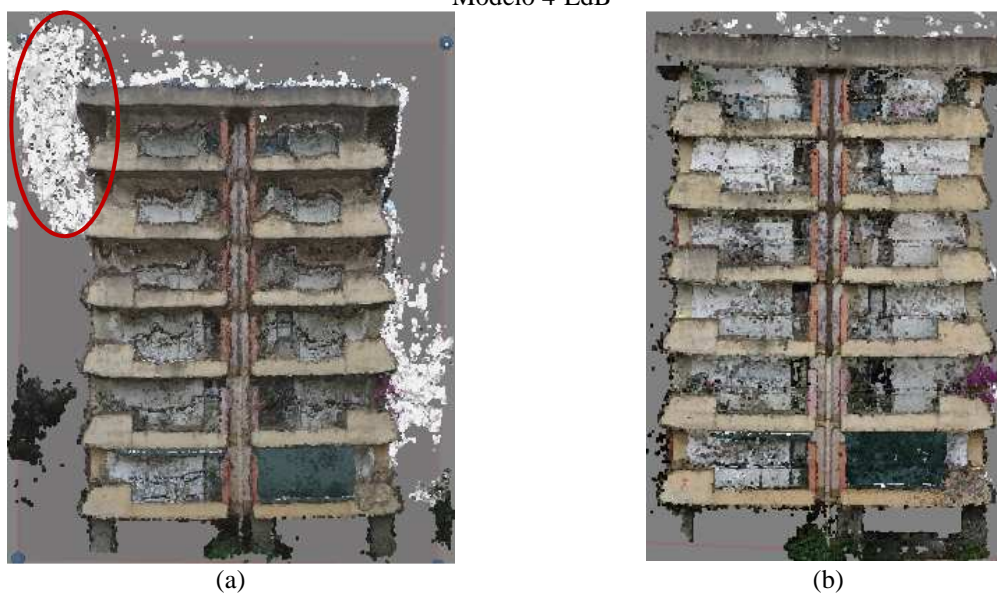
Figura 117 apresenta um comparativo entre o modelo 1-EdB e o modelo 4-EdB, demonstrando a quantidade de ruídos em cada modelo.

Figura 116 – Nuvens de pontos do Edifício B modeladas no PhotoScan: (a) Modelo 4-EdB; (b) Modelo 1-EdB



Fonte: próprio autor.

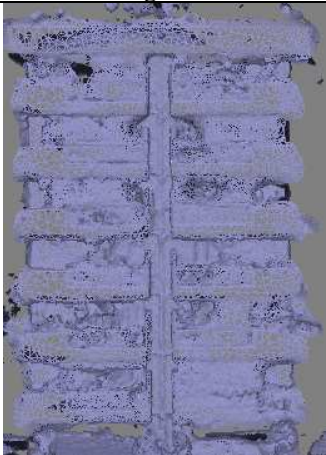

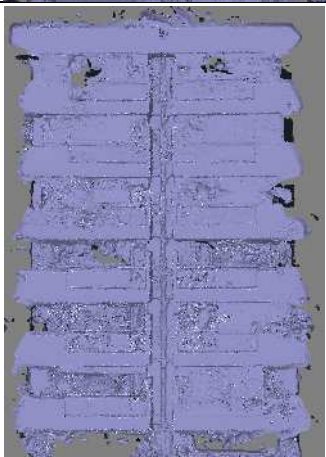

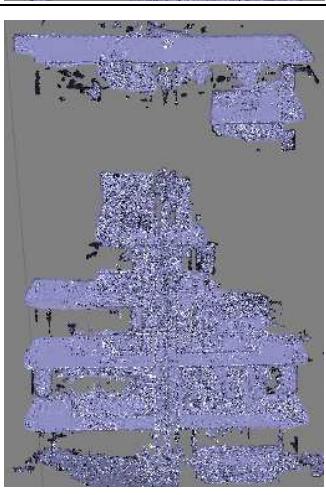
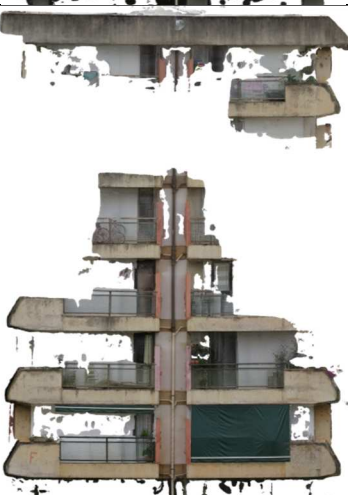
Figura 117 – Nuvens de pontos e ruídos do Edifício B modeladas no PhotoScan: (a) Modelo 1-EdB; (b) Modelo 4-EdB



Fonte: próprio autor.

O Quadro 29 apresenta os resultados das malhas TIN e das ortoimagens do modelo 4-EdB, modelo 5-EdB e modelo 6-EdB.

Quadro 29 – Malha TIN e ortomagens do modelo 4-EdB, modelo 5-EdB e modelo 6-EdB gerados no programa PhotoScan

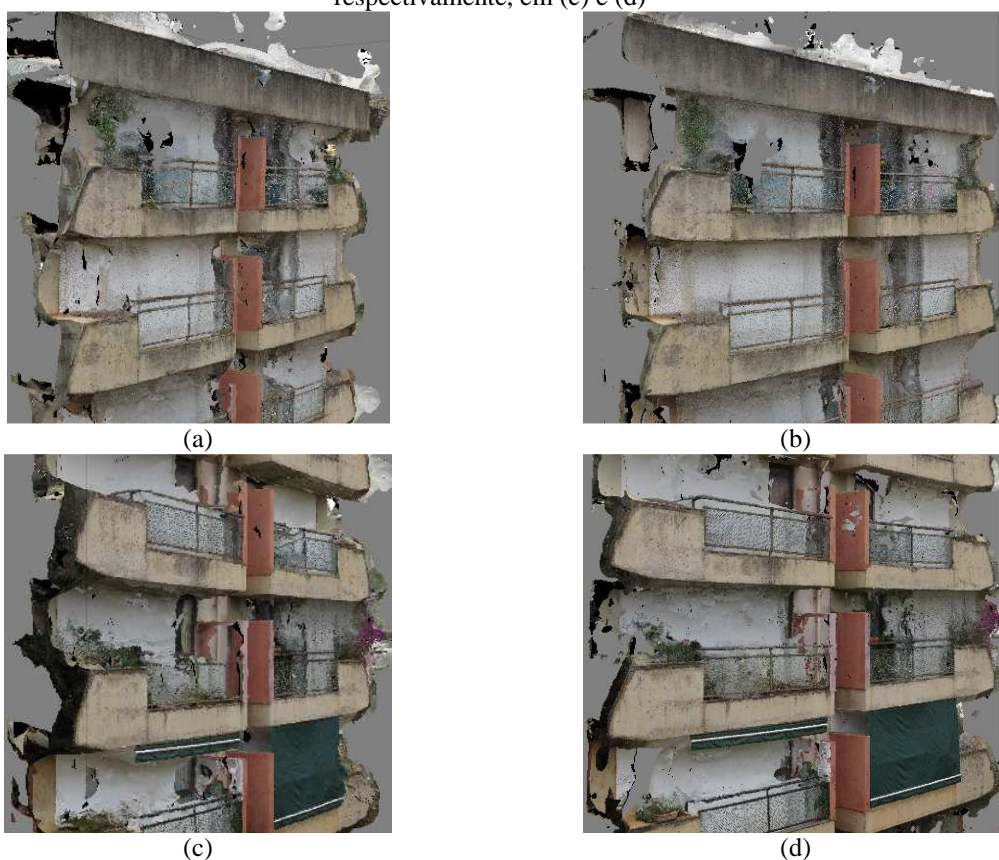
Modelos	Malhas triangulares irregulares	Ortoimagens
Modelo 4-EdB		
Modelo 5-EdB		
Modelo 6-EdB		

Fonte: próprio autor.

O modelo 4-EdB foi gerado com 75.789 faces e o modelo 5-EdB com 871.008 faces e apesar da diferença o resultado do modelo 4-EdB, inferior nos parâmetros, também foi satisfatório. O modelo 6-EdB foi modelado com resultado insatisfatório e o valor da quantidade de faces

indicada pelo programa foi de 5.376.042 faces. Acredita-se que a modelagem de somente algumas partes da fachada (parcialmente) ocorreu porque para se criar modelos a partir da alta precisão, a quantidade de imagens deva ser maior que as que foram registradas para este experimento. A Figura 118 apresenta partes ampliadas dos pavimentos superiores e inferiores do modelo 4-EdB e modelo 5-EdB. Em relação aos resultados apresentados nos modelos gerados pelas fotografias terrestres, os modelos a partir das fotografias capturadas pelo VANT não apresentaram as distorções nos pavimentos superiores.

Figura 118 – Modelos do Edifício B pelo PhotoScan: Últimos pavimentos do modelo 4-EdB e modelo 5-EdB, respectivamente, em (a) e (b); Primeiros pavimentos dos modelo 4-EdB e modelo 5-EdB, respectivamente, em (c) e (d)



Fonte: próprio autor.

Para modelagem de edificações mais altas, constatou-se que para obter uma ortoimagem mais próxima da forma real e efetiva as imagens necessitam ser capturadas perpendicularmente à fachada da edificação.

Tanto as ortoimagens dos modelos por fotogrametria terrestre quanto por aerofotogrametria apresentaram falhas para processarem as partes envidraçadas, devido a fatores já mencionados. Além disso, os modelos gerados pela técnica de fotogrametria terrestre apresentaram também

falhas nos resultados das modelagens dos guarda-corpos metálicos. Também se verificou, principalmente na ortomagem do modelo 5-EdB, algumas regiões sem informações, que são justamente sobre as superfícies pintadas de branco da fachada, sem texturas apropriadas para a identificação de pontos homólogos.

Em relação aos elementos opacos, as ortomagens dos modelos geradas com fotografias capturadas pelo VANT tiveram uma melhor qualidade e definição, pois as ortomagens dos modelos por fotografias terrestres apresentaram erros, como em alguns dos pavimentos modelados em que partes do teto e da parede da sacada aparecem no mesmo plano, não representado, assim, uma ortomagem.

Após realizada a orientação externa absoluta, o modelo 5-EdB foi exportado com *Máx. dimension* de 4.096 píxeis, gerando uma ortomagem com resolução de 3.310 x 4.096 píxeis e 22,0 MB de tamanho de arquivo, e exportado com *Máx. dimension* de 16.384 píxeis, criando uma ortomagem com resolução de 13.242 x 16.384 píxeis e 300,0 MB de tamanho de arquivo. O aumento da resolução da segunda ortomagem foi de quatro vezes e, no entanto, o arquivo ficou 13 vezes maior. A Figura 119 apresenta uma ampliação de parte da fachada do Edifício B, sendo a Figura 119 (b) a ampliação de parte do modelo exportado com 4.096 píxeis e a Figura 119 (c) a ampliação de parte do modelo exportado com 16.384 píxeis.

Apesar do aumento significativo da resolução, as ampliações, visualmente, apresentaram sutis diferenças entre as imagens da Figura 119, muito discretas e quase imperceptíveis.

As principais manifestações patológicas observadas nestas fachadas pelos produtos fotogramétricos foram a formação de manchas escuras na platibanda e projeções das sacadas, assim como a alteração cromática de alguns elementos de vedação externa.

Figura 119 – Ortoimagem do modelo 5-EdB: (a) Ampliação de parte da ortoimagem com resolução de 3.310 x 4.096; (b) Ampliação de parte da ortoimagem com resolução de 13.242 x 16.384



Fonte: próprio autor.

5.4.3 Prédio da Biblioteca Central da Universidade de Brasília – BCE

A Biblioteca Central da Universidade de Brasília foi construída em 1962 e possui o acabamento em concreto aparente. Para o prédio da Biblioteca Central, foi utilizada a câmera Sony RX100, tempo de exposição de 1/1250 s, sensibilidade ISO-200 e escala de número f variando no intervalo de f/2.8 a f/7.1, devido às variações de luminosidade durante o registro das fotografias.

Figura 120 – Prédio da Biblioteca Central da UnB



Fonte: próprio autor.

O cálculo de N°_{fotos} foi realizado para uma sobreposição de 80% no sentido longitudinal e 40% no sentido lateral, chegando-se à quantidade de 67 fotos, aproximadamente. Na Figura 121 está apresentada parte da sequência das 67 fotografias capturadas com o VANT.

Figura 121 – Imagens da Biblioteca Central da UnB capturadas com VANT

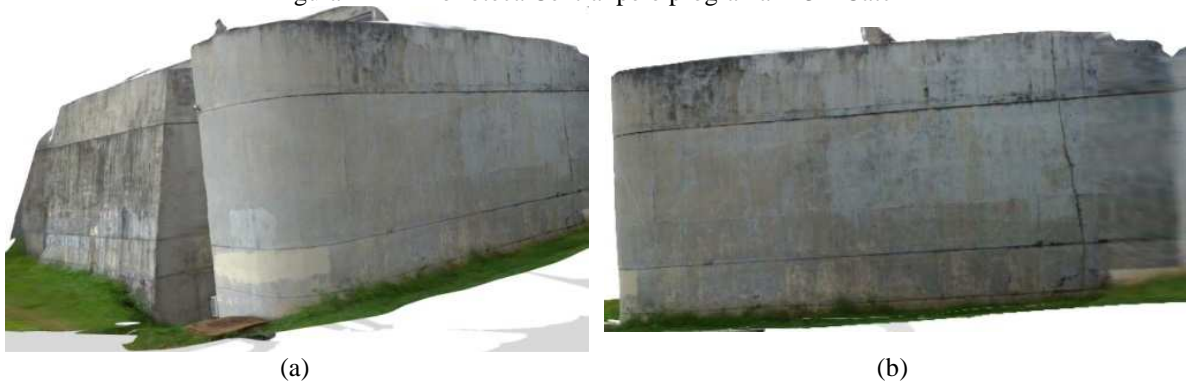


Fonte: próprio autor.

123D Catch

As 67 fotos da Biblioteca Central foram processadas no programa via *web* 123D Catch, Figura 122, e o resultado dos modelos geométricos apresentou-se satisfatórios como pode ser visto.

Figura 122 – Biblioteca Central pelo programa 123D Catch



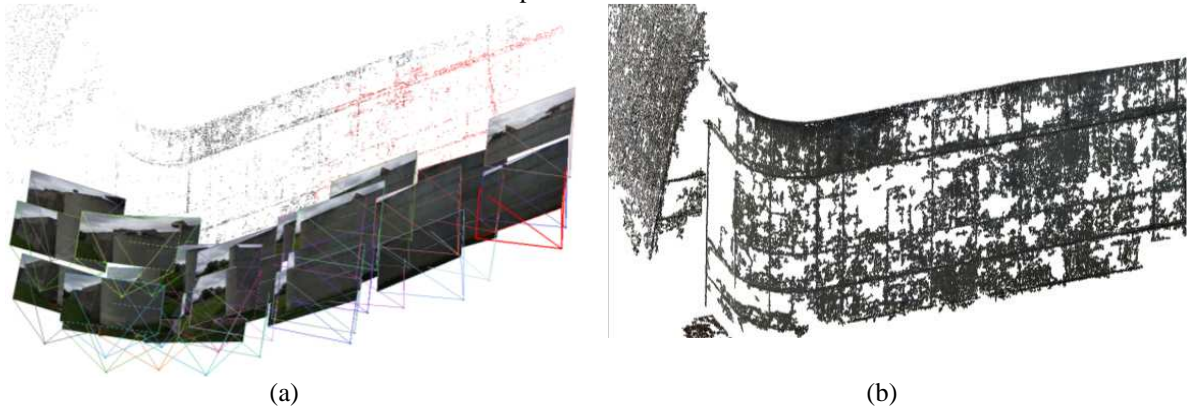
Fonte: próprio autor.

VisualSfM

O programa VisuaSfM também foi utilizado com a finalidade de obter a forma geométrica de parte da fachada da edificação pelos modelos por nuvens de pontos, utilizando-se, para este programa, apenas 30 fotos, devido ao custo computacional. Os resultados foram satisfatórios para a obtenção de nuvens de pontos e a Figura 123 (a) ilustra a construção da nuvem de pontos

esparsa e a posição das câmeras e a Figura 123 (b) apresenta a nuvem de pontos densa. Nota-se que existem regiões da nuvem com poucos pontos, que são devido a texturas pobres e pouca quantidade de fotos.

Figura 123 – Biblioteca Central pelo programa VisualSfM: (a) Nuvem de pontos esparsa; (b) Nuvem de pontos densa



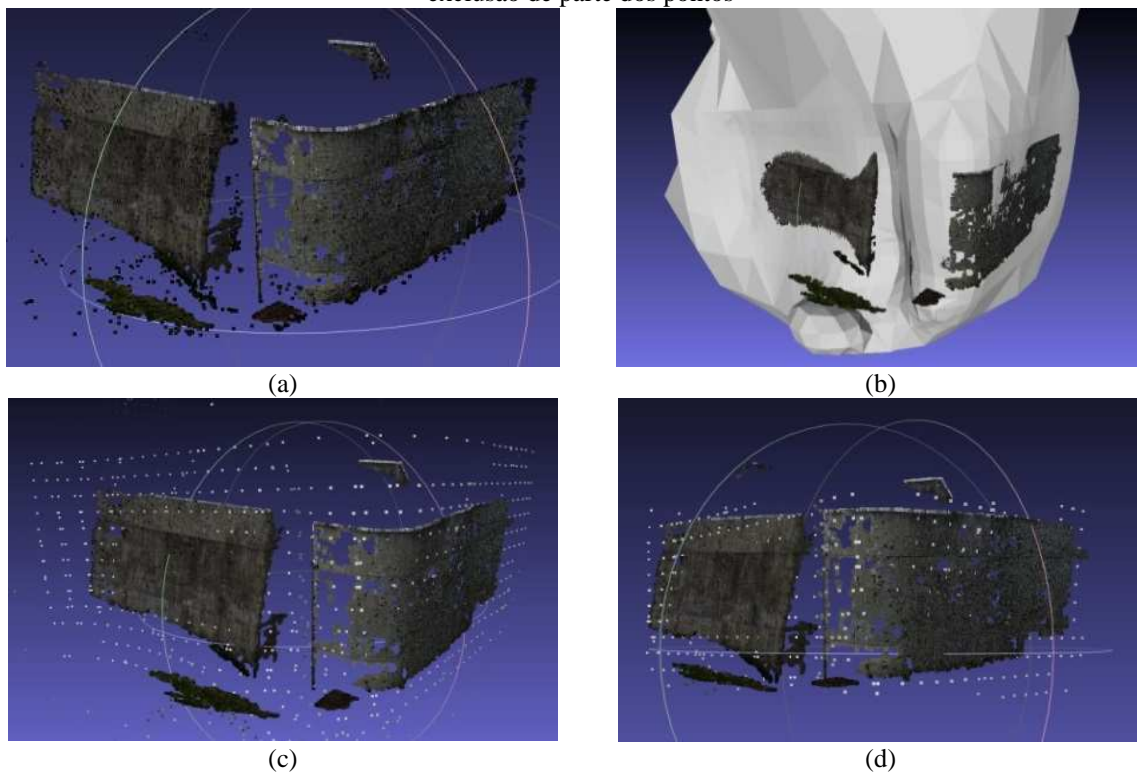
Fonte: próprio autor.

MeshLab

Após a geração da nuvem de pontos no VisualSfM, a nuvem foi processada para criação da malha e aplicação de textura no programa MeshLab. Como apresentado na Figura 124 (b), a malha gerada pelo programa excedeu a forma original do edifício e parte desses vértices da nuvem foi excluída como ilustrado na Figura 124 (c) e (d).

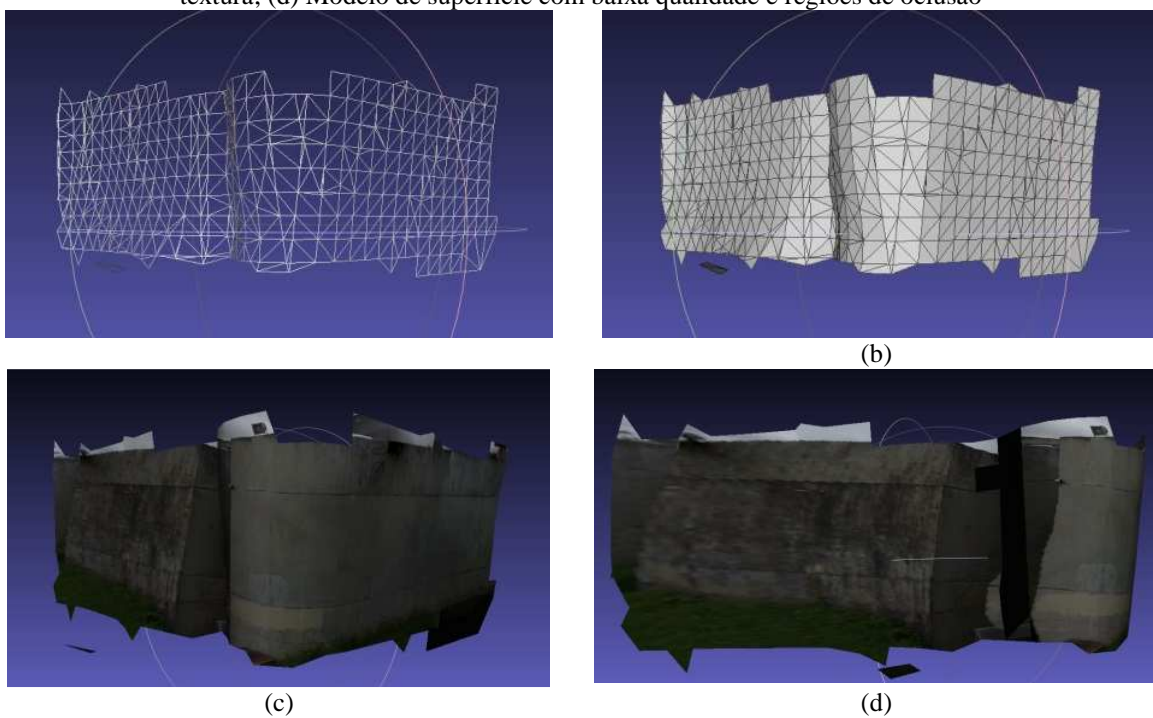
O resultado da malha poligonal e aplicação da textura, depois da eliminação de alguns vértices, pode ser visto na Figura 125. Tendo em vista que a fachada possui formas simples, o modelo não exigiu um maior refinamento da malha poligonal para representar fielmente a forma do edifício, como observado na Figura 125 (a) e (b). A maior parte das fotografias processadas para este modelo foi com imagens do lado direito da fachada, como visto na Figura 123 (a) e, dessa forma, percebe-se na Figura 125 (d) regiões com pouca qualidade e com nenhuma informação por causa de oclusões geradas por superfícies salientes.

Figura 124 – (a) Nuvem de pontos densa importada do VisualSfM e visualizada no MeshLab; (b) Malha poligonal gerada no MeshLab; (c) Pontos obtidos no processo de construção da malha; (d) Modelo com exclusão de parte dos pontos



Fonte: próprio autor.

Figura 125 – Malha poligonal gerada no MeshLab em (a) e (b); (c) Modelo de superfície com aplicação de textura; (d) Modelo de superfície com baixa qualidade e regiões de oclusão



Fonte: próprio autor.

PhotoScan

O modelo 1-BC foi gerado a partir das 67 fotos e os parâmetros estabelecidos em cada etapa do PhotoScan são apresentados no Quadro 30. A nuvem de pontos densa inicial foi gerada com 7.451.016 pontos e, após a eliminação de ruídos e pontos que não interessavam ao modelo, esta nuvem passou a ter 7.008.256 pontos.

Quadro 30 – Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 1-BC, a partir das 67 fotos

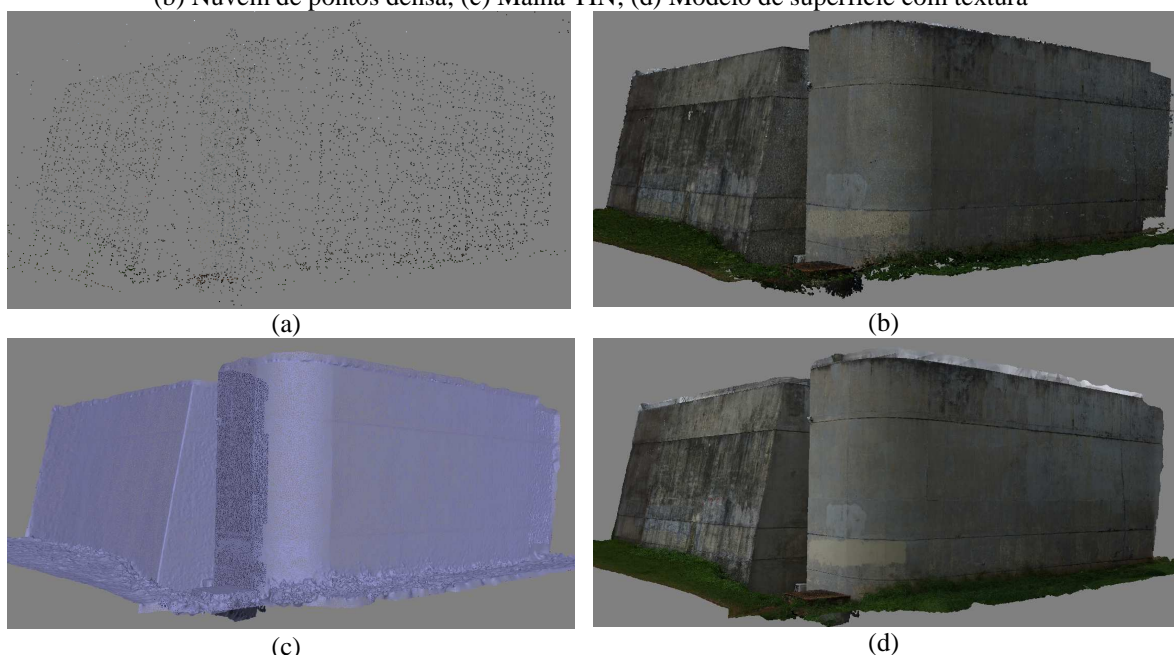
Parâmetros	Modelo 1-BC
Align Photos	
<i>Accuracy</i>	<i>Medium</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>
Nuvem de pontos esparsa	6.185 pontos
Tempo de processamento	756 s (12 min e 36 s)
Build Dense Cloud	
<i>Quality</i>	<i>Medium</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>
Nuvem de pontos densa	7.008.256 pontos
Tempo de processamento	6.637 s (1 h e 50 min e 37 s)
Build Mesh	
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Medium</i> (467.213)
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High</i> (1.401.639) <i>Low</i> (155.737) <i>Custom</i> (200.000)
Tempo de processamento	401 s (6 min e 41 s)
Build Texture	
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1
Tempo de processamento	87 s (1 min e 27 s)

Fonte: próprio autor.

Na Figura 126 estão apresentados os resultados na nuvem esparsa, da nuvem densa, da malha triangular e do modelo de superfície com aplicação da textura do modelo 1-BC.

Para o modelo 2-BC, foram utilizadas 193 fotos, o que levaria à uma sobreposição próxima de 80% no sentido longitudinal e 80% no sentido lateral, para avaliar a melhoria do resultado final. Para o modelo 2, os parâmetros usados estão apresentados no Quadro 31. A nuvem de pontos densa gerada, inicialmente, possuía 9.571.254 pontos, mas após serem excluídos pontos pertencentes a ruídos e áreas que não interessavam ao modelo, a quantidade passou a ser de 8.851.061 pontos.

Figura 126 – Modelo 1-BC pelo programa PhotoScan, 67 fotografias: (a) Nuvem de pontos esparsa; (b) Nuvem de pontos densa; (c) Malha TIN; (d) Modelo de superfície com textura



Fonte: próprio autor.

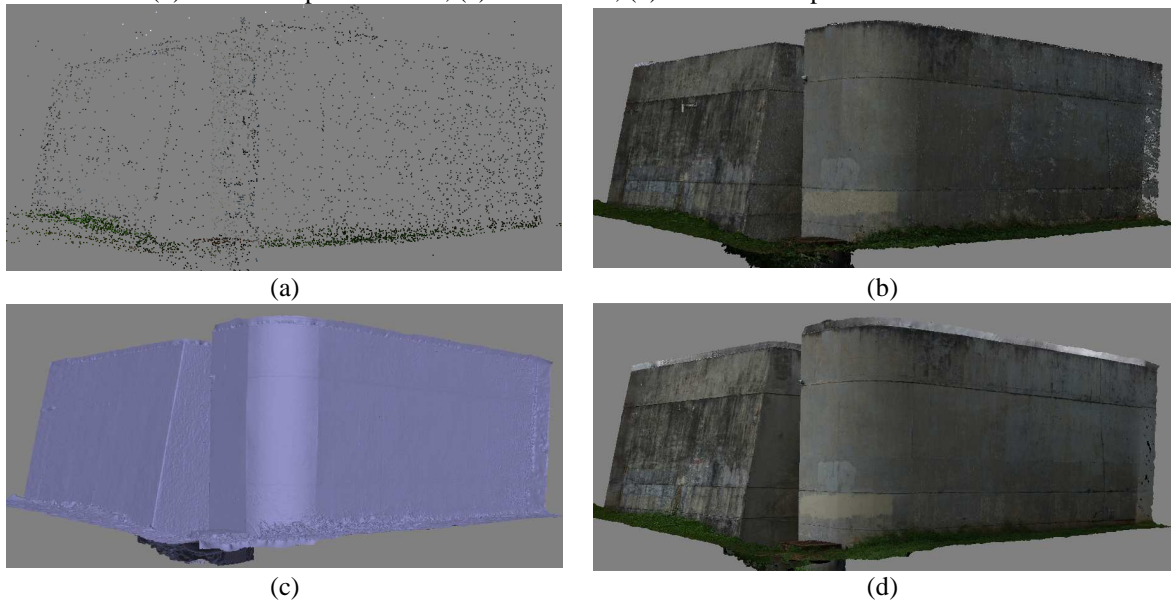
Quadro 31– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 2-BC, a partir das 193 fotos

Parâmetros	Modelo 2-BC
Align Photos	
<i>Accuracy</i>	<i>Medium</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>
Nuvem de pontos esparsa	6.513 pontos
Tempo de processamento	5.921 s (1 h, 38 min e 41 s)
Build Dense Cloud	
<i>Quality</i>	<i>Medium</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>
Nuvem de pontos densa	8.851.061 pontos
Tempo de processamento	29.430 s (8 h, 10 min e 30 s)
Build Mesh	
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Medium (590.063)</i>
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High (1.770.190)</i> <i>Low (196.687)</i> <i>Custom (200.000)</i>
Tempo de processamento	448 s (7 min e 28 s)
Build Texture	
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1
Tempo de processamento	208 s (3 min e 28 s)

Fonte: próprio autor.

Na Figura 127 estão os resultados na nuvem esparsa, da nuvem densa, da malha triangular e do modelo de superfície com aplicação da textura do modelo 2-BC.

Figura 127 – Modelo 2-BC pelo programa PhotoScan, 193 fotografias: (a) Nuvem de pontos esparsa; (b) Nuvem de pontos densa; (c) Malha TIN; (d) Modelo de superfície com textura



Fonte: próprio autor.

Em relação às quantidades de pontos das nuvens esparsas e densas, e à quantidade de faces das malhas, o modelo 1-BC e o modelo 2-BC não apresentaram diferenças significantes de valores, apesar do modelo 2-BC ter quase o triplo de imagens. Entretanto, o tempo para processamento do modelo 2-BC foi de 36.007 s (10 h e 7 s), enquanto que o tempo gasto no modelo 1-BC foi de 7.881s (2 h, 11 min e 21 s), representando um custo computacional alto do modelo 2-BC em relação ao modelo 1-BC. Pode-se inferir que, para o PhotoScan, excesso de sobreposição acima da recomendada (80% e 40%) não trouxeram ganhos na melhoria qualitativa dos resultados, como pode ser observado nas ampliações de parte de ambos os modelos (Figura 128).

Figura 128 – Ampliação de parte da fachada da Biblioteca Central:
(a) Modelo 1-BC; (b) Modelo 2-BC



(a)



(b)

Fonte: próprio autor.

Depois da orientação externa absoluta, as ortoimagens também foram geradas a partir da exportação no PhotoScan e também tratadas no programa de edição de imagens Adobe Photoshop CC para deixar as extremidades do modelo ortogonais e também para melhorar o contraste e o brilho, pensando-se posteriormente nas etapas de detecção de danos. Estas imagens podem ser vistas na Figura 129.

Figura 129 – Biblioteca Central pelo programa PhotoScan: (a) Ortoimagem gerada; (b) Ortoimagem após edição no Adobe Photoshop CC



(a)



(b)

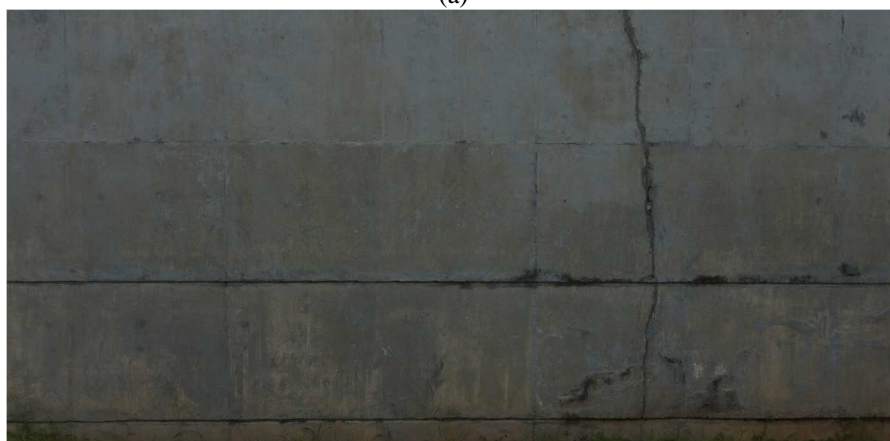
Fonte: próprio autor.

As principais manifestações patológicas identificadas no produto fotogramétrico da Biblioteca Central foram as manchas escuras formadas na superfície da fachada e fissuras que possuem, na maior parte, aberturas maiores que 3 mm (Figura 130).

Figura 130 – Fissura presente na fachada da Biblioteca Central:
(a) Modelo 1; (b) Modelo 2



(a)



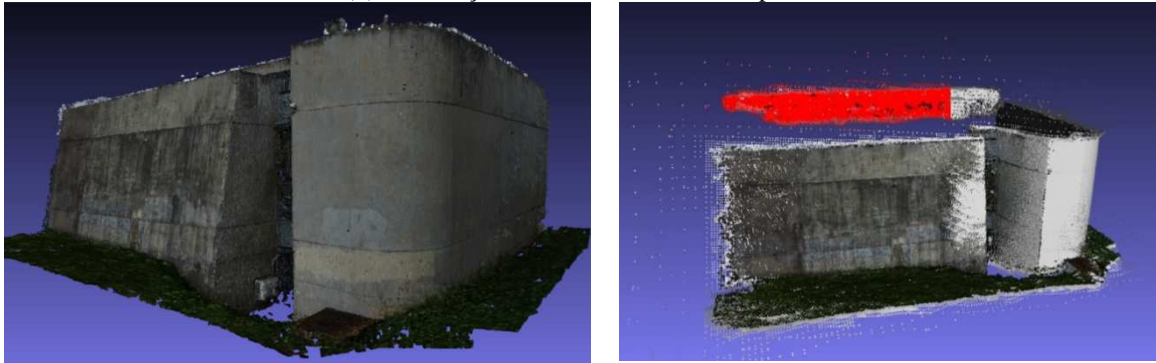
(b)

Fonte: próprio autor.

PhotoScan - MeshLab

As nuvens de pontos geradas no PhotoScan podem ser exportadas na opção *Export Points* e salvas no formato PLY (Stanford PLY), por exemplo, como uma alternativa para construção da malha TIN em outros programas, como o MeshLab. A Figura 131 (a) apresenta uma nuvem de pontos densa gerada no PhotoScan e importada para o ambiente MeshLab. A Figura 131 (b) apresenta pontos da nuvem (em vermelho) que foram excluídos para que a malha fosse construída próxima da forma real da fachada.

Figura 131 – Biblioteca Central pelo programa MeshLab: (a) Nuvem de pontos importada para o MeshLab; (b) Eliminação de ruídos da nuvem de pontos



(a)

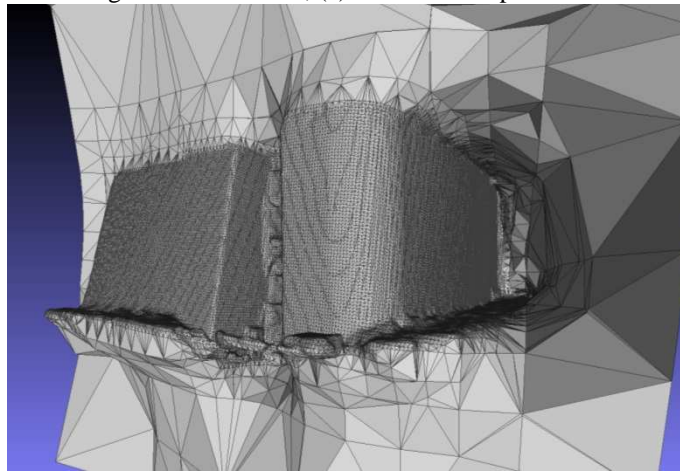
(b)

Fonte: próprio autor.

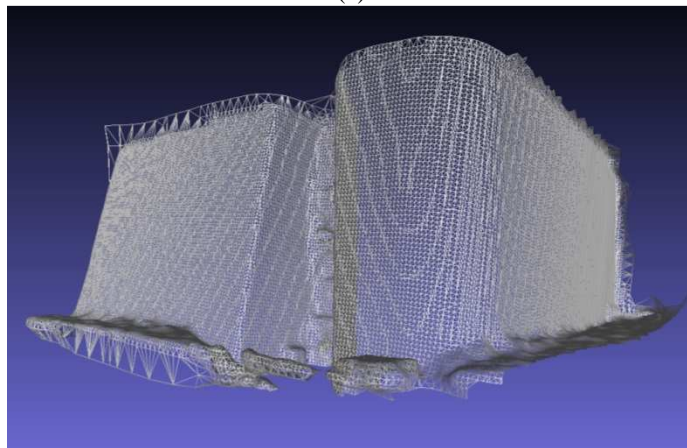
A Figura 132 apresenta a malha gerada sobre a nuvem de pontos importada do PhotoScan com ruídos (a), e os modelos da malha TIN sem ruídos (b) e *shaded* (c) gerados no MeshLab.

Porém, a aplicação da textura neste modelo pelo programa MeshLab não foi possível porque para isto seria necessário gerar arquivos com a extensão NVM pelo PhotoScan e a versão utilizada não possui esta opção, que visa estabelecer as posições geométricas dos pontos, juntamente com suas cores e matrizes das câmeras.

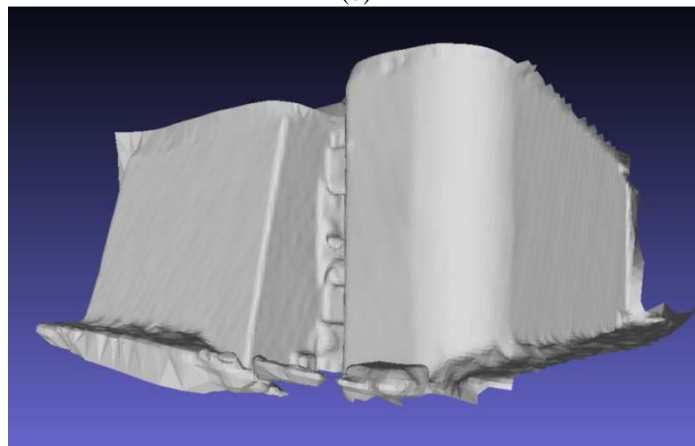
Figura 132 – Malha TIN da Biblioteca Central: (a) Modelo gerado sobre os ruídos da nuvem de pontos; (b) Modelo da malha gerado sem ruídos; (c) Modelo de superfície *shaded*



(a)



(b)



(c)

Fonte: próprio autor.

5.4.4 Prédio da ANTAQ

Para o prédio da ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários), com acabamento das fachadas norte e sul em concreto aparente e a parte central em esquadria metálica com vidro, a câmera Sony RX100, embarcada no VANT, foi utilizada para captura das imagens, com escala de número $f/7,1$, tempo de exposição de $1/1600$ s e sensibilidade ISO-125. As imagens foram capturadas a uma distância aproximada de 3 m, com o valor de sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 40%. Após o voo, obteve-se 272 imagens para a fachada norte (Figura 133) e 249 para a fachada sul. No total, foram 16 linhas verticais de voo para registrar cada fachada. O Quadro 32 apresenta as linhas de voo e a quantidade de imagens por linha na fachada norte e sul.

Figura 133 – Prédio da ANTAQ, fachada norte



Fonte: próprio autor.

Quadro 32 – Número da linha de voo e quantidade de fotos por linha

Número da linha de voo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Total
Quant. de fotos Fachada norte	13	11	22	12	25	14	26	8	20	9	29	19	20	13	20	11	272
Quant. de fotos Fachada sul	24	18	18	13	16	10	17	13	14	14	22	16	16	12	17	9	249

Fonte: próprio autor.

Percebe-se pelo Quadro 32 uma variação da quantidade de fotos por linha de voo. A altura do prédio é de 18,60 m e, pela sobreposição longitudinal, seriam necessárias 34 fotos por linha de voo. Os experimentos demonstraram que é difícil obter uma acurácia na quantidade de fotos por linhas de voo pela dificuldade em se impor uma velocidade constante ao VANT pelo piloto,

importante para a sobreposição das fotos. Os voos próximos aos edifícios exigem o controle constante do piloto, uma vez que o vento afeta a estabilidade do VANT, expondo-o ao risco de chocar-se contra a fachada. Assim, deve-se reconhecer toda a dificuldade na operação do equipamento e valorizar a execução e destreza do piloto (Rodolpho Gondim) no comando da aeronave e registro das imagens. A Figura 134 apresenta a linha de voo 4 realizada na fachada norte.

Figura 134 – Linha de voo 4 do prédio da ANTAQ, fachada norte



Fonte: próprio autor.

Tanto as fachadas norte e sul possuem uma área aproximada de 570,00 m² e pela aplicação do cálculo de N°_{fotos} , a partir da $\text{Área}_{\text{única}}$ e $\text{Área}_{\text{foto}}$, chegou-se à quantidade de 478 fotos aproximadamente ou 34 fotos pelas 14 linhas de voo (476 fotos), de acordo com o cálculo de sobreposição longitudinal de 80% e de sobreposição lateral de 40% (Equação (14)). Neste experimento, considerou-se o ângulo vertical de 46,4° e ângulo horizontal de 65,5° da câmera Sony RX 100 e distância de 3 metros. Aplicando estas formulações, constatou-se que os dois métodos apresentaram valores próximos na estimativa de se calcular a quantidade de fotos necessárias para se alcançar os valores de sobreposição desejados, com base nas distâncias especificadas e características da câmera fotográfica.

PhotoScan

Para o prédio da ANTAQ, fachada norte, foram processadas as 272 fotos no PhotoScan, em que se avaliou a qualidade dos modelos com os modos de parâmetros distintos: *low*, *médium* e *high*. Foi tentado para o modelo 3-ANT-N realizar a construção da nuvem densa também com a opção de alta qualidade, mas acredita-se que, devido ao custo computacional alto, o programa interrompeu o processamento. Assim, foi adotada para este modelo a construção da nuvem

densa com a opção de média qualidade. Os parâmetros utilizados podem ser visualizados no Quadro 33.

Quadro 33– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 1-ANT-N, modelo 2-ANT-N e modelo 3-ANT-N, a partir das 272 fotos

Parâmetros	Modelo 1-ANT-N	Modelo 2-ANT-N	Modelo 3-ANT-N
<i>Align Photos</i>			
<i>Accuracy</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>	<i>Disable</i>	<i>Disable</i>
Nuvem de pontos esparsa	53.915 pontos	31.451 pontos	22.104 pontos
Tempo de processamento	962 s	3.823 s (1 h e 4 min)	10.666 s (2 h e 57 min)
<i>Build Dense Cloud</i>			
<i>Quality</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>
Nuvem de pontos densa	9.149.601 pontos	37.973.379 pontos	36.904.737 pontos
Tempo de processamento	531 s	1.939 s (32 min e 19 s)	1.852 s (30 min e 52 s)
<i>Build Mesh</i>			
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Low</i> (203.234)	<i>Medium</i> (2.544.671)	<i>High</i> (7.401.287)
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High</i> (1.829.916) <i>Medium</i> (609. 972) <i>Custom</i> (200.000)	<i>High</i> (7.634.015) <i>Low</i> (848.223) <i>Custom</i> (200.000)	<i>Medium</i> (2.544.671) <i>Low</i> (848.223) <i>Custom</i> (200.000)
Tempo de processamento	346 s	3.245 s (54 min e 5 s)	2.919 s (48 min e 39 s)
<i>Build Texture</i>			
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>	<i>Generic</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1	4000x1	4000x1
Tempo de processamento	122 s	163 s (2 min e 43 s)	183 s (3 min e 3 s)

Fonte: próprio autor.

O modelo 1-ANT-N apresentou maior quantidade de pontos da nuvem de pontos esparsa que o modelo 2-ANT-N, assim como o modelo 2-ANT-N apresentou maior quantidade de pontos desta nuvem em relação ao modelo 3-ANT-N. Percebeu-se que quanto menor a precisão exigida, maior a quantidade de pontos da nuvem de pontos esparsa. Em relação à construção da nuvem de pontos densa (*build dense cloud*), como a qualidade exigida foi do padrão médio no modelo 2-ANT-N e modelo 3-ANT-N, também em função do explicado anteriormente, a quantidade de pontos foi semelhante entre estes modelos e maior que à quantidade do modelo 1-ANT-N. A Figura 135 apresenta uma ampliação da fachada do modelo 1-ANT-N, modelo 2-ANT-N e modelo 3-ANT-N da fachada norte, apresentando as nuvens de pontos densas.

Figura 135 – Nuvem de pontos densa do prédio do ANTAQ, fachada norte:
(a) Modelo 1-ANT-N; (b) Modelo 2-ANT-N; (c) Modelo 3-ANT-N



(a)



(b)



(c)

Fonte: próprio autor.

A etapa de construção da malha, *build mesh*, do modelo 2-ANT-N e modelo 3-ANT-N da fachada norte apresentaram opções para a quantidade de faces (*face count*) com valores próximos entre si, justificado pela quantidade de pontos de suas nuvens densas. A Figura 136 apresenta uma ampliação da fachada do modelo 1-ANT-N, modelo 2-ANT-N e modelo 3-ANT-N, apresentando os resultados das malhas para estes modelos.

Figura 136 – Malha TIN do prédio do ANTAQ da fachada norte:
(a) Modelo 1-ANT-N; (b) Modelo 2-ANT-N; (c) Modelo 3-ANT-N



(a)



(b)



(c)

Fonte: próprio autor.

A malha do modelo 3-ANT-N ficou mais refinada que a do modelo 2-ANT-N, apesar de ambas terem quase o mesmo número de pontos da nuvem densa, mas isto por causa da escolha dos parâmetros selecionados para a construção da malha triangular. A Figura 137 apresenta ampliações de parte da fachada nos três modelos para que fossem avaliadas as perdas de qualidade do produto final.

Figura 137 – Modelos de superfície do prédio do ANTAQ da fachada norte:
(a) Modelo 1-ANT-N; (b) Modelo 2-ANT-N; (c) Modelo 3-ANT-N



(a)



(b)

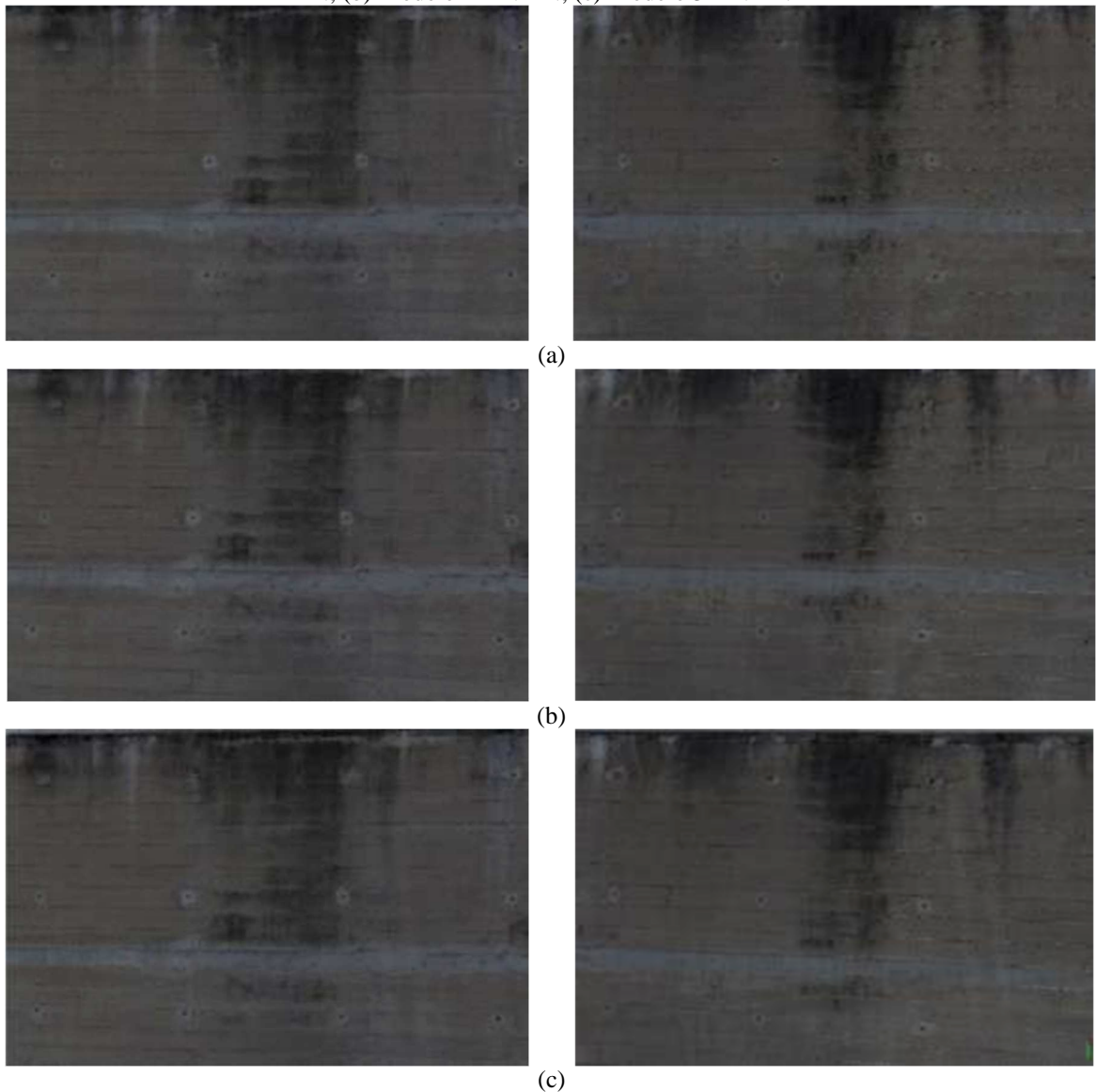


(c)

Fonte: próprio autor.

Apesar da grande diferença entre a quantidade de faces de cada malha dos três modelos, são imperceptíveis as diferenças entre as imagens apresentadas na Figura 137. A Figura 138 apresenta detalhes ampliados de parte da fachada dos três modelos, tendo destaque a manifestação patológica por formação de manchas ocorrida na parte superior do prédio.

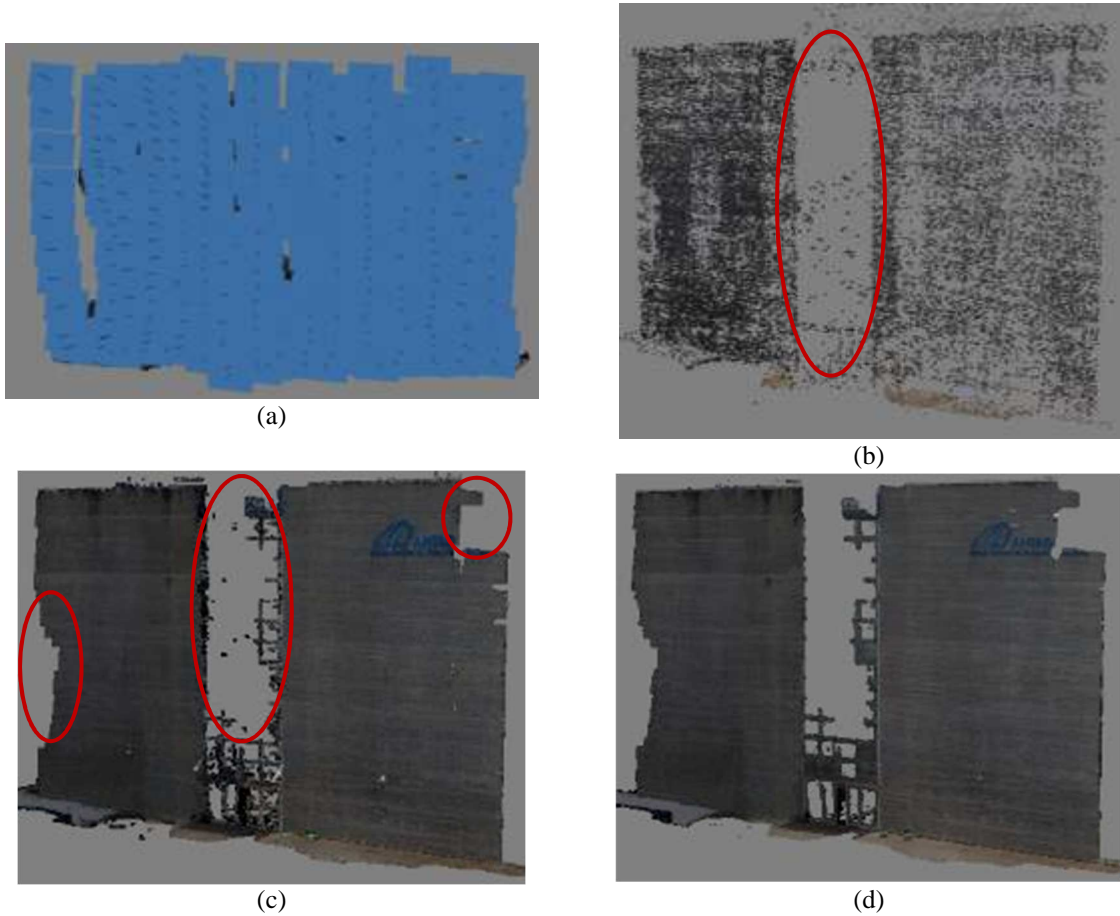
Figura 138 – Modelos de superfície com textura do prédio do ANTAQ da fachada norte: (a) Modelo 1-ANT-N; (b) Modelo 2-ANT-N; (c) Modelo 3-ANT-N



Fonte: próprio autor.

Para todos estes três modelos citados anteriormente, houve problemas na modelagem dos produtos fotogramétricos, resultando em áreas sem informações, devido a dois aspectos principais: insuficiência de imagens acarretando baixa sobreposição e as partes da fachada com superfícies envidraçadas, que influenciam negativamente sobre as etapas de identificação de pontos homólogos. A Figura 139 apresenta a ilustração da posição da câmera nos momentos de captura das imagens, o modelo de nuvem de pontos esparsa, o modelo de nuvem de pontos densa e o modelo de superfície com aplicação de textura do modelo 3-ANT-N. Os círculos vermelhos destacam as regiões que ocasionaram falhas ou a incompletude do modelo.

Figura 139 – Modelo 3-ANT-N: (a) Posicionamento das câmeras no momento do registro fotográfico; (b) Modelo de nuvem de pontos esparsa; (c) Modelo de nuvem de pontos densa; (d) Modelo de superfície com textura com textura



Fonte: próprio autor.

A ortomagem do modelo 3-ANT-N foi gerada atribuindo marcas para orientação externa absoluta e é representada pela Figura 140.

Para processamentos mais rápidos de um grande número de imagens a opção *generic* em *pair preselection* na etapa de alinhamento das imagens é recomendada. Desta forma, a fim de avaliar o custo computacional, o modelo 4-ANT-N foi construído com parâmetros médios estabelecidos, no entanto alterando o parâmetro *generic*. O Quadro 34 apresenta os parâmetros utilizados no modelo 4-ANT-N.

Figura 140 – Ortoimagem do modelo 3-ANT-N



Fonte: próprio autor

Quadro 34– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 4-ANT-N, a partir das 272 fotos

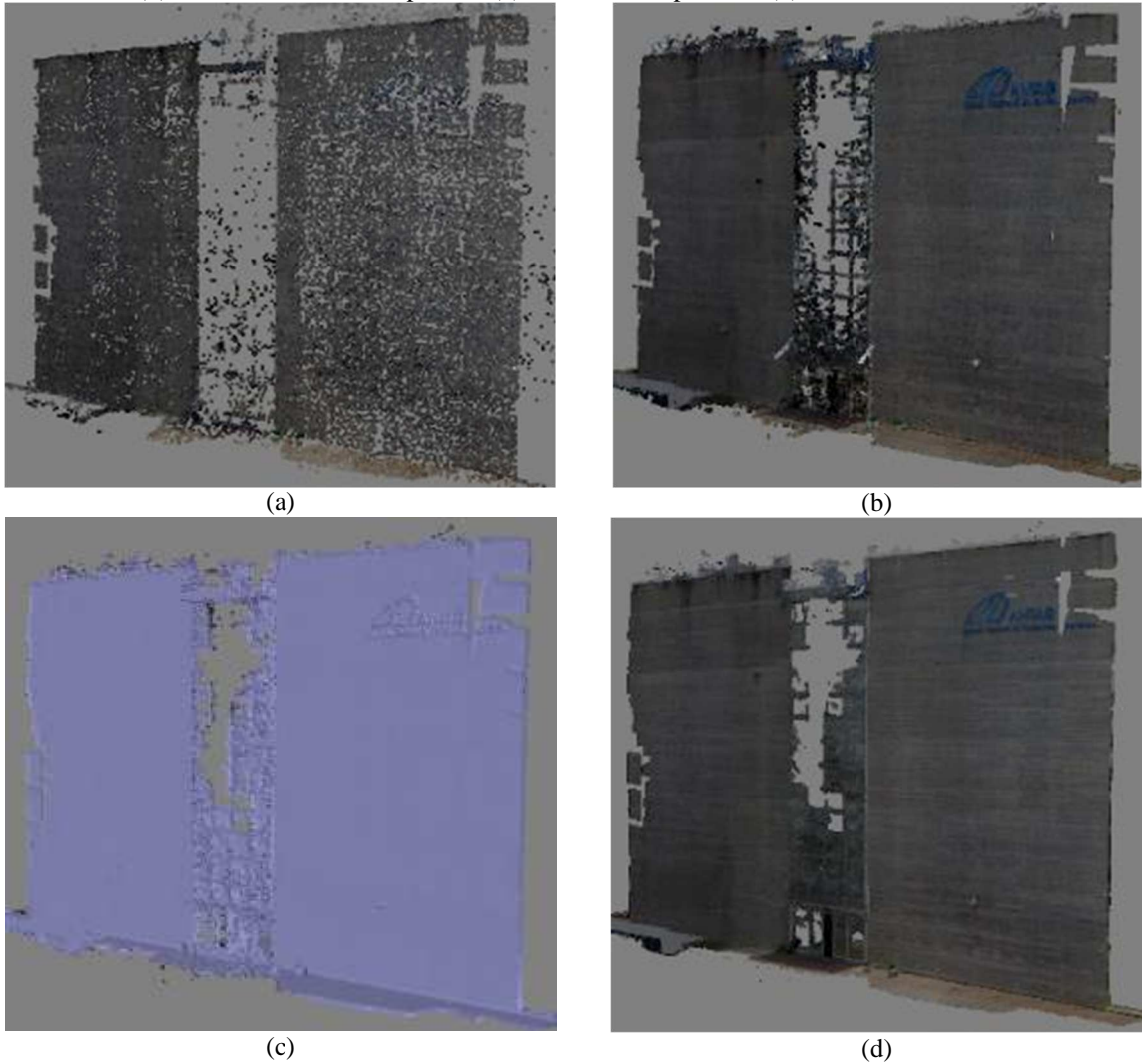
Parâmetros	Modelo 4-ANT-N
<i>Align Photos</i>	
<i>Accuracy</i>	<i>Medium</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Generic</i>
Nuvem de pontos esparsa	51.463 pontos
Tempo de processamento	790 s (13 min e 23 s)
<i>Build Dense Cloud</i>	
<i>Quality</i>	<i>Medium</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>
Nuvem de pontos densa	37.854.843 pontos
Tempo de processamento	3.168 s (52 min e 48 s)
<i>Build Mesh</i>	
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Low (846.112)</i>
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High (7.615.013)</i> <i>Medium (2.538.337)</i> <i>Custom (200.000)</i>
Tempo de processamento	1.684 s (28 min e 4 s)
<i>Build Texture</i>	
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1
Tempo de processamento	147 s (2 min 27 s)

Fonte: próprio autor.

No modo *generic*, a etapa de alinhamento ocorreu num intervalo menor que no modo *disable*, no entanto a quantidade de pontos foi maior (51.339 pontos). A quantidade de pontos gerada

na etapa de construção da nuvem densa foi próxima da quantidade do modelo 2-ANT-N. Os resultados obtidos no modelo 4-ANT-N são apresentados na Figura 141.

Figura 141 – Modelo 4-ANT-N: (a) Posicionamento das câmeras no momento do registro fotográfico; (b) Modelo de nuvem de pontos; (c) Modelo de superfície; (d) Modelo com textura



Fonte: próprio autor.

O modelo 5-ANT-N foi gerado sem a etapa de construção da nuvem densa, para que os resultados finais fossem avaliados. O Quadro 35 apresenta os parâmetros utilizados no modelo 5.

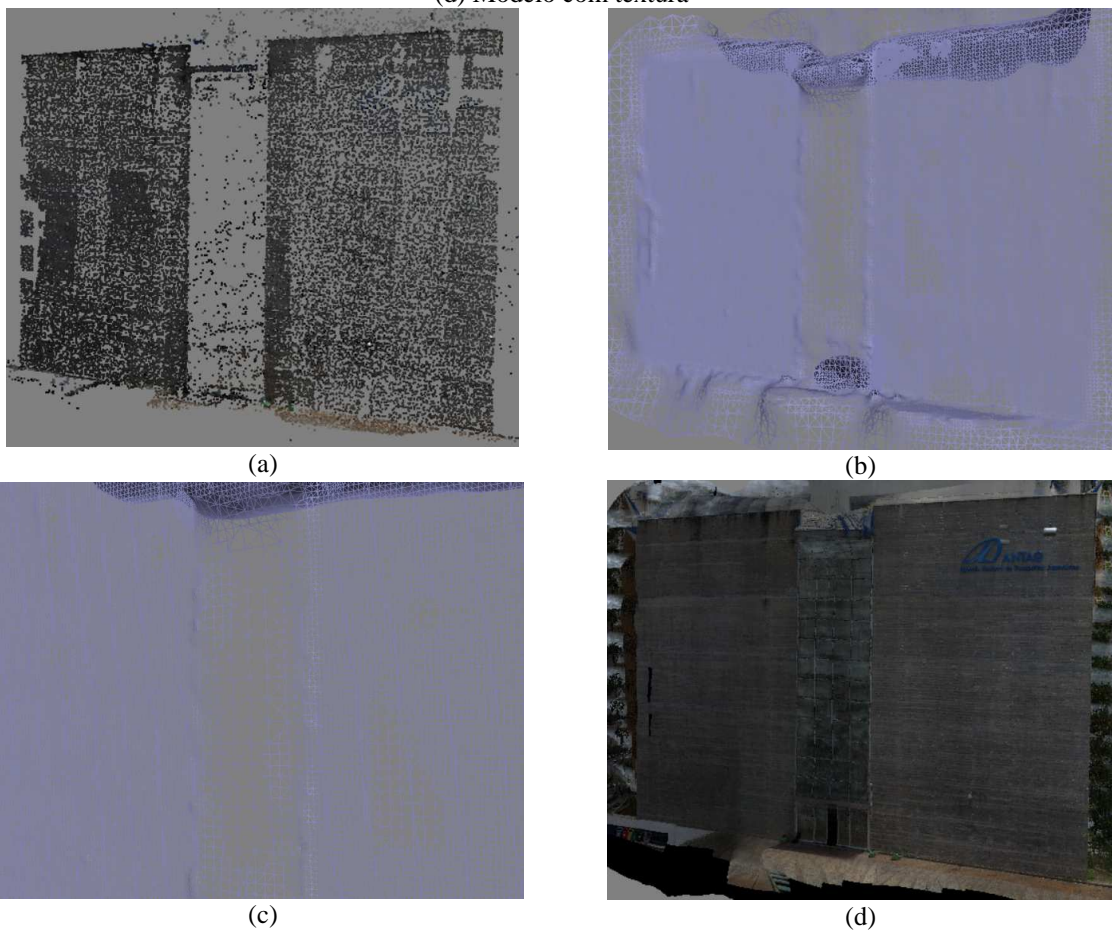
Quadro 35– Parâmetros utilizados no PhotoScan para o modelo 5-ANT-N, a partir das 272 fotos

Parâmetros	Modelo 5-ANT-N
<i>Align Photos</i>	
<i>Accuracy</i>	<i>Medium</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Generic</i>
Nuvem de pontos esparsa	51.397 pontos
Tempo de processamento	793 s (13 min e 13 s)
<i>Build Dense Cloud</i>	
Não foi gerada a nuvem de pontos densa	
<i>Build Mesh</i>	
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>High (90.000)</i>
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>Medium (30.000)</i> <i>Low (10.000)</i>
Tempo de processamento	2 s
<i>Build Texture</i>	
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1
Tempo de processamento	100 s (1 min e 40 s)

Fonte: próprio autor.

Apesar da opção escolhida para o número de faces ter sido de 90.000 faces, só foram geradas pelo PhotoScan 42.514 faces. Este aspecto explica o custo computacional baixo em relação aos modelos gerados anteriormente. A Figura 142 apresenta os resultados obtidos na geração do modelo 5-ANT-N sem a etapa de construção da nuvem densa.

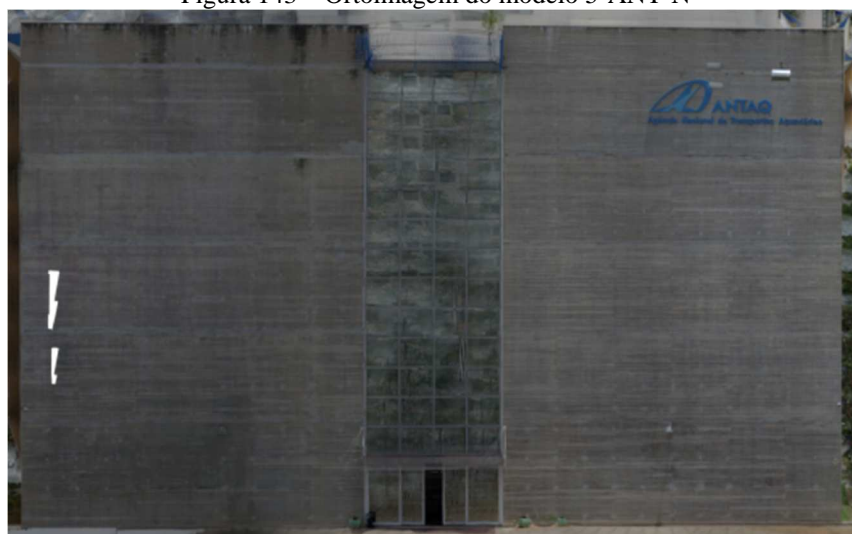
Figura 142 – Modelo 5-ANT-N: (a) Nuvem de pontos esparsa; (b) Malha TIN; (c) Ampliação da malha TIN; (d) Modelo com textura



Fonte: próprio autor.

A ortoimagem do modelo 5-ANT-N é apresentada na Figura 143.

Figura 143 – Ortoimagem do modelo 5-ANT-N



Fonte: próprio autor

Alguns aspectos são importantes e devem ser destacados: a geração da malha pela nuvem esparsa diminuiu a quantidade de *holes* (regiões sem informação). A esquadria envidraçada também não apresentou *holes*, apesar das informações geradas nesta região da fachada não serem representativas. Ampliando a imagem do modelo 5-ANT-N e comparando-a com o modelo 3-ANT-N, nota-se semelhança em relação às informações, como a formação de manchas (Figura 144).

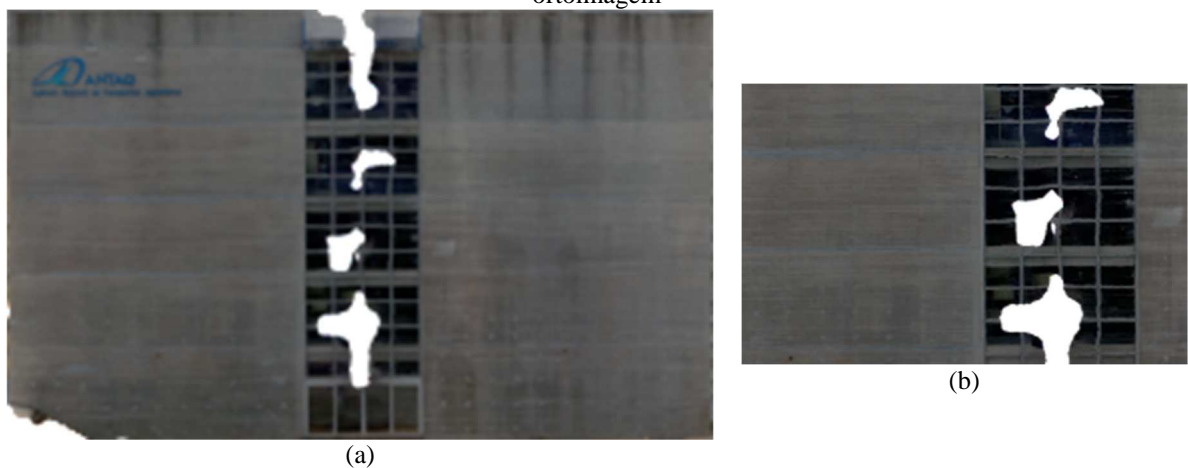
Figura 144 – Modelos de superfície com textura do prédio do ANTAQ da fachada norte: (a) Modelo 3-ANT-N (b) Modelo 5-ANT-N



Fonte: próprio autor.

Por causa do custo computacional e como foram imperceptíveis as diferenças entre o modelo 2-ANT-N e o modelo 3-ANT-N, a fachada sul do prédio da ANTAQ foi modelada no PhotoScan com os parâmetros usados no modelo 2-ANT-N. Após estas etapas, foi realizada a orientação externa absoluta e o modelo foi exportado, gerando as ortoimagens. O resultado pode ser visualizado na Figura 145 e problemas com as superfícies de vidro também foram observados.

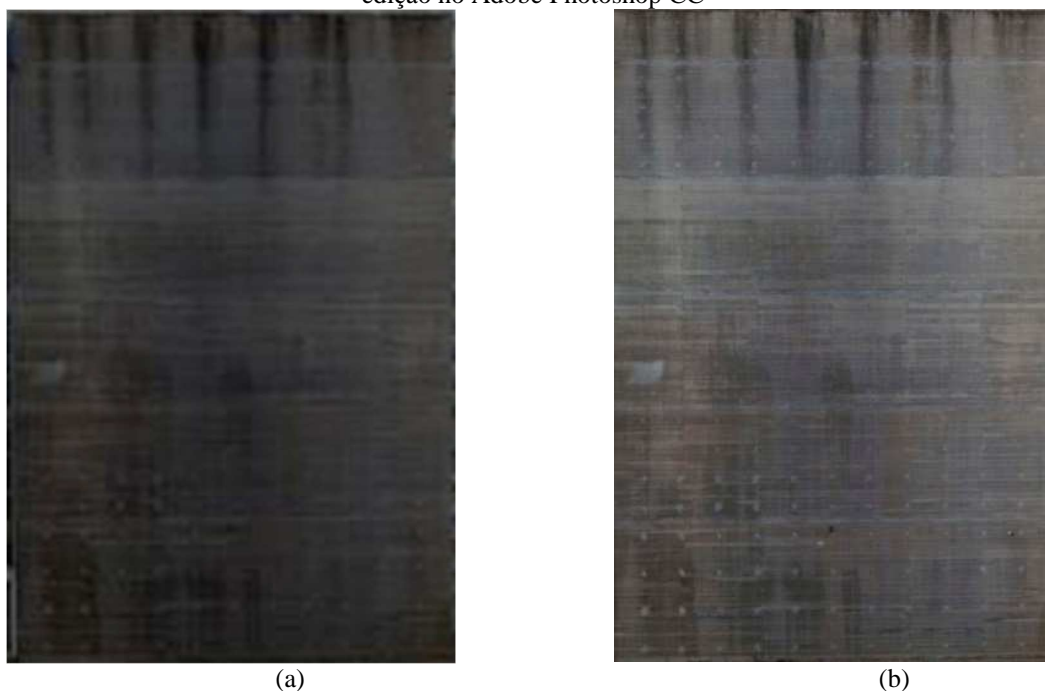
Figura 145 – Modelo 6-ANT-S: fachada sul prédio da ANTAQ: (a) Ortoimagem; (b) Ampliação da ortoimagem



Fonte: próprio autor.

Com intuito de melhorar as ortoimagens para geração dos mapas de danos, estas foram tratadas também no programa Adobe Photoshop CC, na tentativa de melhorar o contraste e brilho da imagem, como apresentado na Figura 146.

Figura 146 – Modelo 6-ANT-S pelo PhotoScan: (a) ortoimagem gerada; (b) ortoimagem após edição no Adobe Photoshop CC



Fonte: próprio autor.

Tentativas de criação de modelos por meio do programa 123D Catch foram feitas, porém, como neste *software* via *web* somente podem ser carregadas (*upload*) 70 imagens por modelo, ocorreram erros no processo, não concluindo a modelagem do prédio da ANTAQ.

A formação de manchas escuras no topo desse edifício foi a principal manifestação patológica observada, podendo ser causada por escoamentos preferenciais de umidade, juntamente com crescimento de microrganismos e acúmulos de poluentes (partículas de poluição).

PhotoScan - Aferição da dimensão do modelo

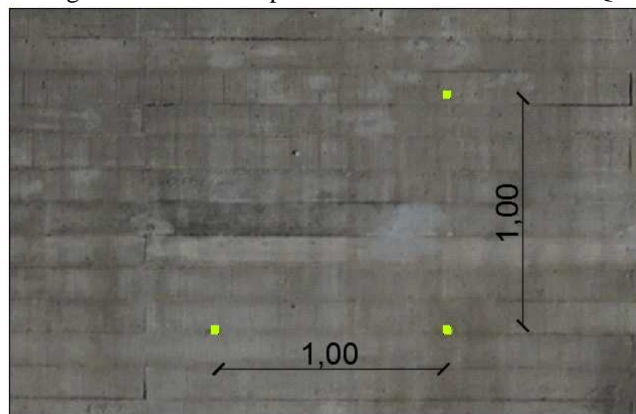
Para verificar a precisão das dimensões que se podem obter nos modelos fotogramétricos, com a finalidade de avaliar a técnica para os levantamentos cadastrais de edificações usando a fotogrametria digital, foi realizado o cálculo do desvio relativo no prédio da ANTAQ. A

ortoimagem utilizada neste experimento foi gerada no PhotoScan e os procedimentos adotados são descritos a seguir.

a) Alvos na fachada

Três alvos (*targets*) foram colados na fachada com distância horizontal e vertical de um metro entre os três alvos (eixo vertical e horizontal), como ilustrado na Figura 147. A aplicação dos alvos faz-se necessária para a orientação externa absoluta, ou seja, correção da escala do modelo para a escala natural e da rotação do modelo, a partir de dimensões tomadas sobre o objeto real e dos eixos cartesianos do mesmo.

Figura 147 – Alvos aplicados na fachada do ANTAQ



Fonte: próprio autor.

A partir destas medidas, o modelo foi exportado no PhotoScan como uma ortoimagem.

b) Tomada da medida real

Na fachada do edifício da ANTAQ foi realizada a medição direta (valor mais provável), usando uma trena. A medida registrada foi de 12,62 m para o comprimento da base. A medida da altura da fachada não foi tomada.

c) Tomada da medida do modelo

O modelo foi importado para programa CAD (*Computer Aided Design*), onde foi realizada a medição do comprimento da base, lendo-se 12,59 m, como ilustrado na Figura 148. A medida da altura da fachada no modelo foi de 18,61 m.

Figura 148 – Valor obtido no modelo na fachada do ANTAQ



Fonte: próprio autor.

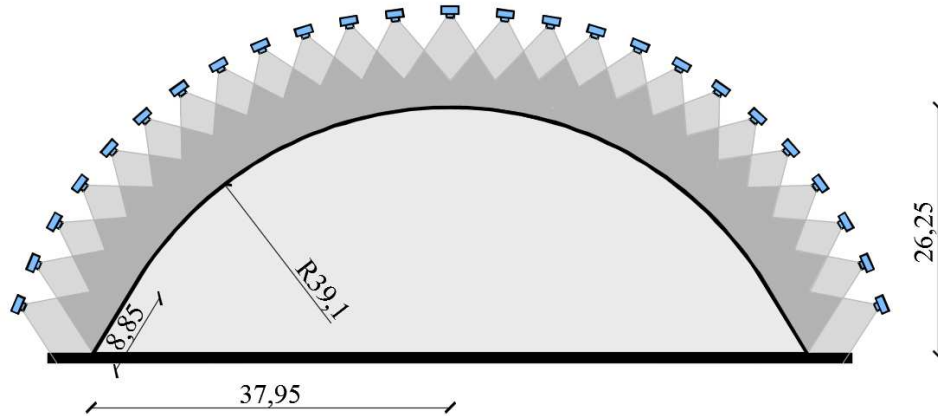
d) Cálculo do desvio relativo

A partir das medidas obtidas, o cálculo do desvio relativo foi feito, chegando-se ao valor de 0,24%. Concluiu-se que a precisão foi satisfatória para o tipo de técnica (obtenção de medidas por meio de fotografias) e com base em outros trabalhos técnicos, em que muitos aspectos envolvidos podem influenciar na exatidão.

5.4.5 Museu Nacional Honestino Guimarães

O Museu Nacional Honestino Guimarães está localizado próximo à catedral de Brasília e devido à sua importância e formato foi escolhido para aplicação das técnicas fotogramétricas. Sua geometria diferenciada e a sua superfície com pouca textura criaram expectativas quanto ao resultado final. Este edifício, com acabamento em pintura na cor branca, é uma grande cúpula que possui altura de 26,25 m e suas demais dimensões características estão representadas na elevação esquemática da Figura 149. Devido ao seu formato, a captura das imagens pelo VANT foi feita de maneira diferente das utilizadas nas fachadas de plano vertical. Seguindo o princípio de captura paralelamente ao plano da fachada, o VANT sobrevoou a fachada acompanhando o raio da cúpula, como representado esquematicamente na Figura 149.

Figura 149 – Forma de captura das imagens no Museu Nacional Honestino Guimarães e suas dimensões



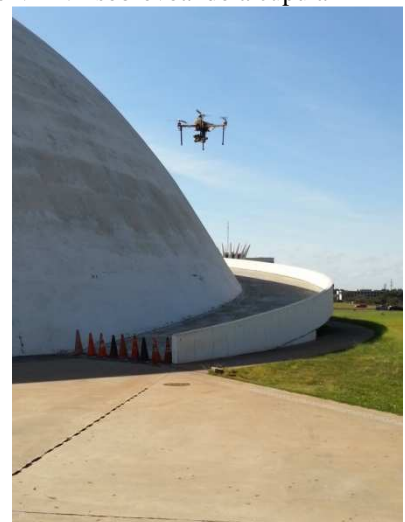
Fonte: próprio autor.

Para o museu, foi utilizada a câmera Canon SX270 HS com escala de número $f/7,1$, tempo de exposição de $1/1000$ s e sensibilidade ISO-200. Um dos cuidados tidos foi quanto a estes parâmetros citados, pois parte da edificação no momento das tomadas fotográficas estava com parte da cúpula sombreada e a outra parte estava exposta a uma grande luminosidade, exigindo-se que fossem definidos parâmetros que atendessem às duas situações.

Figura 150 – (a) Museu Nacional Honestino Guimarães; (b) imagem do VANT sobrevoando a cúpula



(a)



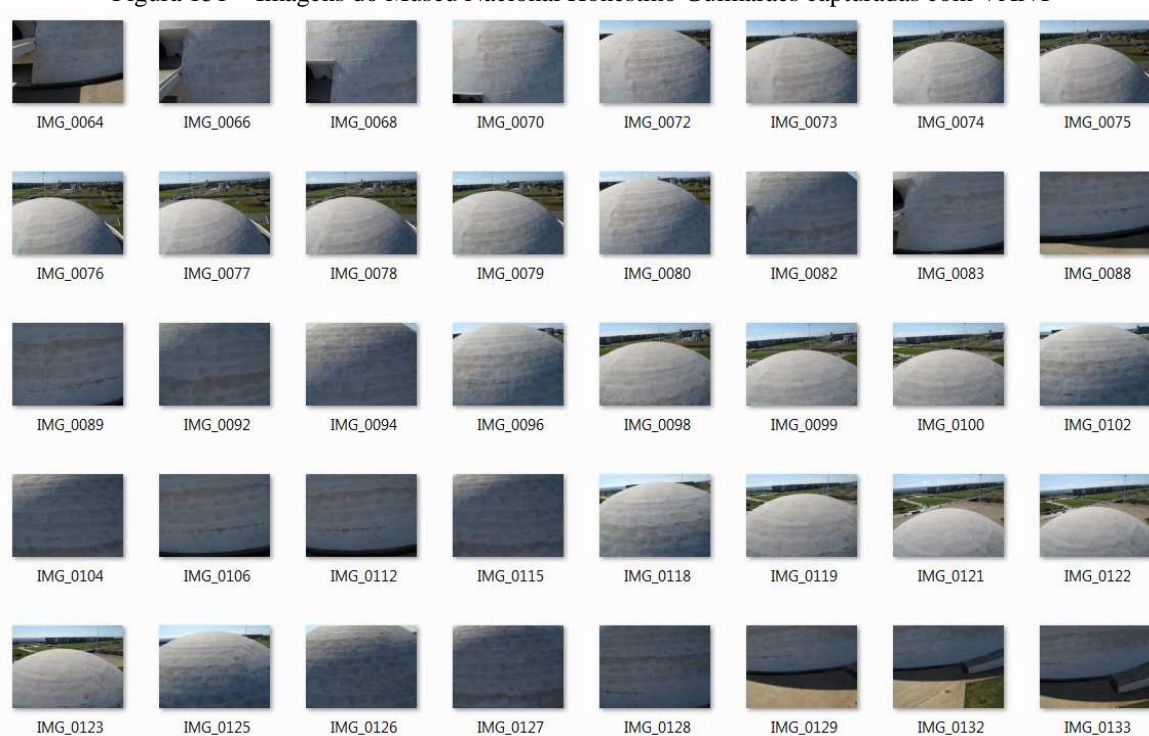
(b)

Fonte: próprio autor.

Devido às características deste voo, não se pode controlar a distância do VANT à cúpula do museu com precisão e nem determinar à qual distância o veículo aéreo estaria do prédio. A

distância de voo do VANT ao prédio, necessária para o cálculo da quantidade de fotos, foi por estimativa. A área da cúpula é de aproximadamente 6.574,00 m² e, a partir deste valor, determinou-se a quantidade de imagens pelo cálculo do N^o fotos, chegando-se ao valor aproximado de 589 fotos para a distância estimada de voo de 12 m. Por variações de voo, caso a distância chegasse à 15 m, o valor do N^o fotos de fotos corresponderia à 366 fotos. A quantidade de imagens capturas foi de 740 fotos, sendo realizada uma seleção para que fossem usadas nos programas de fotogrametria. A Figura 151 apresenta a sequência de algumas fotos capturadas pelo VANT.

Figura 151 – Imagens do Museu Nacional Honestino Guimarães capturadas com VANT



Fonte: próprio autor.

As condições de iluminação natural são importantes para os resultados finais e implicam negativamente sobre os objetivos que se desejam alcançar. Em um dos registros fotográficos realizados no museu para a geração das ortoimagens, sombras formadas sobre a fachada incidiram sobre uma das fissuras que seriam analisadas e mapeadas pelos programas de detecção automática, levando à realização de novas tomadas fotográficas em horário diferente para se evitar este episódio. A Figura 152 ilustra uma das fotografias capturadas pelo VANT

com a sombra sobre as fissuras 1 e 2 que foram avaliadas (medidas) para os estudos de mapeamento automático.

Figura 152 – Fotografia da fachada do museu com a formação de sombra sobre as fissuras

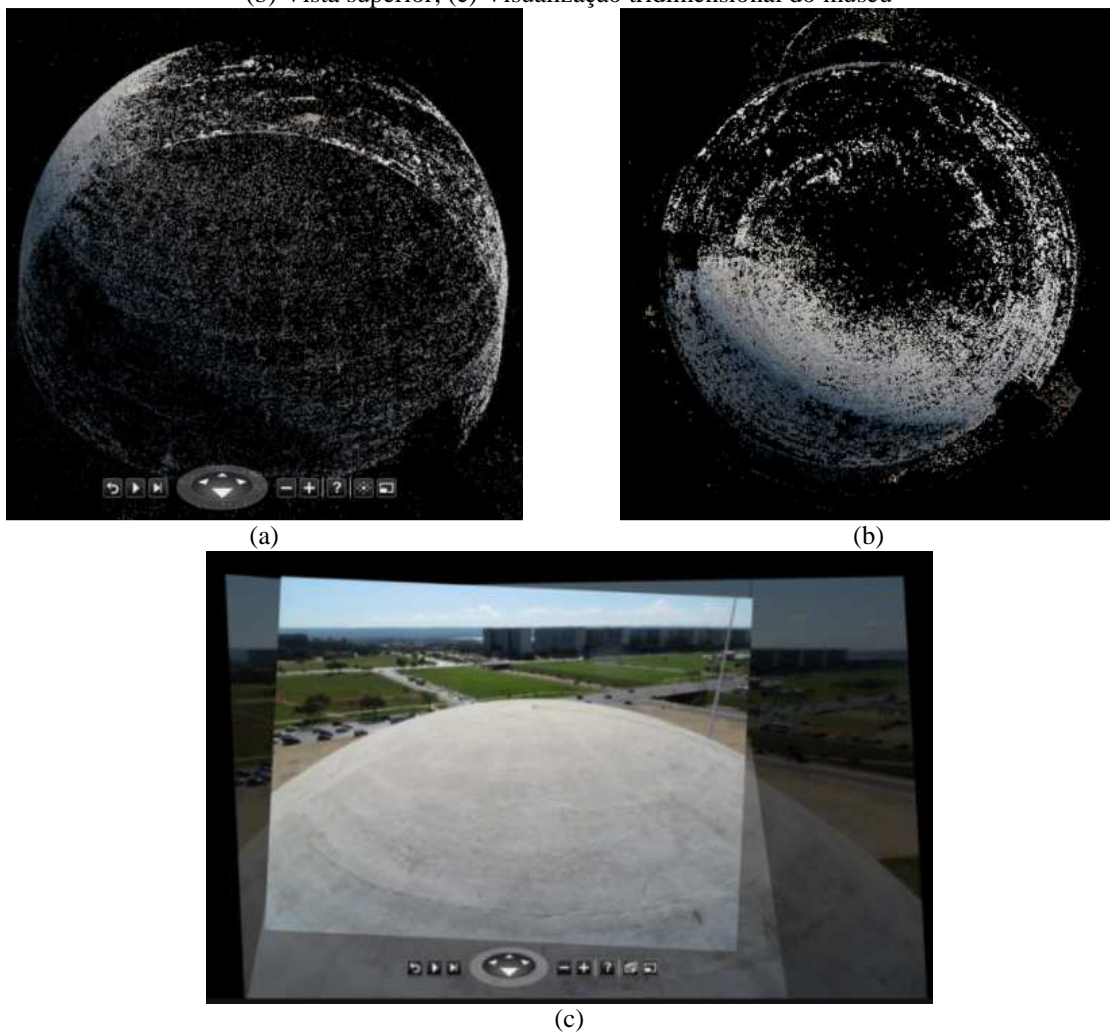


Fonte: próprio autor.

Photosynth

A nuvem de pontos foi modelada no Photosynth e o modelo geométrico da nuvem de pontos apresentou resultado condizente com o formato da edificação. A partir da orientação externa, foi possível rotacionar o modelo e ter a noção da geometria do edifício, como pode ser visto na Figura 153.

Figura 153 – Modelo geométrico de novem de pontos criado pelo Photosynth: (a) Vista em perspectiva; (b) Vista superior; (c) Visualização tridimensional do museu



Fonte: próprio autor.

123D Catch

Relembrando, o número de fotos para *upload* no sistema (70 fotos) é uma das limitações do 123D Catch e, assim, somente parte da cúpula do Museu Nacional foi processada e o resultado é apresentado na Figura 154.

Figura 154 – Parte da cúpula modelada no programa 123D Catch



Fonte: próprio autor.

PhotoScan

No PhotoScan, 228 fotos foram utilizadas para a geração do modelo 1-MN e os parâmetro estão apresentados no Quadro 36.

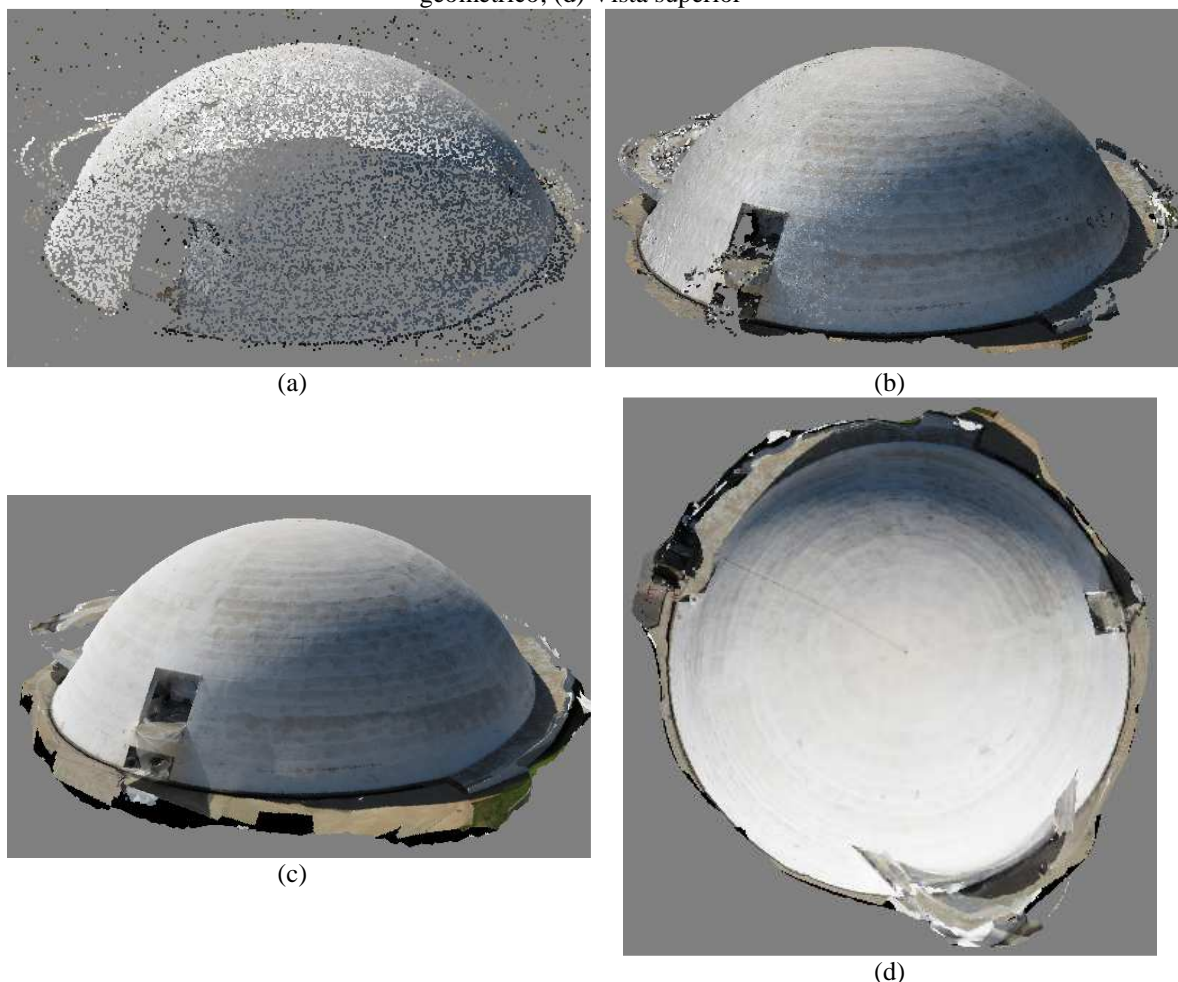
Quadro 36 – Modelo 1-MN: parâmetros utilizados no PhotoScan

Parâmetros	Modelo 1-MN
<i>Align Photos</i>	
<i>Accuracy</i>	<i>Medium</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Generic</i>
Nuvem de pontos esparsa	39.287 pontos
Tempo de processamento	545 s (9 min e 5 s)
<i>Build Dense Cloud</i>	
<i>Quality</i>	<i>Lowest</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>
Nuvem de pontos densa	1.058.393 pontos
Tempo de processamento	186 s (3 min e 6 s)
<i>Build Mesh</i>	
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>High (210.782)</i>
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>Medium (70.260)</i> <i>Low (23.420)</i> <i>Custom (200.000)</i>
Tempo de processamento	43 s
<i>Build Texture</i>	
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1
Tempo de processamento	80 s (1 min e 20 s)

Fonte: próprio autor.

Após a remoção dos ruídos, a nuvem de pontos densa passou a possuir 1.053.913 pontos. Os resultados da nuvem de pontos densa, nuvem de pontos densa, malha TIN e modelos de superfície podem ser vistos na Figura 155.

Figura 155 – Modelo 1-MN: (a) Nuvem de pontos esparsa; (b) Nuvem de pontos densa; (c) Modelo geométrico; (d) Vista superior

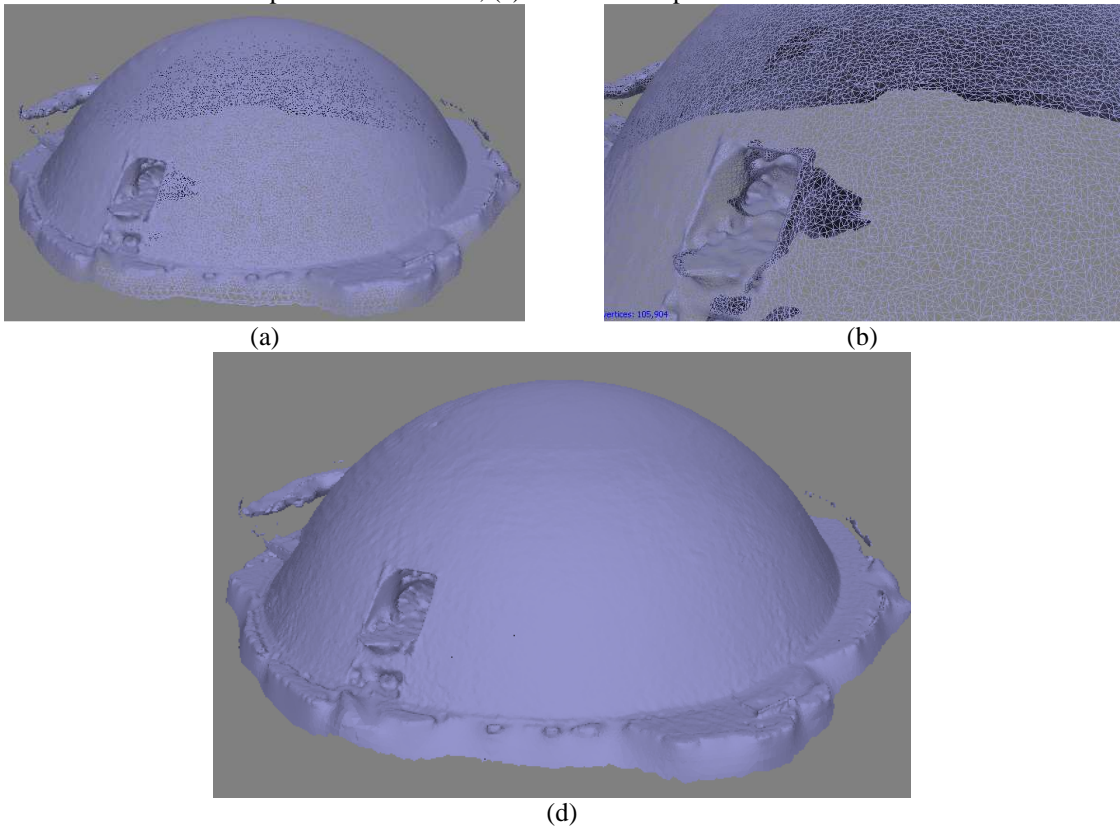


Fonte: próprio autor.

Considerando-se os aspectos supostamente desfavoráveis, como a geometria do edifício que exigiu uma forma diferente de voo, a pouca textura da superfície da cúpula e as condições de iluminação natural, o modelo representou fielmente o formato do edifício com um resultado satisfatório, surpreendendo as expectativas.

O refinamento da malha poderia ter sido maior, se na etapa anterior (construção da nuvem de pontos densa) tivesse sido possível o processamento com parâmetros mais altos que o usado, como *build dense cloud: medium*. A Figura 156 apresenta o resultado da malha TIN.

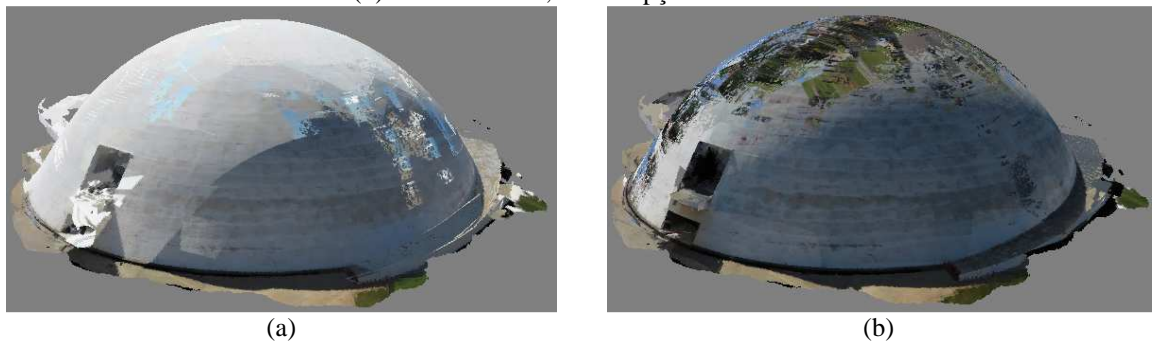
Figura 156 – Modelo 1-MN do Museu Nacional Honestino Guimarães: (a) Malha TIN; (b) Ampliação de parte da malha TIN; (c) Modelo de superfície *shaded*



Fonte: próprio autor.

Foram gerados o modelo 2-MN e o modelo 3-MN no PhotoScan, a partir dos parâmetros do modelo 1-MN, mas com opções diferentes de *mapping mode* e *blending mode*, a fim de demonstrar os resultados para o tipo de mapeamento da textura pelo modo *spherical (mapping mode)*, de máxima e baixa intensidade (*blending mode*). Os resultados não foram satisfatórios para ambos os casos, pois as texturas apresentaram erros e podem ser vistos na Figura 157, apesar da forma esférica do museu.

Figura 157 – Modelo 2-MN e o modelo 3-MN no PhotoScan: (a) Modelo 2-MN, com a opção de máxima intensidade; (b) Modelo 3-MN, com a opção de mínima intensidade



Fonte: próprio autor.

O modelo 4-MN e o modelo 5-MN foram gerados empregando a mesma opção de *blending mode* (*mosaic*), mas alterando as opções de *mapping mode*: *spherical* e *orthophoto*. Percebeu-se que, como pode ser visto na Figura 158 (a), o modelo gerado com a opção *spherical* para a aplicação da textura em *mapping mode* e opção *mosaic* para *blending mode* apresentou um bom resultado. No entanto, para o modo *orthophoto*, o resultado apresentou erros, como ilustrado na Figura 158 (b).

Figura 158 - (a) Modelo 4-MN, com a opção *spherical*; (b) Modelo 5-MN, com a opção *orthophoto*



(a)



(b)

Fonte: próprio autor.

O edifício foi fotografado em uma única manhã e, devido à incidência solar, nota-se parte da edificação com uma maior iluminação (Figura 159) que outra parte, com sombra Figura 158. Esta é uma condição não adequada, pois a condição de iluminação apropriada para o registro

fotográfico dos edifícios para aplicação das técnicas fotogramétricas é a de luz difusa, como a de um dia nublado, porém muitas vezes isto não é possível. No entanto, percebeu-se que se as fotografias são feitas num pequeno intervalo de tempo, as texturas, também causadas pela iluminação, manter-se-ão e o edifício poderá ser modelado, a depender dos demais cuidados, como a sobreposição das imagens.

Figura 159 – Parte da cúpula com maior luminosidade



Fonte: próprio autor.

Devido à resolução da câmera Canon SX270 HS e a distância ao edifício, não foi possível visualizar os problemas existentes na fachada do museu com maior nível de detalhamento, mesmo sabendo, principalmente, da existência de fissuras. Muitas das manchas, que podem ser vistas nos modelos anteriores, são em decorrência da alteração cromática da fachada pela perda de cor do acabamento de pintura e também da formação de sujeidade ou crescimento de microrganismos. Pôde-se perceber também descamação da pintura em partes da fachada.

Na busca da geração de modelos de superfície que permitissem a visualização das fissuras no Museu Nacional Honestino Guimarães, a câmera Canon EOS Rebel SL1 foi utilizada para a captura de imagens, uma vez que esta câmera, como já explicado, apresentaria um potencial maior quanto à visualização desta manifestação patológica.

A Figura 160 apresenta parte da ortomagem da fachada do museu, em que é possível a visualização de fissuras. Esta ortomagem foi exportada com o valor de 16.384 píxeis no maior sentido da imagem, com a finalidade de aumentar a sua resolução.

Figura 160 – Parte da cúpula com maior luminosidade



Fonte: próprio autor.

As Figura 160 (b) e (c) são ampliações da ortoimagem da fachada com fissuras. Estas fissuras foram medidas com aparelho digital DJCK-2 *Crack Width Meter* (escala de teste 0,02 mm – 2 mm, interpolação de 0,01 mm) (Figura 161) e observaram-se nas ortoimagens fissuras com abertura próximas a até 0,045 mm, como ilustrada na Figura 162. Como comentado no início deste capítulo e a partir do cálculo do *TP*, as expectativas quanto à capacidade de visualização das fissuras com menores aberturas, à distância aproximada de 3 m e por meio da câmera Canon EOS Rebel SL1, foram atendidas.

Figura 161 – Aparelho digital DJCK-2 *Crack Width Meter*

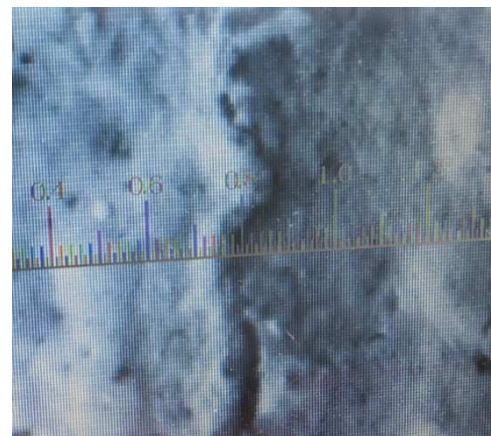


Fonte: próprio autor.

Figura 162 – (a) Fachada do Museu Nacional Honestino Guimarães; (b) Medição da fissura com o aparelho DJCK-2 *Crack Width Meter*



(a)



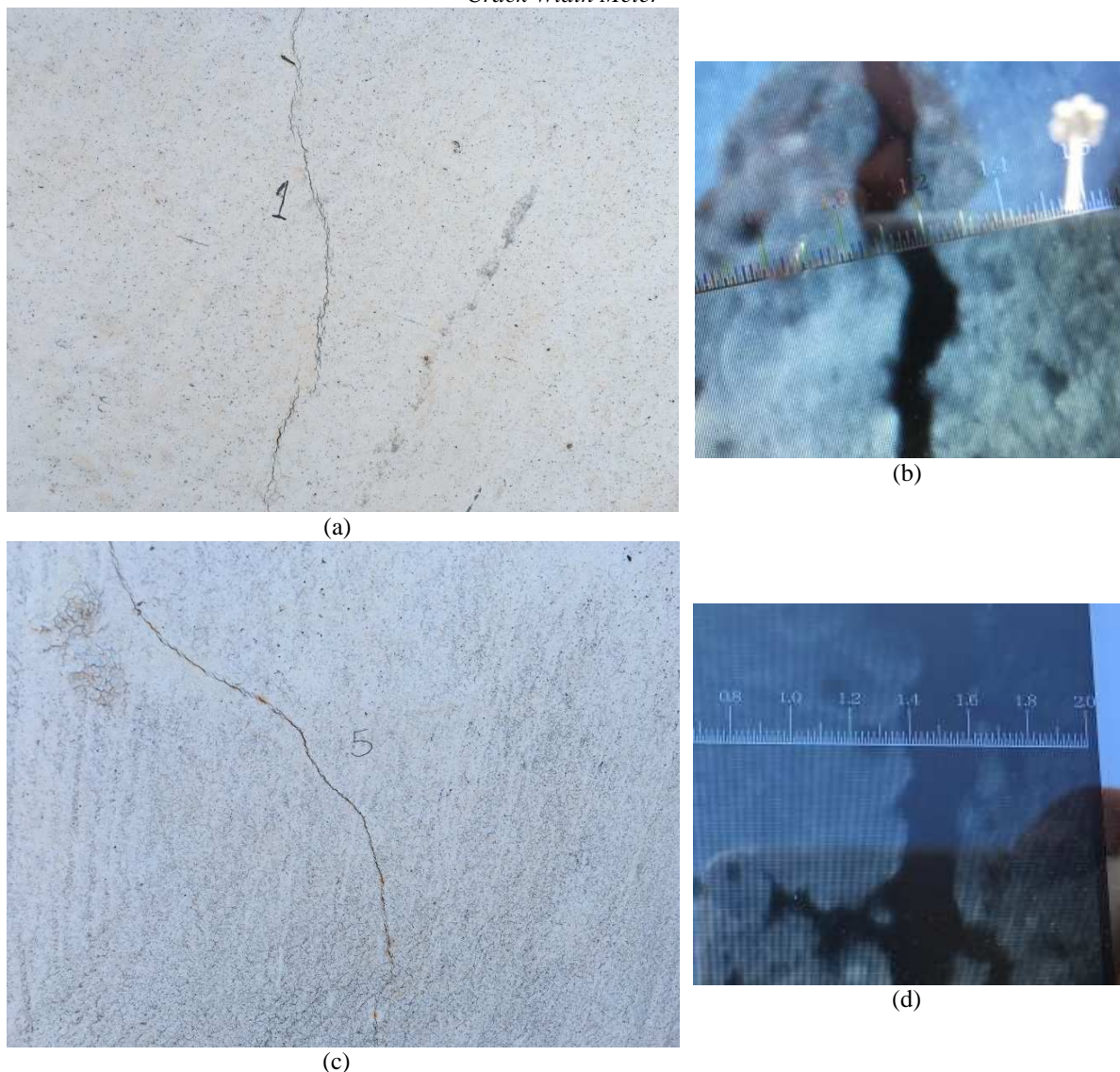
(b)

Fonte: próprio autor.

O contraste da fissura com o restante da fachada é o que a torna mais ou menos visível também. Isto é perceptível quando se analisa as ortoimagens na Figura 160, em que na imagem da Figura 160 (b) quase não se visualizam as fissuras presentes na fachada do Museu Nacional Honestino Guimarães.

A Figura 163 apresenta outras imagens da fachada do museu, com as respectivas medições da abertura da fissura. Podem-se ver fissuras com abertura de 0,05 mm (Figura 163 (a)) e 0,1 mm (Figura 163 (c)). Na classificação de Gaspar e colaboradores (2006), estas fissuras são tidas como microfissuras e com grau de severidade 0.

Figura 163 – (a) Fachada do Museu Nacional Honestino Guimarães; (b) Medição da fissura com DJCK-2 Crack Width Meter



Fonte: próprio autor.

5.4.6 Prédio do Congresso Nacional, Anexo I

O prédio do Congresso Nacional, Anexo I, possui fachadas com três principais acabamentos ou sistemas: fachadas leste e oeste com revestimento em mármore branco; fachada norte com *brise-soleil*; e a fachada sul com esquadrias metálicas e vidro. Do ponto de vista do planejamento, alguns aspectos definiram quais fachadas seriam fotografadas para posterior processamento das imagens e geração dos modelos fotogramétricos. Inicialmente, a fachada norte, com *brise-soleil*, não fez parte do interesse desta pesquisa por causa do tipo de sistema. Pela experiência já obtida na geração de modelos de edificações anteriores, a fachada sul foi descartada para os registros fotográficos, por causa da dificuldade em que os programas de

fotogrametria digital encontram em processar as superfícies espelhadas, não por falha, mas pela característica reflexiva do vidro.

Ainda pelo aspecto do planejamento, o registro fotográfico foi realizado nos períodos favoráveis, isto é, analisou-se a posição do sol em relação às fachadas leste e oeste, para que o luz não incidisse diretamente sobre a objetiva da câmera. Desta maneira, estas fachadas foram registradas próximo dos horários de doze horas da manhã ou no mesmo sentido do sol em relação à posição da câmera. Um cuidado que se tomou para esta última maneira de fotografar, é o de evitar que a sombra do VANT se forme sobre a fachada e seja registrada também no momento das tomadas fotográficas.

A câmera utilizada para o registro das imagens do edifício do Congresso Nacional foi a Sony RX100. Para as fachadas posicionadas no sentido oeste, a escala de número f foi f/5.6, tempo de exposição de 1/1250 s e sensibilidade ISO-200 e para as fachadas leste, a única mudança foi para a escala de número f, usando-se f/4.5. Para este edifício, estimou-se, inicialmente, que as imagens fossem capturadas a uma distância de 5 m com valores de sobreposições longitudinal de 80% e lateral de 40%.

Há sempre a dificuldade de sobrevoar com o VANT sem o modo automático (controlado por GPS) mantendo-se a mesma distância em relação à fachada, principalmente para edifícios muito altos, devido as correntes de ar e também falta de pontos de referência à medida que a aeronave chega a pontos mais altos da fachada de um edifício. Então, naturalmente, acredita-se que houve variação da distância estabelecida inicialmente de 5 m. Pelas equações de cálculo de N°_{fotos} e para a distância de 5 m, a quantidade de fotos necessárias seria de 203 fotos para se alcançar as sobreposições longitudinal de 80% e lateral de 40%, para cada fachada com altura aproximada de 92 m e largura de 10,50 m, totalizando 966 m² de fachada com revestimento em mármore branco. Porém, é possível que a distância do registro fotográfico no voo tenha variado, alcançando distâncias maiores. Para a distância de 6 m, o número de fotos para se alcançar a sobreposição estabelecida seria de 142 fotos e para uma distância de 7 m a quantidade seria de 104 fotos. O Quadro 37 apresenta a quantidade de fotos adquiridas por linha de voo.

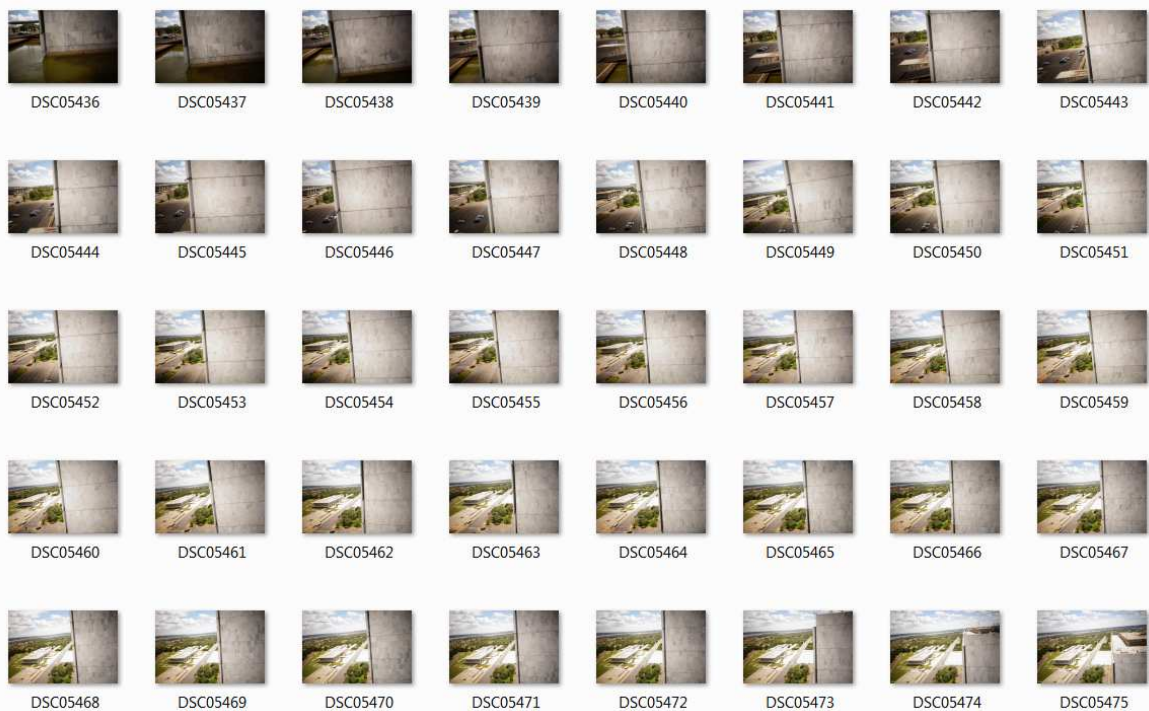
Quadro 37 – Número da linha de voo e quantidade de fotos por linha

Número da linha de voo	1	2	3	4	Total
Quant. de fotos Fachada oeste Senado	40	30	34	29	133
Quant. de fotos Fachada leste Senado	40	32	29	25	126
Quant. de fotos Fachada oeste Câmara dos Deputados	43	32	40	31	146

Fonte: próprio autor.

Devido à variação da posição do sol, em determinado momento não foi possível fazer o registro fotográfico da fachada leste do Senado e também não foi possível realizar as fotografias posteriormente desta fachada por causa de regulamentações internas posteriores, que levaram à impossibilidade e proibição de serem realizados outros experimentos neste edifício. A Figura 164 apresenta as imagens capturadas da linha da primeira linha de voo realizada para o Anexo do Senado Federal.

Figura 164 – Fotografias da linha do Anexo do Senado Federal, primeira linha de voo



Fonte: próprio autor.

PhotoScan

Os parâmetros utilizados no modelo 1-CN-S-O (Congresso Nacional, fachada oeste do Senado) estão presentes no Quadro 38. Devido aos custos computacionais, definiu-se para este modelo a malha com 333.171 faces. Os tempos gastos em cada etapa também não foram marcados.

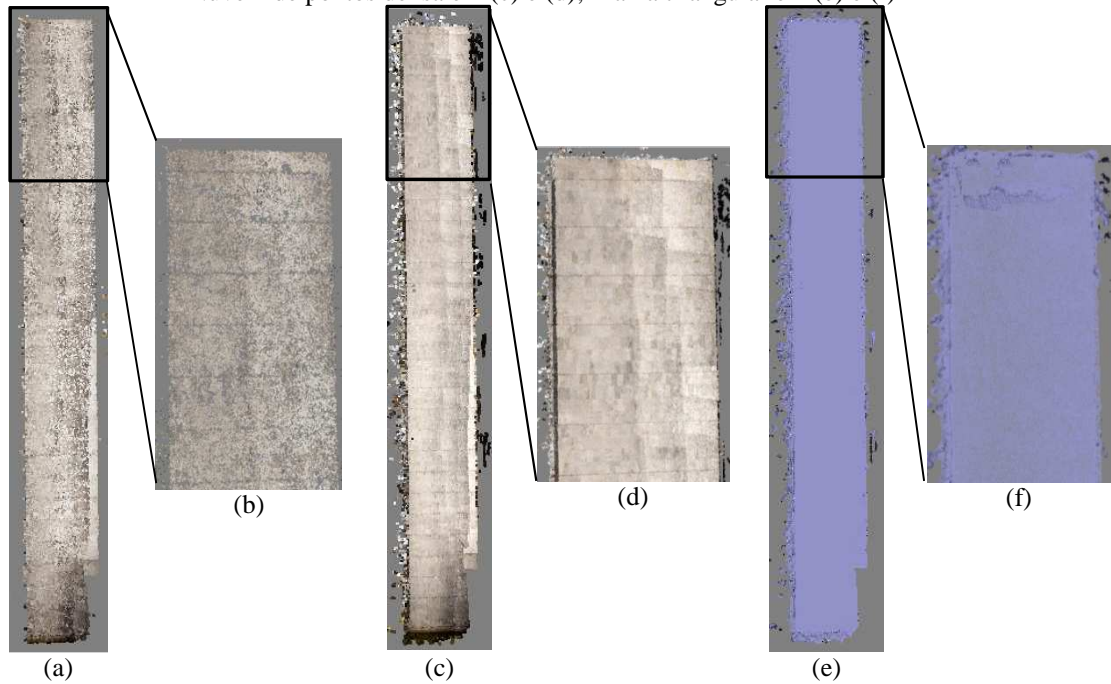
Quadro 38 – Modelo 1-CN-S-O: parâmetros utilizados no PhotoScan

Parâmetros	Modelo 1
<i>Align Photos</i>	
<i>Accuracy</i>	<i>Medium</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>
Nuvem de pontos esparsa	361.367 pontos
<i>Build Dense Cloud</i>	
<i>Quality</i>	<i>Medium</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>
Nuvem de pontos densa	14.882.503 pontos
<i>Build Mesh</i>	
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Low (333.171)</i>
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High (2.998.541)</i> <i>Medium (999.513)</i> <i>Custom (200.000)</i>
<i>Build Texture</i>	
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1

Fonte: próprio autor.

A Figura 165 apresenta o resultado da modelagem realizado no programa PhotoScan para o modelo 1-CN-S-O, apresentando a nuvem de pontos esparsa, a nuvem de pontos densa e a malha poligonal triangular.

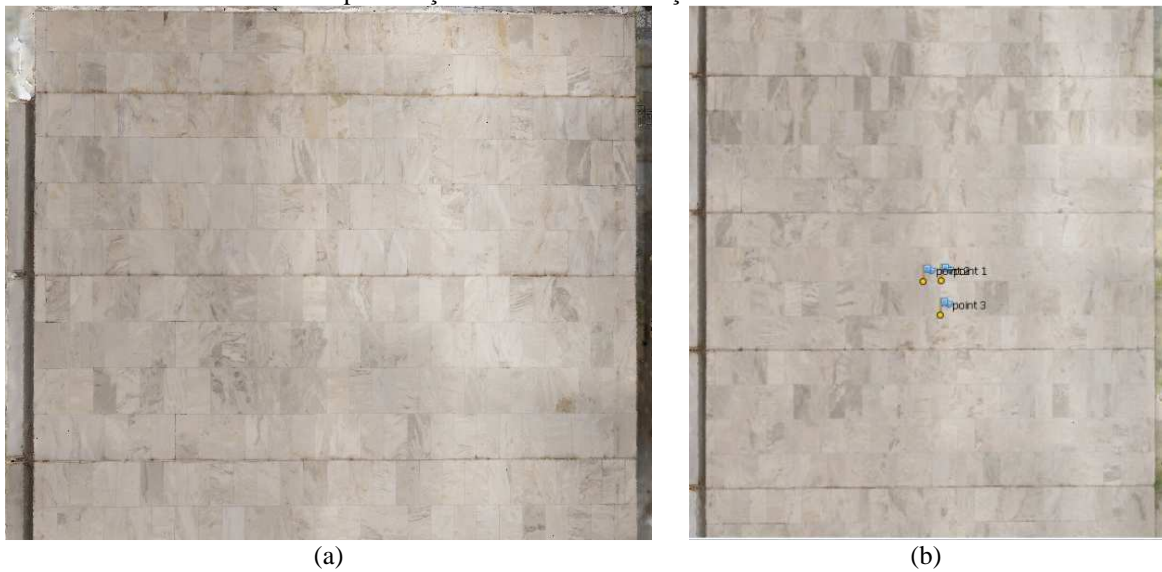
Figura 165 – Modelo 1-CN-S-O, modelado no PhotoScan: Nuvem de pontos esparsa em (a) e (b); Nuvem de pontos densa em (c) e (d); Malha triangular em (e) e (f)



Fonte: próprio autor.

Na Figura 166 são apresentadas ampliações da fachada, em que na Figura 166 (a) é ilustrado a parte superior da edificação e em Figura 166 (b) é também visualizada a etapa de especificação de marcas para o procedimento de orientação externa absoluta.

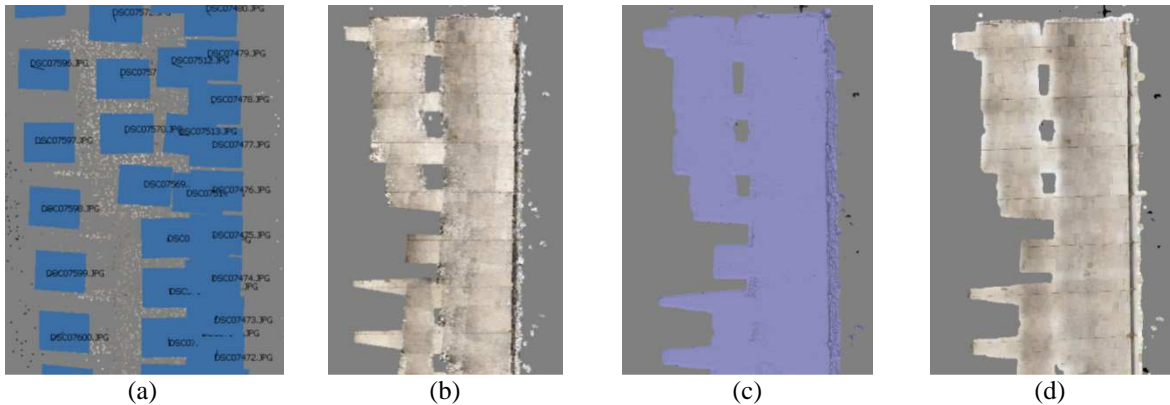
Figura 166 – Orientação externa do modelo 1-CN-S-O, no PhotoScan: (a) Parte superior do prédio; (b) Etapa de especificação das marcas orientação externa absoluta



Fonte: próprio autor.

As fachadas do Senado (fachada leste) e Câmara dos Deputados (fachada oeste) foram processadas com os mesmos parâmetros utilizados para a fachada oeste do Senado. Os resultados do modelo 2-CN-S-E (Congresso Nacional, fachada leste do Senado) podem ser vistos na Figura 167.

Figura 167 – Etapas da construção do modelo 2-CN-S-E no PhotoScan: (a) Nuvem de pontos esparsa e posição da câmera; (b) Nuvem de pontos densa; (c) Malha triangular; (d) Modelo de superfície com aplicação de textura



Fonte: próprio autor.

Apesar da quantidade de imagens que supostamente garantiriam as sobreposições recomendadas, percebe-se que somente este aspecto não garante que as fotos estejam sobrepostas. A Figura 167 (a) ilustra a posição da câmera no momento da fotografia e nota-se que o lado esquerdo possui menos fotos, conseqüentemente com valores baixos de sobreposição, e os vazios indicam que pontos não foram correlacionados em determinadas partes do modelo. A complexidade de voar próximo de edificações a grandes alturas dificulta o processo de captura de imagens. Como já mencionado também, não houve a possibilidade de se realizar novos experimentos no Congresso Nacional, o que seria de extrema importância para a realização de trabalhos deste nível de complexidade. No entanto, informações importantes puderam ser obtidas a partir destes modelos, como partes do revestimento de mármore com fratura e destacamento, como apresentado na Figura 168.

Figura 168 – Modelo 2-CN-S-E no PhotoScan: (a) Fraturas do mármore nos pavimentos superiores; (b) Fraturas do mármore nos pavimentos inferiores



Fonte: próprio autor.

Outros tipos de danos foram possíveis de serem observados em todas as fachadas com revestimento em mármore do Congresso Nacional – Anexo 1, como a formação de manchas nas juntas de controle e possíveis fissuras. Devido à resolução e ao contraste das imagens, não foi possível garantir a ocorrência de fissuras, pois muitas vezes estas se também confundem com os veios presentes no mármore.

Para o Congresso Nacional, fachada oeste da Câmara dos Deputados, o modelo 3-CN-CD-O foi gerado corretamente e foram testadas duas formas de geração da textura para serem avaliadas quanto ao aspecto visual. A Figura 169 apresenta o modelo 3-CN-CD-O exportado dos últimos oito pavimentos da Câmara dos deputados, com as opções de geração de textura pelos modos *generic* e *adaptive orthophoto*, e não se observou diferença na qualidade das imagens.

Figura 169 – Modelo 3-CN-CD-O: (a) Modo *generic*; (b) Modo *adaptive orthophoto*



Fonte: próprio autor.

O PhotoScan permite a variação da resolução da ortoimagem no momento da exportação. A Figura 170 (a) foi gerada a partir de uma imagem em que se estabeleceu uma resolução de 4096 píxeis em linha e a Figura 170 (b) possui o dobro de píxeis (8.192 píxeis), condição que pode favorecer a percepção de detalhes ou informações que se queiram obter das imagens. Ressalta-se que a quantidade de píxeis a ser estabelecida será sempre no maior sentido da ortoimagem.

Figura 170 – Modelo 1-CN-S-O gerado no PhotoScan: (a) Exportado com resolução máxima de 4096 píxeis; (b) Exportado com resolução máxima de 8192 píxeis

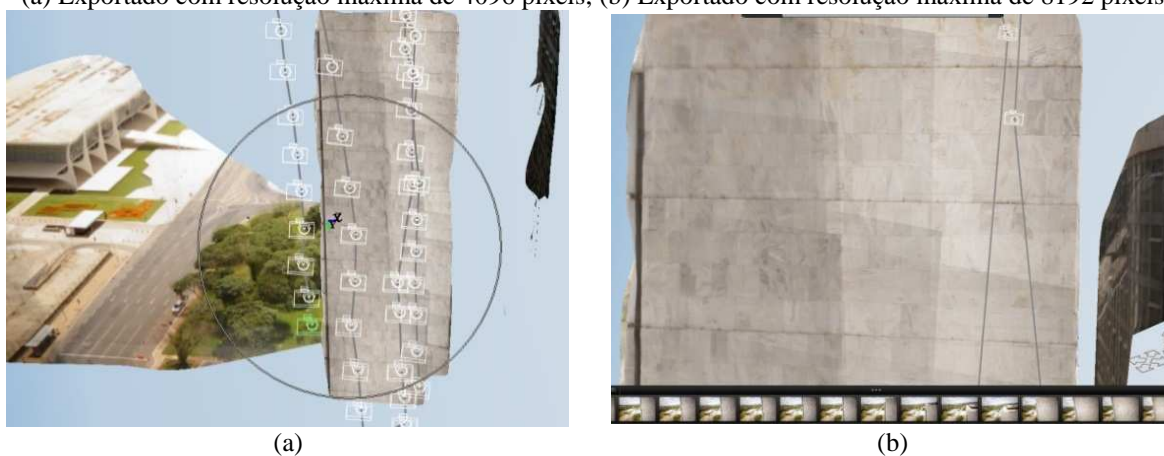


Fonte: próprio autor.

123D Catch

Para o programa 123D Catch, foram carregadas 40 fotos para o processamento via web, mas o resultado obtido pelo programa não foi satisfatório, como pode ser constatado na Figura 171 (b).

Figura 171 – Modelagem do Anexo I do Congresso Nacional, Senado, fachada oeste, pelo PhotoScan: (a) Exportado com resolução máxima de 4096 píxeis; (b) Exportado com resolução máxima de 8192 píxeis



Fonte: próprio autor.

5.4.7 Torre de TV Digital

A Torre de TV Digital de Brasília, também conhecida como a Flor do Cerrado, é um projeto do arquiteto Oscar Niemeyer, concebida para transmissão televisiva do sistema de TV digital para o Distrito Federal e algumas cidades do entorno. Esta torre, situada na região administrativa de Sobradinho, possui uma altura de 170 m, em que 120 m correspondem à estrutura de concreto e 50 m à estrutura metálica no seu topo. A estrutura da torre em concreto tem o acabamento final em pintura na cor branca (Figura 172).

Figura 172 – Torre de TV Digital

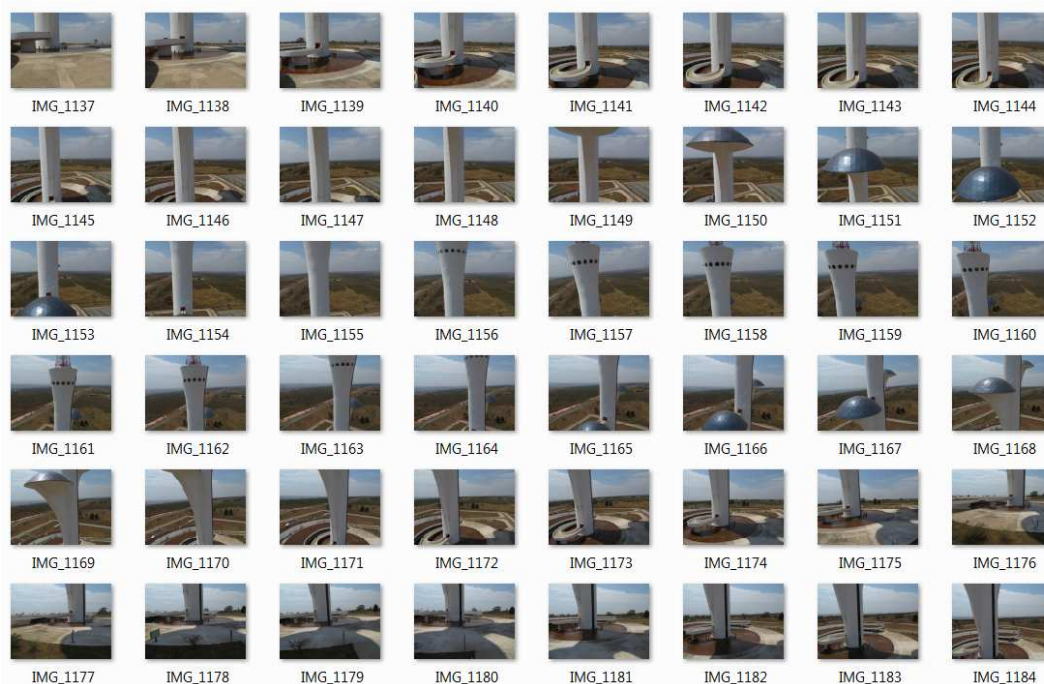


Fonte: Próprio autor.

Duas cúpulas fazem parte da composição arquitetônica da Torre de TV Digital, uma em cada lateral. A cúpula mais alta está a 80 m do solo, onde funcionará um bar-café com vista panorâmica. A segunda cúpula está posicionada à 60 m do solo e esta será destinada a um espaço de exposição. As duas cúpulas possuem cobertura com fechamento em vidro.

Com a câmera fixada no VANT, as imagens para o processamento da Torre de TV Digital foram capturadas. Para a modelagem da torre, as fotografias foram tiradas a uma distância maior que 15 m. A câmera usada foi a Canon SX270 HS com escala de número f: f/5,6, tempo de exposição de 1/1250 s e sensibilidade ISO-100. A Figura 173 apresenta algumas das imagens capturadas pelo VANT da Torre de TV Digital.

Figura 173 – Imagens capturadas pelo VANT da Torre de TV Digital



Fonte: próprio autor.

PhotoScan

A partir de 237 fotos, o modelo 1-TD (Torre de TV Digital) foi gerado com a opção de alta precisão (*accuracy: high*) de alinhamento das imagens, gerando uma nuvem de pontos esparsa com 20.080 pontos. Os parâmetros utilizados no modelo 1-TD estão presentes no Quadro 39 e os tempos gastos em cada etapa não foram medidos.

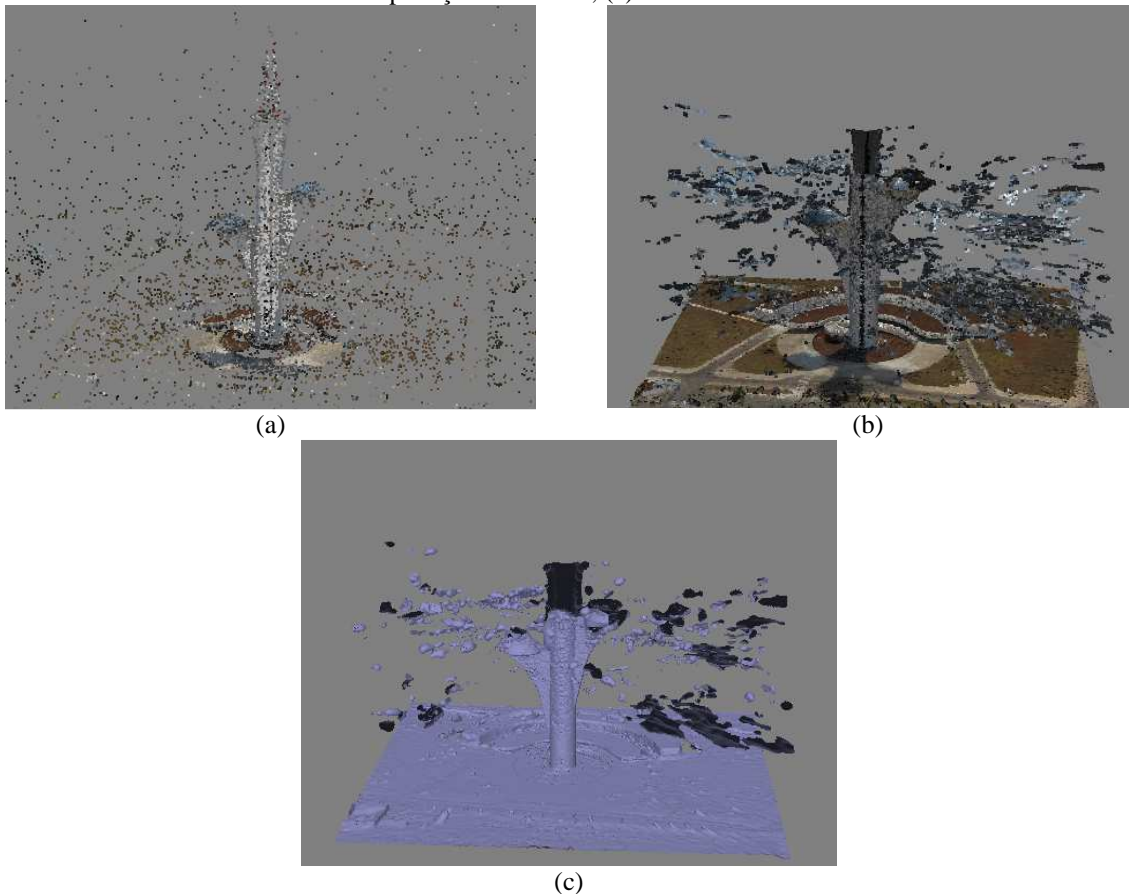
Quadro 39 – Modelo 1-TD: parâmetros utilizados no PhotoScan

Parâmetros	Modelo 1-TD
<i>Align Photos</i>	
<i>Accuracy</i>	<i>High</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>
Nuvem de pontos esparsa	20.080 pontos
<i>Build Dense Cloud</i>	
<i>Quality</i>	<i>Medium</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>
Nuvem de pontos densa	4.931.416 pontos
<i>Build Mesh</i>	
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Medium (328.756)</i>
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High (986.269)</i> <i>Low (109.585)</i>
<i>Build Texture</i>	
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1

Fonte: próprio autor.

Por causa do custo computacional alto, as demais etapas (*build dense cloud* e *build mesh*) não foram realizadas com os modos *high*. A Figura 174 apresenta os resultados obtidos nas etapas de alinhamento das imagens e geração de nuvem de pontos esparsa, construção da nuvem de pontos densa e da malha TIN.

Figura 174 – Modelo 1-TD no PhotoScan, *accuracy: high*: (a) Nuvem de pontos esparsa; (b) Modelo com aplicação da textura; (c) Malha TIN



Fonte: próprio autor.

O modelo 2-TD também gerado a partir de 237 fotos, mas a partir da opção de baixa precisão (*accuracy: low*) de alinhamento das imagens, gerando uma nuvem esparsa de pontos com 27.588 pontos. Os parâmetros utilizados no modelo 2-TD estão presentes no Quadro 40 e os tempos percorridos em cada etapa não foram medidos.

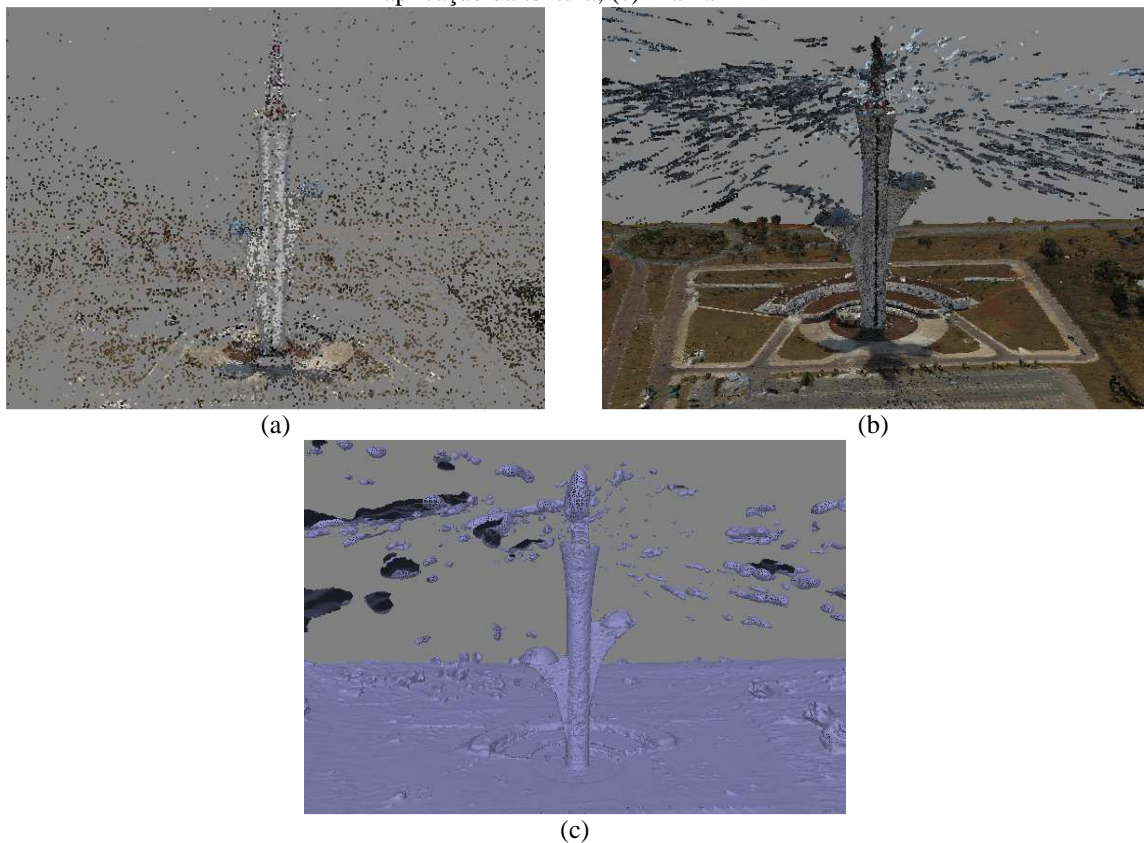
Quadro 40 – Modelo 2-TD: parâmetros utilizados no PhotoScan

Parâmetros	Modelo 1
Align Photos	
<i>Accuracy</i>	<i>Low</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>
Nuvem de pontos esparsa	27.588 pontos
Build Dense Cloud	
<i>Quality</i>	<i>Medium</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>
Nuvem de pontos densa	6.447.005 pontos
Build Mesh	
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Medium (429.795)</i>
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High (1.289.386)</i> <i>Low (143.265)</i>
Build Texture	
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4000x1

Fonte: próprio autor.

A Figura 175 apresenta os resultados obtidos nas etapas de alinhamento das imagens e geração de nuvem de pontos esparsa, construção da nuvem de pontos densa e da malha TIN.

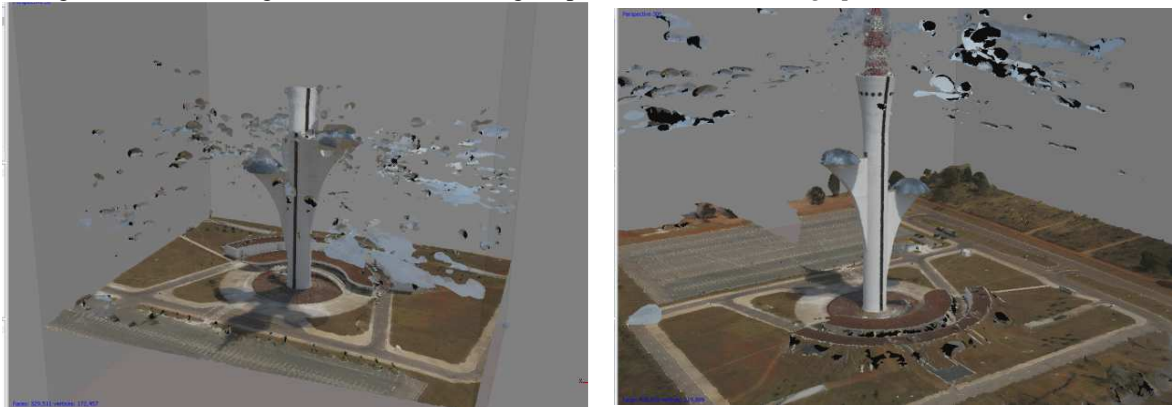
Figura 175 – Modelo 2-TD no PhotoScan, *accuracy: low*: (a) Nuvem de pontos esparsa; (b) Modelo com aplicação da textura; (c) Malha TIN



Fonte: próprio autor.

O modelo 1-TD, no modo *precision: high*, foi gerado e o resultado final do processamento não foi satisfatório, pois a parte superior da torre não foi modelada. No modelo 2-TD, no modo *precision: low*, o modelo foi gerado por completo, como pode ser observado na Figura 176.

Figura 176 – Modelagem da Torre de TV Digital pelo PhotoScan: (a) *High precision*; (b) *Low Precision*



Fonte: próprio autor.

Optar por uma precisão alta na etapa de alinhamento das imagens demonstrou no experimento que esta maior rigorosidade conduz o programa a reduzir a quantidade de pontos da nuvem e, por tanto, leva à não geração do modelo por completo. No modo de precisão baixa no alinhamento das imagens, o programa assumiu mais pontos da nuvem esparsa, devido ao seu maior nível de aceitação de pontos com menor exigência de precisão, o que levou à geração completa observado na Figura 177 do modelo 2-TD.

Apesar da superfície apresentar um padrão de textura quase que totalmente uniforme, isto é, branca por completo, mais uma vez o software PhotoScan criou um modelo da Torre de TV Digital com muita representatividade e qualidade do produto final. Contudo, a nuvem de pontos apresentou ruídos, ou seja, pontos registrados de maneira errada, que resultaram na formação desses elementos em torno da torre, como visualizados na Figura 176. Mas, utilizando as opções *selection tools* e *delete/crop*, os elementos em volta da torre foram excluídos e pôde-se ter uma visualização mais limpa da torre, como pode ser visto na Figura 177.

Figura 177 – Modelo 2-TD: Modo *accuracy: low*



Fonte: próprio autor.

Como esperado, as superfícies de vidro que fazem parte da cobertura da sala de exposição e do bar-café não apresentaram bons resultados pela dificuldade já descrita que os programas voltados à obtenção de modelos por nuvens de pontos possuem (Figura 178). A antena na parte superior da torre também não foi modelada corretamente, o que era de se esperar também por causa de suas características peculiares. Destaca-se também a boa qualidade do resultado obtido na modelagem do terreno, onde se encontra implantada a torre, com suas vias, estacionamentos e áreas verdes.

Figura 178 – Modelo 1 da Torre de TV Digital: Cúpula do espaço de exposição



Fonte: próprio autor.

Devido à distância em que as fotografias foram tiradas e também à resolução da câmera, além do tamanho do sensor e da distância focal da câmera Canon SX270 HS, foi possível visualizar a formação de manchas sobre as superfícies da Torre de TV Digital, mas com uma resolução muito baixa, como se observa na Figura 179. Por causa dos mesmos aspectos, a presença de

fissuras não pôde ser visualizada ou comprovada pelos modelos gerados no programa PhotoScan.

Figura 179 – Modelo 1 da Torre de TV Digital: Formação de manchas



Fonte: próprio autor.

5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA GERAÇÃO DOS MODELOS POR DSM

A seguir, serão apresentadas a discussão dos resultados obtidos pelo emprego de VANTs, e demais equipamentos, e na geração de modelos por DSM.

5.5.1 Utilização de VANTs

Foi imprescindível que as imagens registradas de edificações fossem realizadas perpendicularmente ao plano da fachada para os modelos gerados por DSM (*Dense Stereo Matching*). Para a aplicação desta técnica em edifícios altos, a fotografia perpendicular ao plano da fachada somente foi possível com a utilização do VANT.

A utilização do VANT também foi importante para que detalhes possam ser visualizados nas fotografias, uma vez que permite uma maior aproximação em relação às partes mais altas das edificações, o que leva a uma maior resolução espacial da imagem. Por outro lado, existe a dificuldade de manter o VANT à mesma distância da edificação à medida que se desloca para cima em voos realizados por controle manual, devido a vários aspectos, como falta de pontos de referência para o piloto. Este aspecto pode influenciar na quantidade de imagens necessárias para se garantir as sobreposições recomendadas para a obtenção de modelos por nuvem de pontos.

Entre todos os aspectos, o emprego de VANTs apresentou-se como uma solução eficiente e adequada para a captura de imagens para serem processadas na obtenção de modelos por nuvem de pontos. No entanto, cabe ressaltar que ainda não existe uma regulamentação para operacionalização de VANTs em espaços públicos, devendo-se obter autorizações junto aos responsáveis administrativamente pela edificação e, principalmente, realizar os voos em períodos sem transeuntes e em área isolada no instante da realização dos voos e por profissional habilitado e com experiência no manuseio deste equipamento.

5.5.2 Geração de modelos por DSM

Os recentes avanços no desenvolvimento dos programas voltados à fotogrametria digital, em especial à obtenção de modelos por nuvens de pontos, podem possibilitar a geração da geometria de objetos, incluindo edificações, ou cenas complexas. A finalidade para a qual o produto fotogramétrico será destinado determinará o planejamento, os materiais e programas necessários para se alcançar o resultado final esperado.

A etapa do planejamento neste trabalho fez-se preponderante para analisar o entorno das edificações, avaliando, por exemplo, possíveis obstáculos, assim como para determinar como seriam realizados os voos para a captura das imagens. Para quase todas as edificações, a captura das fotografias quando realizadas com o auxílio do VANT foi feita com voos paralelamente ao plano da fachada, com voos na vertical. No entanto, para o prédio do Museu Nacional Honestino Guimarães foi adotada outra estratégia de voo. Como se tratava de um prédio em formato de cúpula, os voos foram feitos paralelamente ao plano da fachada, portanto em forma de parábola, para que garantisse que todas as imagens capturadas possuíssem a mesma distância em relação à edificação, que é outro aspecto preponderante para a geração dos modelos por DSM. Assim, além de ter sido avaliado possíveis obstáculos que pudessem impossibilitar ou dificultar o registro das imagens, foi necessário planejar alternativas para o voo do VANT e o registro fotográfico, analisando as particularidades deste museu.

Outro aspecto relevante da etapa de planejamento foi a definição de horário para o registro fotográfico baseado nas condições de iluminação. Observou-se que o melhor horário para se fotografar as fachadas foi com o sol a pino, pois evita a incidência direta da luz do sol sobre a fachada ou a incidência sobre a objetiva da câmera, que gerariam definições dos parâmetros das câmeras não pertinentes ao uso em VANTs. Os dias com céu nublado foram os mais favoráveis

às tomadas fotográficas, pois evitou-se os aspectos citados, além de terem diminuído o efeito das sombras sobre as fachadas.

As câmeras fotográficas foram definidas em função do *payload* (carga embarcada) do VANT: compactas e não métricas. A câmera usada com maior resolução espacial foi a Canon EOS Rebel SL1 e esta câmera à distância de 2 m possui o *TP* equivalente à 0,48 mm/píxel. No entanto, foi possível visualizar nas ortoimagens da fachada do Museu Nacional Honestino Guimarães fissuras com abertura de 0,045 mm, a partir da obtenção de fotos à distância de 1,5 m, apesar das considerações de Meneses e Almeida (2012) sobre resolução espacial. Os autores afirmam que alguns experimentos demonstraram que objetos podem ser visualizados numa imagem com a sua resolução espacial nominal equivalente à metade da resolução espacial na sua menor dimensão, desde que apresentando um bom contraste de refletância entre os elementos vizinhos. Deve-se lembrar que a resolução espacial não é determinada somente em função dos píxeis efetivos, mas também em função do tamanho do sensor e da distância focal.

Todas as imagens foram registradas com exposição manual e para as câmeras embarcadas no VANT os tempos de exposição foram sempre curtos (velocidades de obturação acima de 1/800), *f*/números relativamente altos, o que significa aberturas maiores (que permitem maior passagem da luz e menor profundidade de campo) e valores de ISO entre 100 e 200 para redução de ruídos e maior definição das bordas da imagem. Assim, estes parâmetros garantem relações que proporcionaram profundidade de campo favorável, isto é, focagem nítida aceitável da imagem, uma vez que as imagens são tomadas com a aeronave em deslocamento.

As equações para cálculo do *TP* (tamanho de píxeis) foram fundamentais para determinar quais informações poderiam ser obtidas em função do tamanho dos objetos na cena e também em relação à distância ao serem fotografados. A equação proposta neste trabalho foi uma alternativa de cálculo do tamanho do píxel, utilizando, dentre os parâmetros existentes para as câmeras, somente a quantidade de píxeis. Por não considerar o tamanho do sensor e a distância focal da câmera, os valores podem não ser tão precisos quanto à equação proposta por Andrade (2003).

A equação proposta nesta tese para determinação da posição da câmera entre as tomadas fotográficas, para se obter a sobreposição necessária para a geração dos modelos, também se mostrou eficiente. No entanto, fazem-se necessárias outras informações para o cálculo: a distância da câmera ao objeto ou cena; o ângulo da abertura da lente da câmera; e percentual de

sobreposição. Constatou-se também que a relação $R = B / L$ não pode ser aplicada para qualquer tamanho de lente e valor de sobreposição a fim de se determinar qual a distância entre as tomadas fotográficas. O cálculo do número de fotografias (N°_{fotos}) para se estimar a quantidade de imagens a serem fotografadas de uma cena é uma maneira de determinar as quantidades de imagens em função da sobreposição longitudinal e lateral, porém, como observado no experimento do prédio do Congresso Nacional, somente este fator não garante que todas as fotos tenham alcançado a sobreposição necessária, uma vez que para voos no modo manual houve uma dificuldade de controlar a velocidade de voo e, conseqüentemente, a quantidade de fotos por linha de voo, principalmente nos voos sobre os edifícios mais altos, onde, à medida que se sobe, as referências de voo tornam-se mais difíceis.

Para edificações altas, em que os registros fotográficos devem ser realizados perpendicularmente ao plano da fachada, a utilização de técnicas ou equipamentos é necessária para permitir que todas as partes do edifício sejam fotografadas nesta condição e, para tanto, o emprego do VANT garantiu esta premissa. Constatou-se que fotografias feitas do nível do solo (fotogrametria terrestre) geraram modelos sem precisão do formato das partes mais altas dos edifícios (pavimentos superiores), criando superfícies irregulares e não representativas da forma efetiva. Acredita-se que isto ocorre porque as partes mais altas ficam mais distantes do centro perspectivo da câmera, aumentando as incertezas e a imprecisão na etapa de alinhamento das imagens e geração das nuvens de pontos.

Neste trabalho, foram utilizados programas via web, programas livres gratuitos e programa comercial. Os programas via web apresentaram bons resultados, mas possuem algumas limitações, como o limite de imagens para carregamento e processamento. Os programas livres e gratuitos VisualSfM e MeshLab são boas ferramentas, apesar de exigir em um pouco mais de tempo de processamento que o PhotoScan e também mais conhecimento do usuário pela complexidade de algumas etapas. O PhotoScan, programa comercial, foi o mais usado nos experimentos e mostrou-se excelente para a geração dos modelos geométricos, pelos mais diferentes formatos de edificações processadas e também pela possibilidade de exportação das ortomagens, opção que os demais programas utilizados não possuíam. Importante destacar que em nenhum dos programas utilizados nesta pesquisa foi necessária a etapa de calibração da câmera ou orientação interna, pois estas etapas foram realizadas de modo automático utilizando-se algoritmos internos programas, eliminando uma etapa peculiar da fotogrametria

digital. Desta maneira, possibilitou-se que várias câmeras pudessem ser utilizadas com agilidade na geração dos modelos geométricos e de superfície.

O programa PhotoScan permitiu a exportação de ortoimagens aumentando a resolução em até quatro vezes para os produtos gerados, o que melhora a qualidade da imagem. No entanto, este aumento da resolução torna a etapa de geração de mapa de danos com maior custo computacional, ou seja, necessidade de *hardware* com maior memória e aumento do tempo de processamento das imagens para a classificação dos danos.

Quanto ao parâmetro de precisão na etapa de alinhamento das imagens no PhotoScan, não se chegou a uma conclusão, pois enquanto notou-se que a alta precisão proporcionou a geração de um melhor modelo no edifício B, para a Torre de TV Digital o melhor resultado foi obtido com a opção de baixa precisão. Uma das hipóteses para esse fato é que para cenas fotografadas a maiores distâncias a opção de alta precisão exige maior precisão dos dados, que pode ser obtida, por exemplo, com câmeras métricas ou a calibração da câmera.

A publicação da Agisoft PhotoScan User Manual (2014) afirma que para processamentos mais rápidos a opção *generic em pair preselection* na etapa de alinhamento das fotos deve ser escolhida. Realmente isto foi comprovado nos experimentos do prédio da ANTAQ, mas a quantidade de pontos da nuvem esparsa foi maior que a do modo *disable*, o que acarretou um tempo de processamento maior na etapa seguinte: etapa de construção da nuvem densa.

Na etapa de geração da nuvem de pontos densa no PhotoScan, a opção da qualidade máxima (*quality*) adotada em alguns modelos foi a de média (*medium*), em função da capacidade do *hardware* utilizado, ou seja, alto custo computacional. No prédio da ANTAQ, por exemplo, a câmera utilizada possuía uma resolução de 5.472 x 3.648 e, mesmo o computador possuindo 32 GB de memória RAM, não foi possível processar o modelo para a construção da nuvem densa a partir das 272 imagens, contrariando a publicação Agisoft PhotoScan User Manual (2014), para este *hardware*. A especificação da qualidade determinou posteriormente a quantidade de faces a serem geradas na etapa de geração da malha (*mesh*), apresentando-se em *face count: low, medium, high e custom*. Os valores para o número de faces são especificados pelo programa e em função da quantidade de números de pontos da nuvem, e quanto maior o número de faces maior o refinamento da malha gerada, o que permitiu aumentar a quantidade de detalhes do modelo, como mudanças de planos, recortes na fachada, dentre outros. Este

aspecto também pôde ser observado no programa MeshLab, em que o aumento do número de faces da malha melhorou a qualidade do modelo gerado no programa.

Modelos de um mesmo experimento, realizados no PhotoScan, foram gerados alterando as opções quanto a quantidade de pontos da nuvem densa e de faces da malha entre *high*, *médium* e *low*. Após a aplicação da textura sobre os respectivos modelos, não foram observadas muitas diferenças visuais nas texturas, casos verificados no corpo de provas, Biblioteca Central e prédio a ANTAQ. Ficou notório também que quanto mais alto os parâmetros adotados para processamento, maior o custo computacional, ou seja, tempo para processamento.

Para a aplicação da textura nos modelos de superfície (em malhas TIN) no PhotoScan, a opção *generic* no campo *mapping mode* é a indicada nos manuais do PhotoScan para edificações, mas para o Museu Nacional Honestino Guimarães foi utilizada a opção *spherical* e *ortofoto*, além da *generic*, devido a peculiaridade de sua forma e como método de averiguação da qualidade. Notou-se somente uma pequena variabilidade do contraste, quase que imperceptível. As texturas do prédio da Câmara dos Deputados foram geradas com os modos *generic* e *adaptive orthophoto*, e não foram percebidas diferenças visuais nos modelos.

Constatou-se que uma das limitações dos programas de fotogrametria digital para obtenção exclusiva por nuvem de pontos são as superfícies envidraçadas, pois estas não possuem uma textura constante, devido ao reflexo, dificultando a etapa de identificação de pontos homólogos. As superfícies em vidro foram sempre limitadoras da qualidade dos modelos. A superfície da cúpula do Museu Nacional Honestino Guimarães possui acabamento em pintura na cor branca, com baixa textura, aspecto desfavorável para a geração dos modelos de superfície nos programas de fotogrametria digital, além do seu formato peculiar. Porém, o PhotoScan, principalmente, gerou um modelo fiel à sua forma, confirmando ser um excelente programa para modelagem geométrica de edificações.

Alguns edifícios, em que os modelos geométricos com aplicação de textura foram obtidos, não foram submetidos à etapa de geração de mapa de danos porque a distância à qual foram fotografados e a câmera usada (em função da resolução) não proporcionaram imagens em que a visualização dos danos fosse perceptível e nítida para a garantia de resultados pertinentes, sendo utilizados apenas para avaliação dos programas quanto à obtenção de modelos por nuvens de pontos.

Os resultados obtidos por DSM foram muito satisfatórios pela qualidade alcançada nos modelos, demonstrando a sua aplicabilidade para a geração de ortoimagens, ou seja, a projeção ortográfica da forma efetiva das fachadas. Estas ortoimagens foram utilizadas para geração do mapa de danos cujos resultados e discussão são apresentados no capítulo seguinte.

6 EXPERIMENTOS DA GERAÇÃO DE MAPAS DE DANOS POR PDI

Neste capítulo, são apresentadas as técnicas empregadas para a geração de mapas de danos por PDI (Processamento Digital de Imagens), objetivando classificar as manifestações patológicas por reconhecimento automático de padrões. Foram utilizados dois programas como ferramenta para a geração dos mapas de danos: o programa Tyche (2015) na linguagem computacional MATLAB para a classificação de formação de mancha, eflorescência, destacamento de revestimento cerâmico e alteração cromática; e o programa Detecta Fissura (2016) na linguagem de computação C# (C Sharp), para a detecção de fissuras, em imagens não retificadas e ortoimagens.

Inicialmente, a aplicação dos programas foi feita em imagens não retificadas, com o intuito de avaliar os programas e obter algumas considerações. A utilização dos programas em imagens não retificadas mostrou-se também importante, pois de forma rápida notou-se que se podem gerar resultados práticos, embora não sejam adequadas para quantificação das manifestações patológicas encontradas. Entretanto, deve-se ter conhecimento que a fotografia não é uma representação ortográfica de uma fachada, diferentemente de uma ortoimagem que irá representar ortogonalmente um plano de projeção da fachada, aproximando-se das dimensões reais e corrigindo o efeito perspectivo de uma fotografia. Posteriormente, os programas foram aplicados em ortoimagens dos modelos gerados pelo programa PhotoScan, principal foco deste trabalho.

Para representar qualitativamente os resultados encontrados, foram adotadas três classificações: resultado muito satisfatório (MS), em que todo o dano foi classificado; resultado satisfatório (RS), quando quase todo o dano foi classificado; e não satisfatório (NS), em que nenhum dano, outras regiões não associadas ao dano ou toda a fachada foi classificada.

A aplicação das técnicas de processamento digital de imagens teve como principal finalidade tornar rápida e versátil a criação de mapas de danos, uma vez que a geração destes pode-se tornar uma tarefa dispendiosa, fundamentalmente tratando-se do tempo gasto na sua execução.

6.1 MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO DO TYCHE

Neste subitem, serão descritos os métodos que envolvem o processo de classificação do programa TYCHE (2015), desenvolvido por Francisco Evangelista Junior, PhD., professor do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB). Dentre estes métodos: seleção da amostra, análise estatística da amostra, segmentação a partir da análise estatística e classificação a partir da etapa de segmentação.

6.1.1 Seleção da amostra

Para a classificação dos danos presentes em uma fachada, a seleção da amostra era realizada em um padrão reconhecido como área de interesse pelo usuário do programa. A seleção da amostra do padrão de dano a ser classificado era realizada de maneira empírica, ou seja, baseada na experiência do que se considerou como dano para cada fachada.

Para uma fachada com a formação de manchas escuras, como exemplo dessa etapa, o padrão a ser classificado era selecionado por meio da abertura de uma janela criada pelo usuário sobre uma região da imagem ou ortomagem que se reconhecia como o dano, como ilustrado na Figura 180. Assim, o padrão era selecionado e o dano classificado e quantificado em percentagem.

Figura 180 - (a) Fotografia de uma fachada em concreto aparente com formação de manchas escuras e a caixa de seleção; (b) Ampliação da seleção da amostra realizada no Tyche (2015)



(a)

Fonte: Próprio autor.



(b)

6.1.2 Análise estatística da amostra por distribuição normal univariada e bivariada

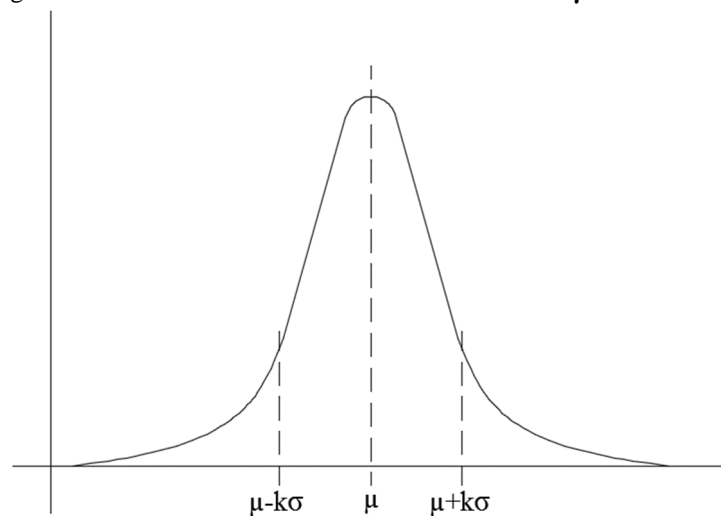
A distribuição normal ou gaussiana é importante devido a muitos aspectos, citando-se o teorema de limite central, baseado em que toda soma de variáveis aleatórias independentes de média finita e variância limitada é aproximadamente normal, desde que o número de termos da soma seja suficientemente grande.

A função densidade de probabilidade da distribuição normal univariada, com média μ e variância σ^2 , é definida pela Equação (17):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} \quad (17)$$

Em que $-\infty < x < \infty$, $\mu \in (-\infty, \infty)$ e $\sigma > 0$, com sua forma genérica apresentada na Figura 181.

Figura 181 – Densidade normal univariada com média μ e variância σ^2



Fonte: Próprio autor.

A distribuição normal univariada nesta pesquisa foi utilizada como parâmetro estatístico para segmentação nos espaços de cores escalas de cinza, H, S e V, já que não são espaços tridimensionais.

A exponencial da função de densidade normal univariada mede a distância quadrada entre x e μ em unidade de desvio padrão e é dada pela Equação (18).

$$\frac{(x - \mu)^2}{\sigma^2} = (x - \mu)(\sigma^2)^{-1}(x - \mu) \quad (18)$$

Esta distância pode ser generalizada para o caso bivariado, com um vetor x de observações (px1), dada pela Equação (19).

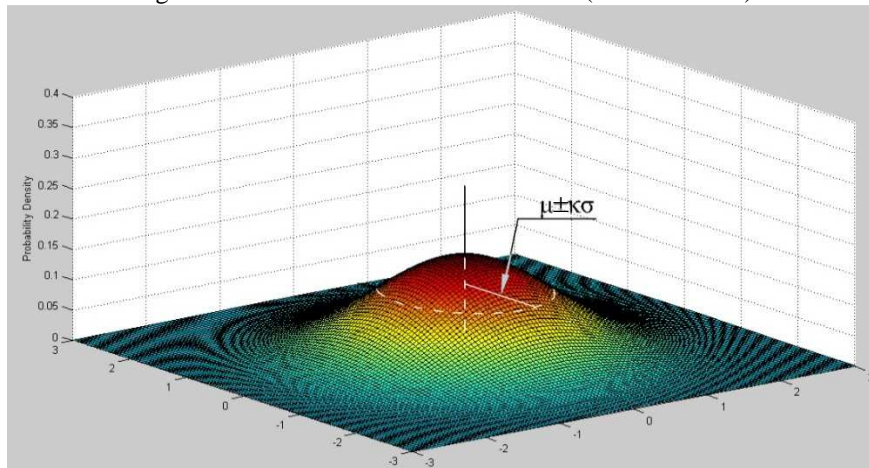
$$(x - \mu)'(\Sigma)^{-1}(x - \mu) \quad (19)$$

Para esta expressão, o vetor μ ($p \times 1$) representa o valor esperado do vetor x e a matriz Σ ($p \times p$) representa a sua covariância. Desta maneira, a Equação (3) representa a distância generalizada de x para μ . Ao substituir a expressão da Equação (19) na função densidade da Equação (17), deve-se trocar a constante univariada de normalização $\sqrt{2\pi\sigma^2}$ para que o volume sob a superfície da função densidade bivariada obtida iguale-se a qualquer p . A função densidade é dada pela Equação (20).

$$f(\mathbf{X}) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2}|\Sigma|^{1/2}} e^{-(1/2)(\mathbf{X}-\mu)'(\Sigma)^{-1}(\mathbf{X}-\mu)} \quad (20)$$

A Figura 182 apresenta a distribuição normal bivariada, ou seja, a distribuição para mais de duas variáveis, como para o caso do espaço de cor RGB, por este ser tridimensional.

Figura 182 – Densidade normal bivariada (duas variáveis)



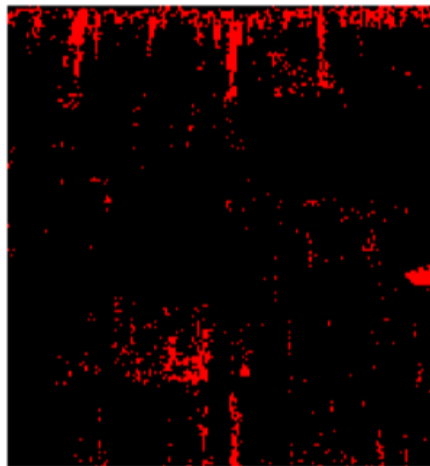
Fonte: Próprio autor.

Assim, quanto maior o valor de k especificado, mais abrangente seria a segmentação dos padrões em função do desvio padrão da amostra selecionada.

6.1.3 Segmentação a partir da análise estatística

Para criar a subdivisão da imagem em regiões distintas pelo critério de uniformidade, a segmentação foi realizada a partir da análise estatística. O valor de k definiu a abrangência desta segmentação. Quanto maior o valor de k , maior foi a quantidade de píxeis segmentados, e a depender de outros parâmetros, como área mínima e máxima, maior também foi a região classificada. Estas operações foram realizadas nos espaços de cores R, G, B, escalas de cinza, H, S e V, em que a segmentação foi feita por meio da análise estatística e do valor de k . Ressalta-se que a análise dos píxeis foi realizada separadamente em R, G e B, mas a segmentação, assim como a classificação, foi feita sobre a imagem RGB (*truecolor*). A Figura 183 apresenta uma imagem após a etapa de segmentação, em que a cor vermelha é o padrão segmentado, com base em valores de k , seleção da amostra, espaço de cor e análise estatística.

Figura 183 – Imagem segmentada de uma fachada com formação de manchas



Fonte: Próprio autor.

6.1.4 Classificação a partir da etapa de segmentação

A etapa de classificação teve a finalidade de realizar de forma automática a identificação de objetos que foram segmentados, classificando pelo detector de bordas Canny.

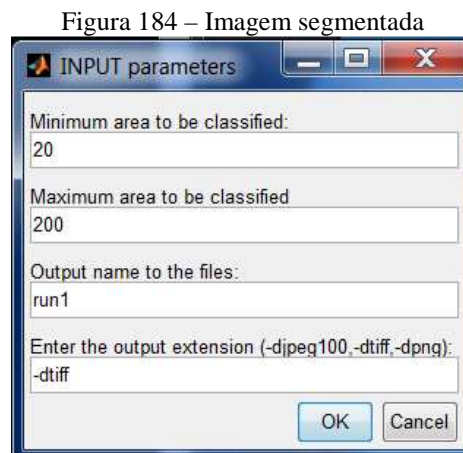
Classificação pelo valor de k

O valor de k permitiu, inicialmente, a extração ou identificação dos padrões na etapa da segmentação. A classificação foi realizada com base em toda região segmentada, não

considerando as áreas mínimas e máximas. Assim, quanto maior o valor de k , maior foi a classificação dos píxeis, quando não considerada a última sentença.

Classificação do padrão por área

Em uma das etapas da entrada de informação no Tyche (2015), a área mínima e máxima pôde ser especificada para que, após a etapa de segmentação, somente fossem classificadas as regiões de interesse. Apesar disso, na imagem gerada para segmentação também foi possível visualizar a subdivisão do padrão identificado. A Figura 184 apresenta a janela de entrada de dados de área mínima (*Minimum área to be classified*) e área máxima (*Maximum área to be classified*) para a classificação dos padrões. As outras opções foram o nome do arquivo e a sua extensão.



Fonte: Próprio autor.

Classificação do padrão por espaço de cor

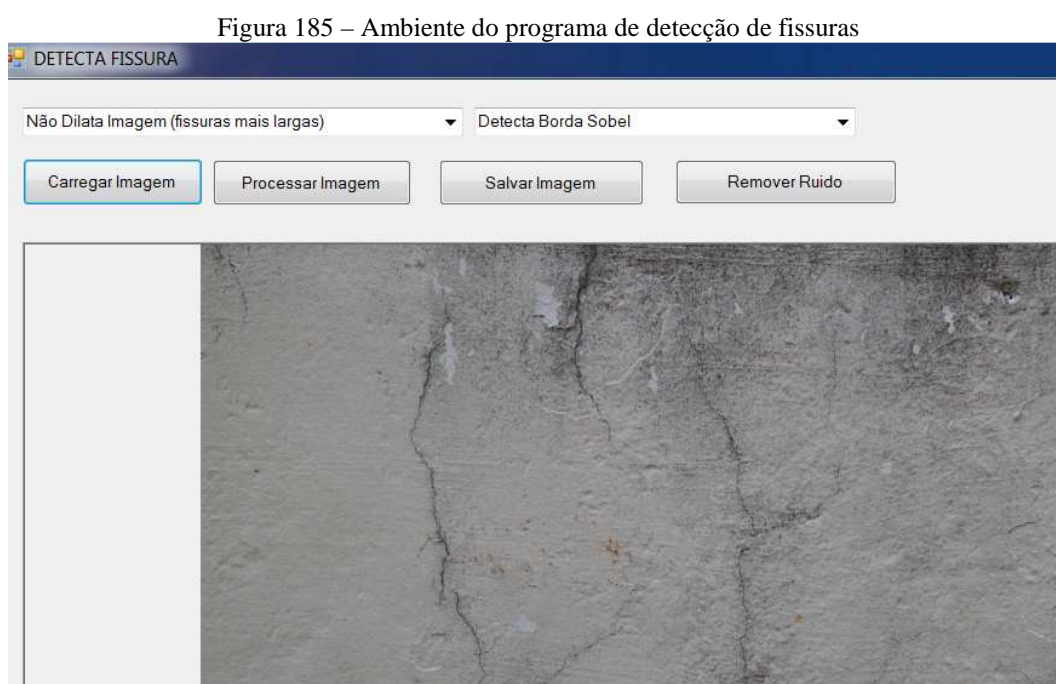
A classificação foi feita sobre cada espaço de cor gerado, levando-se em consideração a segmentação nos respectivos espaços. Para cada espaço de cor, com base nos dados estatísticos, assim como também em valores de k e área mínima e máxima (quando pertinentes), foi realizada a classificação.

6.1.5 Extração de atributos

Nesta etapa, foram quantificados os percentuais de classificação dos padrões em relação à área da imagem ou ortoimagem.

6.2 MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO DO DETECTA FISSURA

O programa Detecta Fissura (2016) foi desenvolvido pelo professor Lenildo Santos da Silva, Dr., da Universidade de Brasília (UnB) e realiza a classificação das fissuras por dois operadores principais: Sobel e Canny, que foram usados com o objetivo de realizar testes para análises experimentais em imagens e ortoimagens. A imagem da Figura 185 apresenta o ambiente do programa para a detecção de fissuras.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados dos operadores foram avaliados separadamente, sem filtros de dilatação e com filtros de dilatação de imagens. Para o operador Canny, opções de limiar máximo e mínimo também puderam ser definidas, de acordo com as características das imagens. As etapas envolvidas no programa de detecção de fissuras são descritas nos subitens a seguir.

6.2.1 Dilatação de imagens

A função da dilatação foi realizar a conectividade de píxeis e caracterização da forma da fissura. Além da opção de não dilatação, o programa possui os elementos estruturantes de dilatação de imagens 5×5 e dilatação de imagens 7×7 .

A não aplicação da dilatação é aconselhada para imagens em que as fissuras são mais largas, bem definidas. O elemento estruturante de dilatação 5×5 é indicado para ser aplicado em fissuras médias e o elemento estruturante de dilatação 7×7 para fissuras finas.

A dilatação das imagens pôde ser aplicada tanto para o operador Sobel quanto para o operador Canny.

6.2.2 Limiarização para o operador Canny

A limiarização é um processo de segmentação baseado na diferença de níveis de cinza que compõe os objetos de uma imagem. Neste código, foi utilizado a limiarização por histerese, em que o usuário estabelece o limiar máximo e mínimo para a detecção de bordas, ou seja, nesta aplicação a detecção de fissuras.

Para as imagens com menor contraste entre as fissuras e a superfície da fachada, é indicado pelo programa usar limiar máximo entre 20% e 30% e limiar mínimo entre 10% e 15%, com σ igual a 0,5. Para imagens com maior contraste entre as fissuras e a superfície da fachada, é sugerido limiar máximo em 50% e limiar mínimo entre 10% e 15%, com σ entre 1 e 3. Outros valores de limiar máximo e limiar mínimo foram utilizados para testes.

6.2.3 Remoção de ruídos

Em alguns casos, o programa pode classificar partes da imagem que não correspondem às fissuras. Estas classificações são denominadas de ruídos e o programa possui a opção para exclusão destes por meio da seleção realizada interativamente pelo usuário.

6.2.4 Demais procedimentos realizados pelo programa

Os demais procedimentos realizados pelo programa foram: preenchimento de área, erosão de área e conectividade, descritos a seguir.

Preenchimento de área

Procedimento realizado para preencher os píxeis vazios por dentro da fissura e os píxeis desconectados por elemento estruturante 3×3 .

Erosão da imagem

Procedimento realizado para eliminar píxeis fora da borda da fissura, também por elemento estruturante 3×3 .

Conectividade

Este operador foi usado no programa para conectar todos os píxeis próximos pertencentes a uma fissura, de modo a formar uma única fissura, ou seja, fazer com que todos os píxeis contíguos constituam uma única fissura. A conectividade usada foi de oito píxeis, isto é, análise dos oito píxeis (*8-neighbor*) em torno do píxel analisado, em que se considera os píxeis no sentido horizontal, vertical e diagonal.

6.3 RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES EM IMAGENS DE FACHADAS

Neste subitem serão apresentadas as classificações realizadas em imagens de fachadas com problemas identificados, a saber: manchas escuras, eflorescências, destacamento cerâmico e alteração cromática. Foram obtidos resultados nos espaços de cores RGB, escalas de cinza e também HSV.

6.3.1 Manchas escuras

O primeiro resultado do Tyche (2015) apresentado é para a formação de manchas escuras num elemento de vedação vertical próximo ao topo da fachada, com acabamento em concreto aparente. Estas formações crescem próximas a superfícies horizontais por escorrimento preferencial de umidade e estão associadas ao depósito de partículas de poluição e crescimento de microrganismos. A imagem possui uma resolução de 2.584×2.768 píxeis, totalizando 7.152.512 píxeis, como ilustrado na Figura 186.

Figura 186– Elemento de vedação de fachada com a presença de manchas e a seleção da amostra



Fonte: Próprio autor

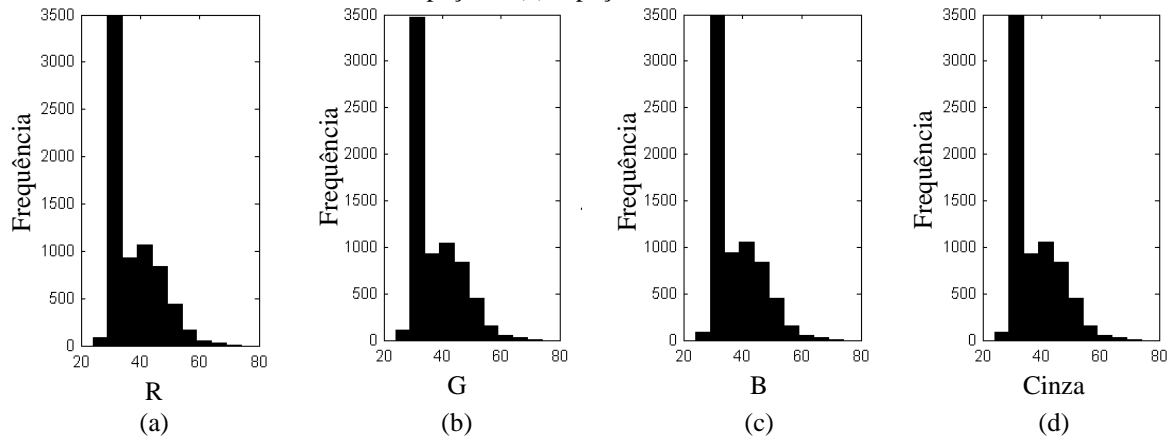
A caixa de seleção foi feita a partir do píxel 1.329 no eixo x e do píxel 145 no eixo y, com uma caixa de 72 x 96 píxeis. A percepção do usuário do padrão que se desejou classificar, uma tarefa empírica, definiu a área da seleção, a qual poderia ser maior ou menor e também situada em outro espaço da imagem com padrões de danos semelhantes.

Análise da classificação por espaços de cores

A amostra, no espaço de cores RGB, passou por transformação de cores para o espaço em escalas de cinza (*gray scale*), H, S e V, para, posteriormente, serem realizadas as classificações do padrão sobre todos os espaços de cores citados.

A Figura 187 apresenta as distribuições de frequências de píxeis na amostra selecionada, nos espaços R, G, B e escala de cinza. Percebe-se uma distribuição de frequência muito semelhante nos quatro espaços.

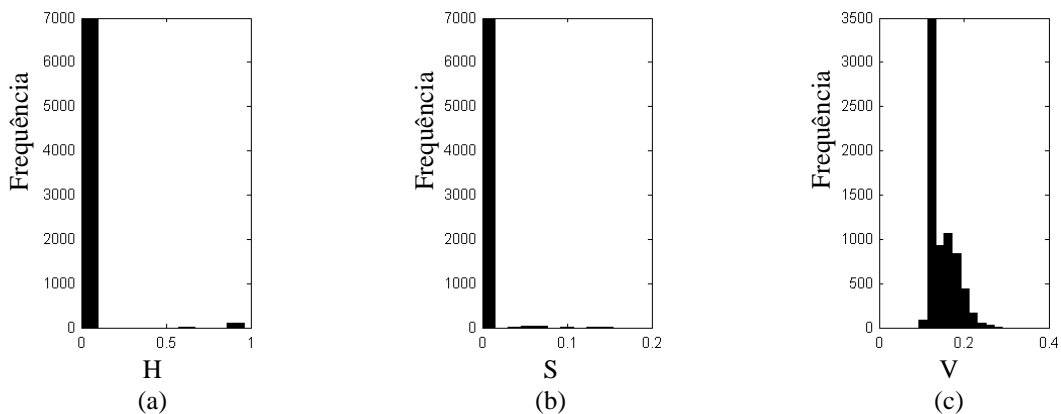
Figura 187 – Distribuições de frequência de píxeis para mancha escura: (a) espaço R; (b) espaço G; (c) espaço B; (d) espaço escalas de cinza



Fonte: próprio autor.

Na Figura 188, são apresentadas as frequências para os valores de píxeis nos espaços H, S e V. A distribuição de frequência de píxeis no espaço V é semelhante à dos espaços de cores citados anteriormente.

Figura 188 – Distribuições de frequência de píxeis para mancha escura: (a) espaço H; (b) espaço S; (c) espaço V



Fonte: próprio autor.

Os resultados da classificação nos espaços RGB, escalas de cinza, H, S, e V são apresentados no Quadro 41, para o valor de $k = 1$, em que as imagens da coluna central-direita representam a segmentação com base no valor de k e seu respectivo espaço de cor, e as imagens da direita representam somente o contorno dos padrões classificados no respectivo processo de segmentação. O resultado para a classificação no espaço H foi de 71,62% de píxeis, o que, visualmente, apresentando-se como não satisfatório (NS). Para o espaço S, o resultado da classificação de manchas foi de 5,44%, muito abaixo do valor do espaço H, mas que também apresentou uma classificação de não satisfatória (NS). Os resultados da classificação nos

espaços RGB, escalas de cinza e V foram: 1,24%, 1,60% e 1,27%, respectivamente. Estes valores foram próximos e a classificação foi considerada como satisfatória (RS), tendo também como explicação as distribuições de frequências semelhantes entre esses espaços de cores. Importante ressaltar que as linhas na cor ciano (Quadro 41) representam o contorno da região classificada e as regiões na cor vermelha representam o que está segmentado como mancha. Este tipo de representação será utilizado para as demais manifestações patológicas e casos tratados.

Análise da classificação por valores de k

No Quadro 42 são apresentados os resultados para os seguintes valores de k : 2, 3, 4 e 5 no espaço de cor RGB, valores escolhidos empiricamente, para a imagem com 2.584 x 2.768 píxeis. Verificou-se que à medida que os valores de k foram aumentados, os valores percentuais de classificação também aumentavam, em função da classificação de píxeis com valores distintos da seleção da amostra.

Os histogramas das distribuições de frequência de píxeis do espaço R, G e B apresentaram uma dispersão maior, isto é, um maior desvio padrão. Assim, os valores de k maiores – 3 e 4 – apresentaram as melhores classificações, uma vez que os dados analisados encontraram-se mais distantes da média.

Análise da classificação por resolução da imagem

Outras imagens da mesma fachada foram processadas no Tyche (2015) com variações da resolução, para avaliar as alterações dos valores percentuais em função do tamanho da imagem. A resolução da imagem original era de 2.584 x 2.768 píxeis, e as demais resoluções foram obtidas dividindo-se a resolução citada por 2, 3, 4 e 5, chegando-se às seguintes resoluções: 1.292 x 1.384, 826 x 923, 646 x 692 e 517 x 554 (píxeis por píxeis). A região da seleção foi a mesma para todas as resoluções e o valor de $k = 3$. Os resultados podem ser vistos na Figura 189.


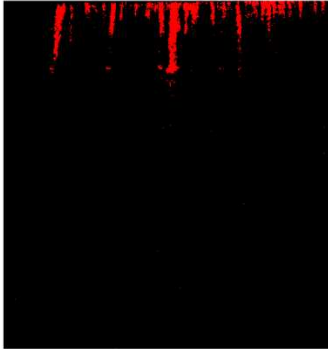







Quadro 41 – Fachada com manchas escuras: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação

Espaço de cores	Percentual da classificação (%)	Segmentação	Classificação	Qualif.
RGB	1,24			RS
Escalas de cinza	1,60			RS
H	71,62			NS
S	5,44			NS
V	1,27			RS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: Próprio autor.

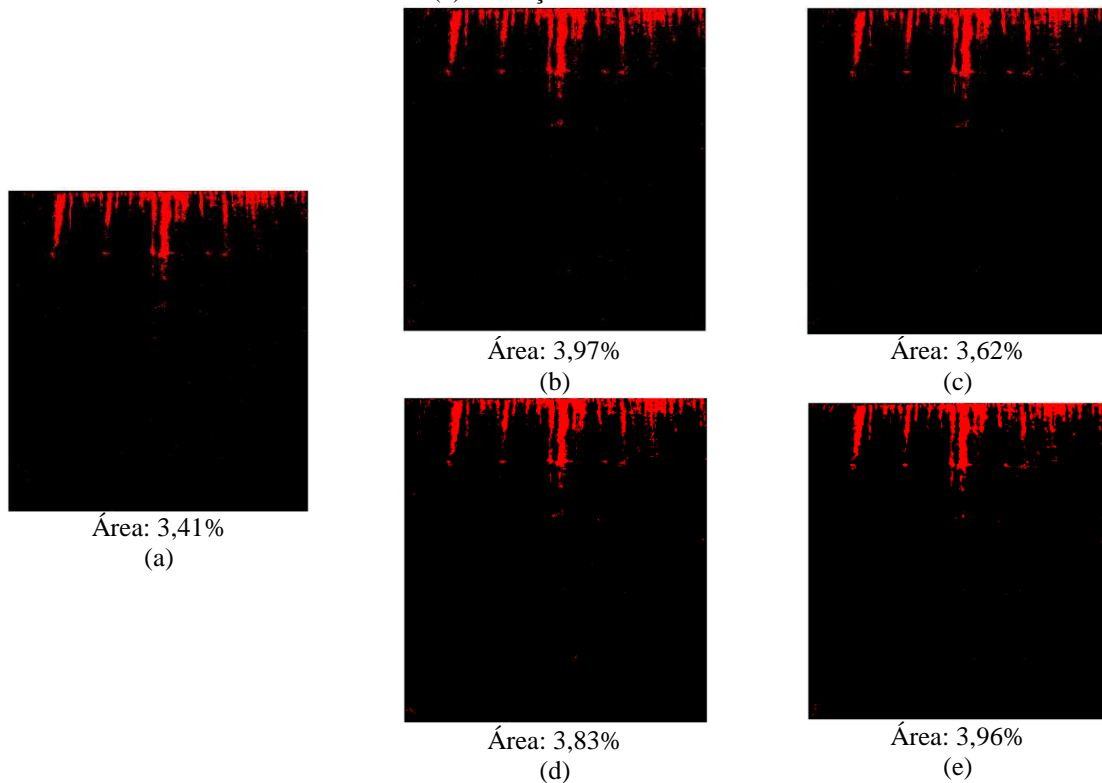
Quadro 42 - Classificação de manchas em escuras em fachada de concreto aparente

Seleção da amostra	Píxeis identificados (cor vermelha)	Classificação (Porcentagem da área classificada)	Qualif.
	<p>k = 2</p> 	<p>2,36%</p> 	RS
	<p>k = 3</p> 	<p>3,41%</p> 	MS
	<p>k = 4</p> 	<p>4,96%</p> 	MS
	<p>k = 5</p> 	<p>8,52%</p> 	NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: Próprio autor.

Figura 189 – Segmentação das imagens com distintas resoluções da fachada com manchas escuras:
(a) resolução: 2584 x 2768; (b) resolução: 1292 x 1384; (c) resolução: 826 x 923; (d) resolução: 646 x 692.
(e) resolução: 517 x 554



Fonte: Próprio autor.

Os valores obtidos nestes resultados foram próximos, com uma diferença relativa entre o maior valor (3,97%) e o menor (3,41%) igual a 16%, e não tendo relação entre a diminuição da resolução e o aumento ou a diminuição do percentual de classificação.

6.3.2 Eflorescências

A formação de eflorescência foi outro tipo de dano submetido à classificação no programa Tyche (2015). A Figura 190 é parte de uma fachada com revestimento cerâmico na cor verde e a imagem utilizada possui uma resolução de 2.685 x 489 píxeis, totalizando 1.312.965 píxeis. A seleção foi feita a partir do píxel 2.062 no eixo x e do píxel 217 no eixo y, com uma caixa de 12 x 43 píxeis, sendo feita de maneira subjetiva.

Figura 190 – Fachada com revestimento cerâmico e manchas de eflorescência, e seleção da amostra



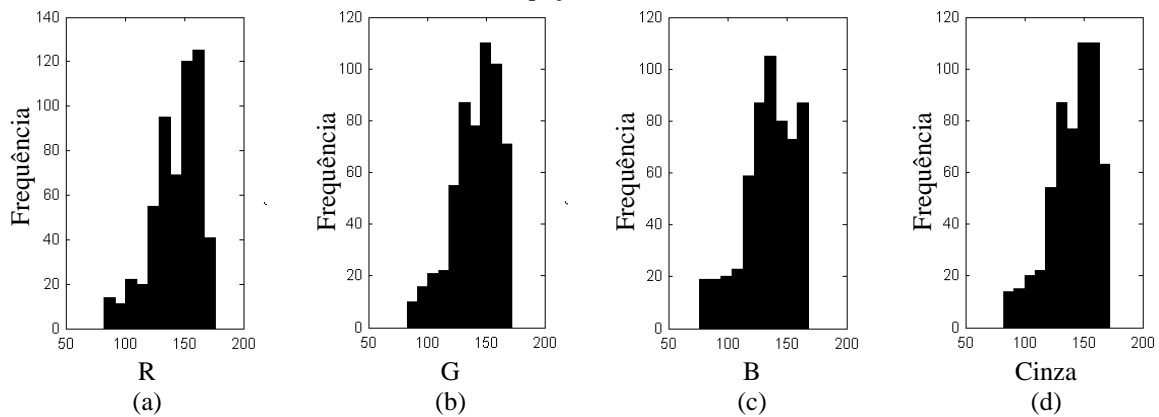
Fonte: Próprio autor.

A amostra, no espaço de cores RGB, também passou por transformação de cores para o espaço em escalas de cinza (*gray scale*), H, S e V, para, posteriormente, serem realizadas as classificações do padrão.

Análise da classificação por espaços de cores

A Figura 191 apresenta as distribuições de frequências de píxeis da amostra selecionada, nos espaços R, G, B e escala de cinza. As distribuições nos quatro espaços apresentaram semelhanças entre si e pelo dano possuir uma tonalidade esbranquiçada, diferentemente das manchas escuras do primeiro caso, a distribuição de frequência tende a valores próximos de 255 (valor do píxel na cor branca).

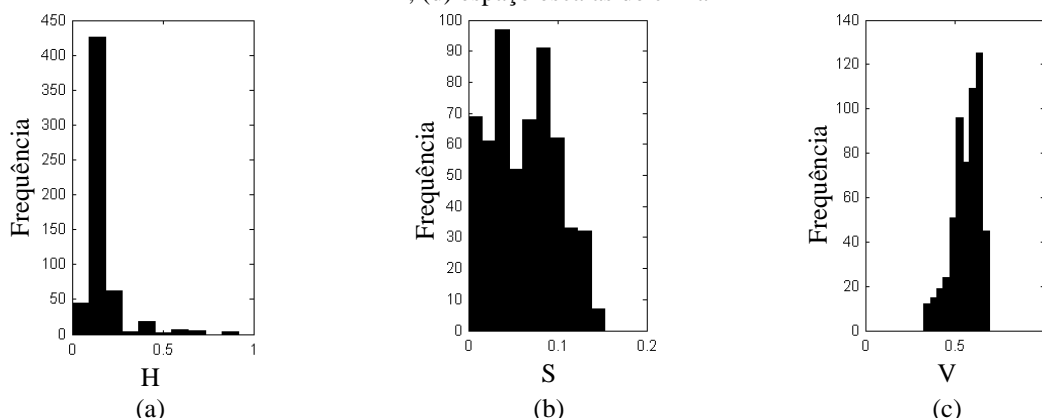
Figura 191 – Distribuições de frequência de píxeis para eflorescência: (a) espaço R; (b) espaço G; (c) espaço B; (d) espaço escalas de cinza



Fonte: próprio autor.

Na Figura 192, são apresentadas as distribuições de frequências para os valores de píxeis nos espaços H, S e V.

Figura 192 - Distribuições de frequência de píxeis para eflorescência: (a) espaço R; (b) espaço G; (c) espaço B; (d) espaço escalas de cinza



Fonte: próprio autor.

Os resultados da classificação nos espaços RGB, escalas de cinza, H, S e V estão presentes no Quadro 43, para o valor de $k = 1$. O espaço S foi o que apresentou resultado não satisfatório (NS), com um percentual de 10,76%. O espaço H apresentou um resultado não satisfatório (NS), com 3,10% de classificação, porém não classificou todas as manchas de eflorescência e classificou outras regiões sem eflorescência. O espaço V classificou 3,83%, e foi, visualmente, um resultado não satisfatório (NS) por ter classificado regiões sem eflorescência. A classificação pelo espaço RGB apresentou o percentual de 2,08% de manchas de eflorescência e o espaço de escalas de cinza o valor de 3,26% e, apesar da diferença entre esses valores, as duas classificações foram muito satisfatórias (MS).

Quadro 43 – Fachada com manchas de eflorescência: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação

Esp. de cores	Perc clas. (%)	Segmentação	Classificação	Qualif.
RGB	2,08			MS
Esc. de cinza	3,26			MS
H	3,10			NS
S	10,76			NS
V	3,83			NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.


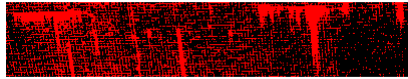



Fonte: Próprio autor.

Dentre os três espaços, H, S e V, novamente o espaço de cor V apresentou uma melhor classificação para este experimento, próxima das classificações de RGB e escalas de cinza. O espaço H, apesar do percentual maior que o espaço RGB da classificação, não classificou todas as manchas de eflorescência. A justificativa para estes fatores novamente seria a semelhança da distribuição de frequências dos píxeis entre os espaços R, G, B, escalas de cinza e V.

Análise da classificação por valores de k

O Quadro 44 apresenta os resultados das classificações para três valores de k : 3 e 5, com a mesma seleção da amostra, no espaço de cor RGB.

Quadro 44 - Classificação de eflorescência em fachada para valores de $k = 3$ e $k = 5$, espaço de cores RGB

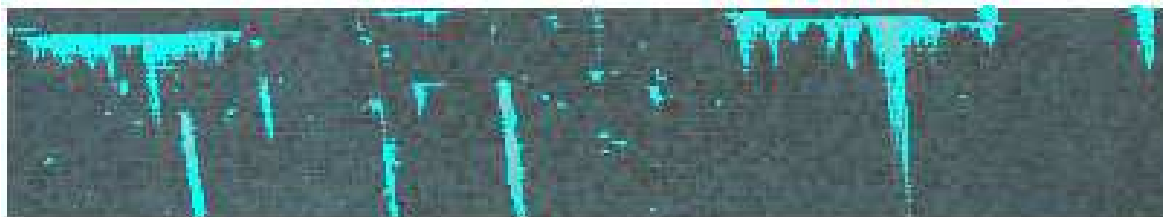
Seleção da amostra	Segmentação (cor vermelha)	Classificação (Percentagem da área classificada)	Qualif.
	k = 3 	33,15% 	MS
	k = 5 	100,00% 	NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.
Fonte: Próprio autor.

Diferentemente das análises realizadas com a classificação de manchas escuras, em que se aumentou os valores de k e os resultados não foram muito distintos, a classificação com os valores de $k = 3$ e $k = 5$ foram não satisfatórios (NS), onde para $k = 3$ o valor percentual foi de 33,15% de área classificada e para $k = 5$, 100% da imagem foi classificada.

A Figura 193 apresenta a imagem original (a) e a imagem após a classificação para o valor de $k = 1$, no espaço RGB.

Figura 193 – Classificação de eflorescência para o espaço RGB e $k = 1$

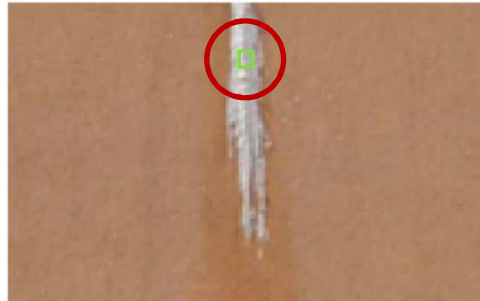


Fonte: Próprio autor.

Os histogramas das distribuições de frequência de píxeis do espaço R, G e B apresentaram uma menor dispersão, ou seja, um menor desvio padrão. Assim, o valor de $k = 1$ apresentou a melhor classificação, uma vez que os dados analisados encontraram-se mais próximos da média.

A imagem da Figura 194 também apresenta manchas de eflorescência em fachada com revestimento em pintura e passou pela etapa de classificação no Tyche (2015). A imagem utilizada possui uma resolução de 225 x 359 píxeis, totalizando 80.775 píxeis. A seleção foi feita a partir do píxel 171 no eixo x e do píxel 37 no eixo y, com uma caixa de seleção de 11 x 12 píxeis.

Figura 194 – Região da seleção da amostra

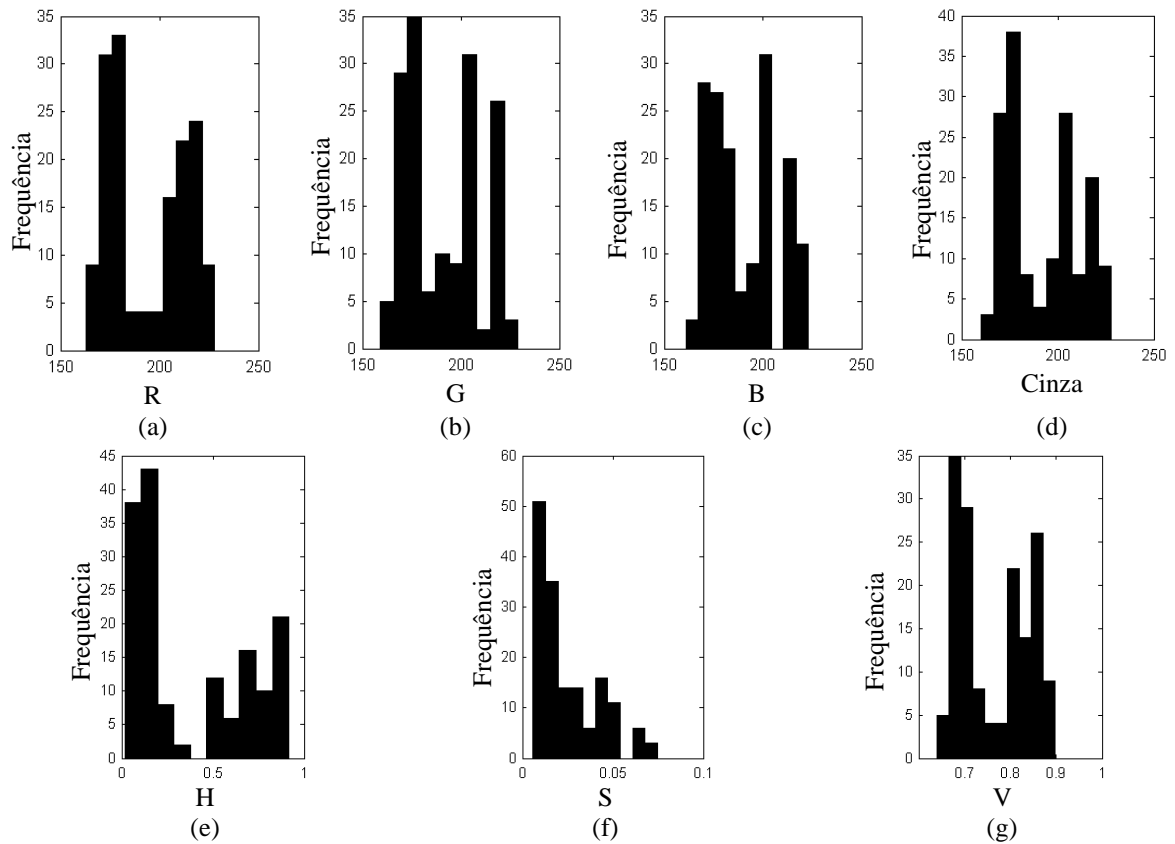


Fonte: Próprio autor.

Análise da classificação para o espaço de cor RGB e valores de k

A Figura 195 apresenta as distribuições de frequência para os espaços de cores R, G, B, escalas de cinza, H, S e V.

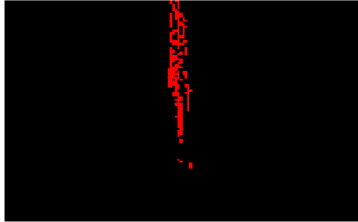

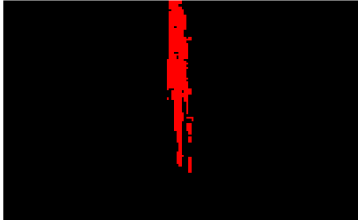


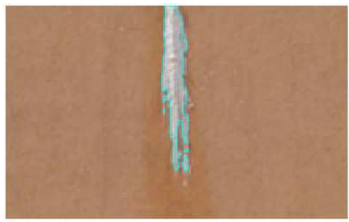
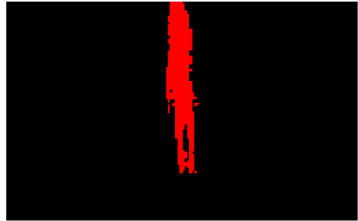

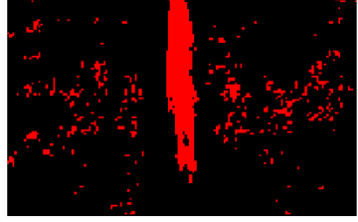
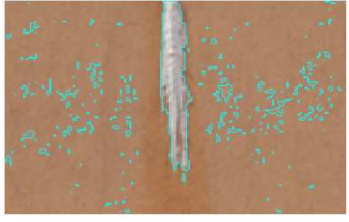
Figura 195 – Distribuições de frequência de píxeis para o segundo experimento de mancha de efluorescência: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V



Fonte: próprio autor.

Para o espaço de cores RGB, a classificação apresentou os melhores resultados para valores de $k = 3$ e $k = 4$, porque, para os valores de $k = 1$ e $k = 2$, parte da efluorescência não foi classificada e para o valor de $k = 5$ regiões sem a efluorescência foram classificadas, como pode ser visto no Quadro 45.

Quadro 45 - Classificação do segundo experimento com manchas de efluorescência no espaço RGB: valores de $k = 1, k = 2, k = 3, k = 4$ e $k = 5$

Valores de k	Percentual da classificação (%)	Segmentação	Classificação	Qualif.
1	1,50			RS
2	2,99			MS
3	3,73			MS
4	4,37			MS
5	9,06			NS

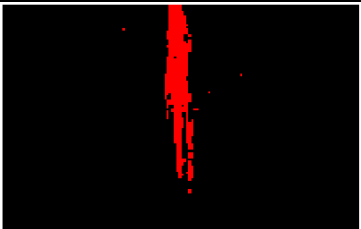

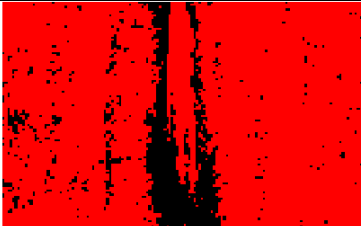
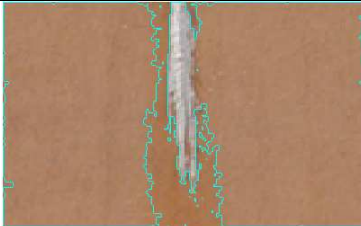
Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.
 Fonte: próprio autor.

Para este caso de efluorescência, os histogramas das distribuições de frequência de píxeis do espaço R, G e B apresentaram uma maior dispersão, maior desvio padrão. Assim, os valores de $k = 2, k = 3$ e $k = 4$ apresentaram as melhores classificações, porque os dados analisados encontraram-se mais distantes da média.

Análise da classificação para o espaço de cor escalas de cinza e valores de k

O espaço de cor escalas de cinza apresentou resultado satisfatório (RS) para o valor de $k = 1$, pois parte da eflorescência não foi classificada e resultado muito satisfatório (MS) para o valor de $k = 2$. Para os valores de $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$, os resultados das classificações foram não satisfatórios (NS). O Quadro 46 apresenta somente o resultado muito satisfatório (MS) para $k = 2$ e não satisfatório para $k = 3$.

Quadro 46 - Classificação do segundo experimento com manchas de eflorescência no espaço escalas de cinza: valores de $k = 2$ e $k = 3$

Valores de k	Segmentação	Classificação	Qualificação
2			MS
3			NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: próprio autor.

Análise da classificação para o espaço de cor H, S e V, e valores de k

Os resultados para os espaços H e V foram não satisfatórios (NS) para os valores de $k = 1$, $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$. Para o espaço de cor S, as classificações apresentaram resultados satisfatórios (RS) por não classificarem toda a mancha de eflorescência, para os valores de $k = 1$, $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$. O Quadro 47 apresenta alguns destes resultados.

Quadro 47 - Classificação do segundo experimento com manchas de efluorescência nos espaços H, S e V:
valores de $k = 1$ e $k = 5$

Valores de k	Espaço de cor	Segmentação	Classificação	Qualificação
1	H			NS
1	V			NS
5	S			RS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: próprio autor.

Para a mancha de efluorescência desta imagem, foi realizada em programa CAD a vetorização com a finalidade de aferir os valores obtidos pelo programa Tyche (2015). O valor encontrado na vetorização foi de aproximadamente 5%, enquanto que o resultado para o espaço RGB e $k = 4$ foi de 4,37%.

6.3.3 Destacamento de revestimento cerâmico

Uma das manifestações patológicas mais preocupantes pelo potencial de perigo que pode ocasionar aos transeuntes, o destacamento de revestimento cerâmico, a partir de uma imagem, foi submetida à classificação no programa Tyche (2015). A imagem utilizada neste experimento é uma fachada com revestimento cerâmico em duas tonalidades da cor azul, como ilustrado na Figura 196. A imagem possui uma resolução de 2.168 x 1.792 píxeis, totalizando 3.885.056 píxeis. A seleção foi feita a partir do píxel 170 no eixo x e do píxel 851 no eixo y, com uma caixa de 296 x 243 píxeis, como pode ser visto no Quadro 49.

Figura 196 – Região da seleção da amostra

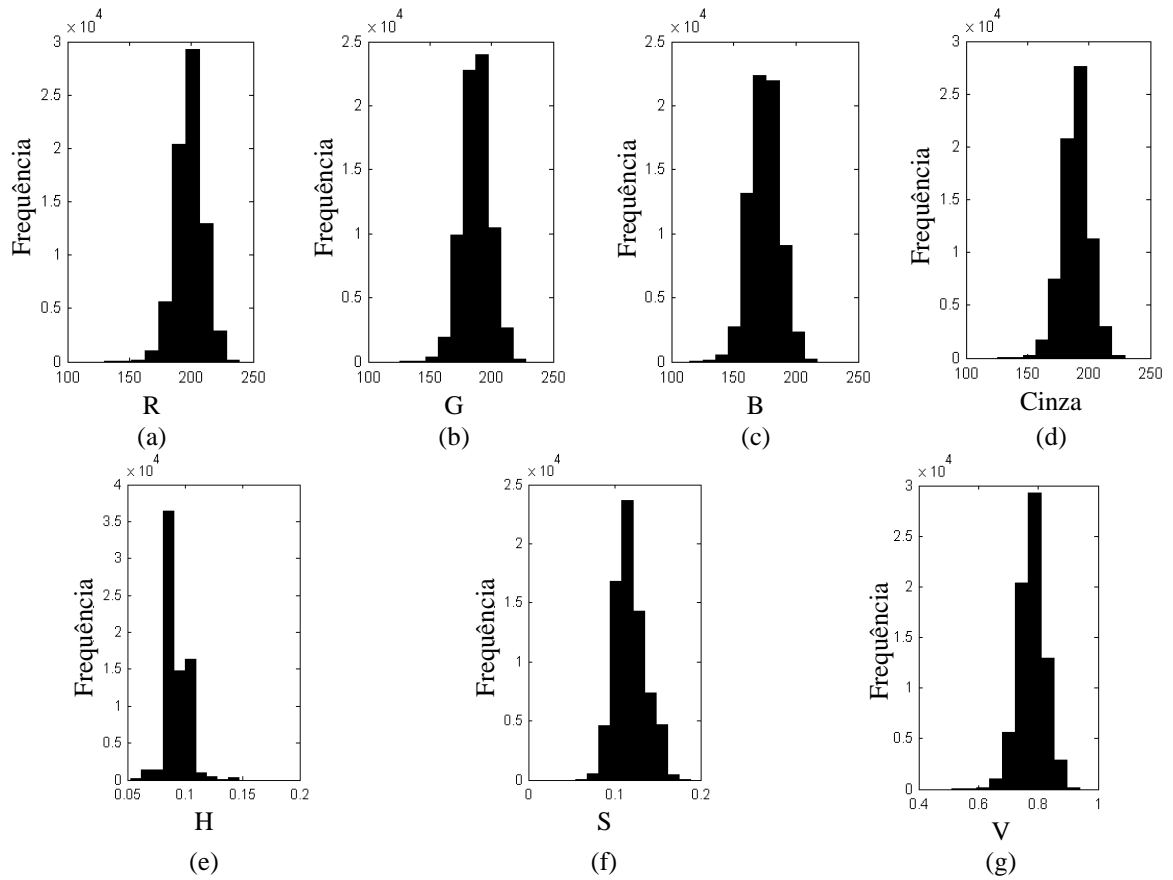


Fonte: Próprio autor.

Análise da classificação por espaços de cores

A Figura 197 contém as distribuições de frequência de píxeis da amostra selecionada, nos espaços R, G, B, escala de cinza, H, S e V.

Figura 197 – Distribuições de frequência de píxeis para destacamento de revestimento cerâmico: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V



Fonte: próprio autor.

No Quadro 48, são apresentados os resultados da segmentação e da classificação dos respectivos espaços de cores da fachada com destacamento de revestimento, assim como o percentual classificado. Os resultados são da classificação para valor de $k = 1$.

Quadro 48 - Fachada com destacamento de revestimento cerâmico: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação

Espaço de cores	Percentual da classificação (%)	Segmentação	Classificação	Qualif.
RGB	3,80			RS
Escalas de cinza	5,99			NS
H	27,24			NS
S	4,92			NS
V	6,17			NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.



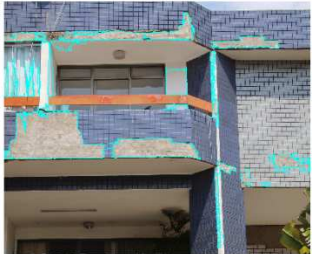
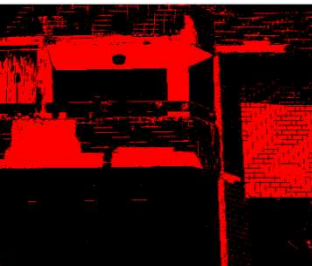

Fonte: Próprio autor.

O espaço de cor RGB apresentou resultado satisfatório (RS), com valor de 3,8% de área classificada, pois nos demais espaços também foram classificadas partes da fachada com cerâmica com a tonalidade azul clara. No entanto, partes da fachada com destacamento cerâmico não foram classificadas mesmo no espaço de cores RGB. Essa última observação é justificada pelo fato de que a seleção da amostra foi realizada sobre uma parte da fachada em reboco e existem partes da fachada que, além do destacamento, possuem manchas formadas sobre essas regiões.

Análise da classificação por valores de k

O Quadro 49 apresenta resultados realizados no espaço de cores RGB para o valor de $k = 3$ e $k = 5$. Para estes valores de k , obtiveram-se resultados não satisfatórios (NS).

Quadro 49 – Classificação de destacamento de revestimento cerâmico para valores de $k = 1$, $k = 3$ e $k = 5$

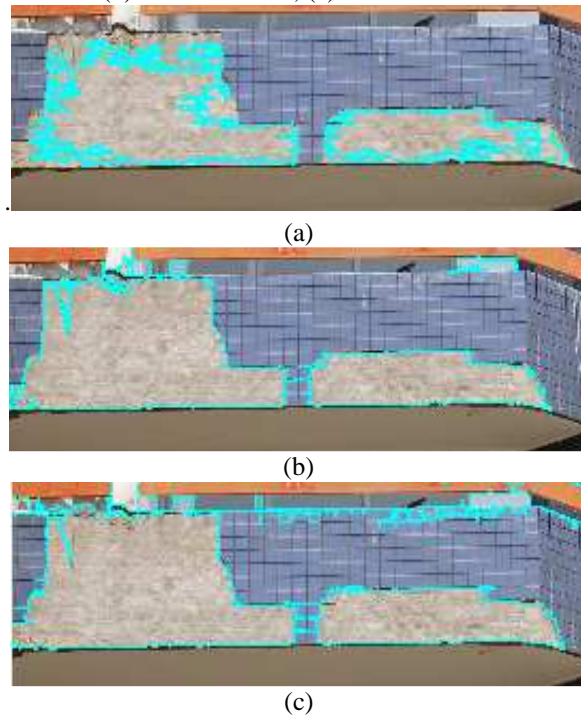
Seleção da amostra	Segmentação (cor vermelha)	Classificação (Porcentagem da área classificada)	Qualif.
	k = 3 	11,56% 	NS
	k = 5 	23,72% 	NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.
Fonte: Próprio autor.

O aumento do valor de k resultou consequentemente na classificação de regiões da fachada que, por semelhança de padrões de píxeis, foram segmentadas e classificadas, mas que não pertencem ao padrão da amostra. Isso ocorreu porque os maiores valores de k aumentam as chances de píxeis com valores próximos da amostra de seleção também serem classificados. No entanto, o maior valor de k também proporcionou uma melhor classificação de regiões com

destacamento com padrões bem definidos, ou melhor, com padrões das regiões de entorno do dano que eram distintos, como pode ser observado na Figura 198. Porém, nesta figura também se observa que quanto maior o valor de k , maior a classificação de áreas distinta da seleção da amostra.

Figura 198 – Classificação de destacamento de revestimento cerâmico em parte da imagem. (a) Valor de $k = 1$; (b) Valor de $k = 3$; (c) Valor de $k = 5$



Fonte: Próprio autor.

Os histogramas das distribuições de frequência de píxeis do espaço R, G e B apresentaram uma menor dispersão para o destacamento do revestimento cerâmico, ou seja, um menor desvio padrão. Assim, o valor de $k = 1$ apresentou a melhor classificação, não classificando partes da fachada com cores semelhantes a este dano.

A imagem tratada neste subitem possui padrões de cores que visualmente se assemelham entre si, e que influenciaram diretamente sobre a classificação a partir da específica seleção da amostra. O destacamento de revestimento cerâmico muitas vezes não se apresenta somente com um padrão bem definido, pois pode haver sobre o reboco manchas que influenciarão diretamente sobre a classificação, já que este teria outro padrão de cor diferente do especificado na seleção da amostra.

6.3.4 Alteração cromática

Manchas formadas devido à perda de cor ou brilho do acabamento, a classificação da degradação por alteração cromática também foi realizada no programa Tyche (2015). A imagem utilizada neste experimento é de parte de uma fachada com acabamento em textura na cor laranja, com alteração cromática devido à presença de umidade e possui uma resolução de 1.679 x 749 pixels, totalizando 1.257.571 pixels. A seleção foi feita a partir do pixel 489 no eixo x e do pixel 341 no eixo y, com uma caixa de 64 x 78 pixels, como ilustrado na Figura 199.

Figura 199 – Fachada com revestimento em textura e alteração cromática, e seleção da amostra

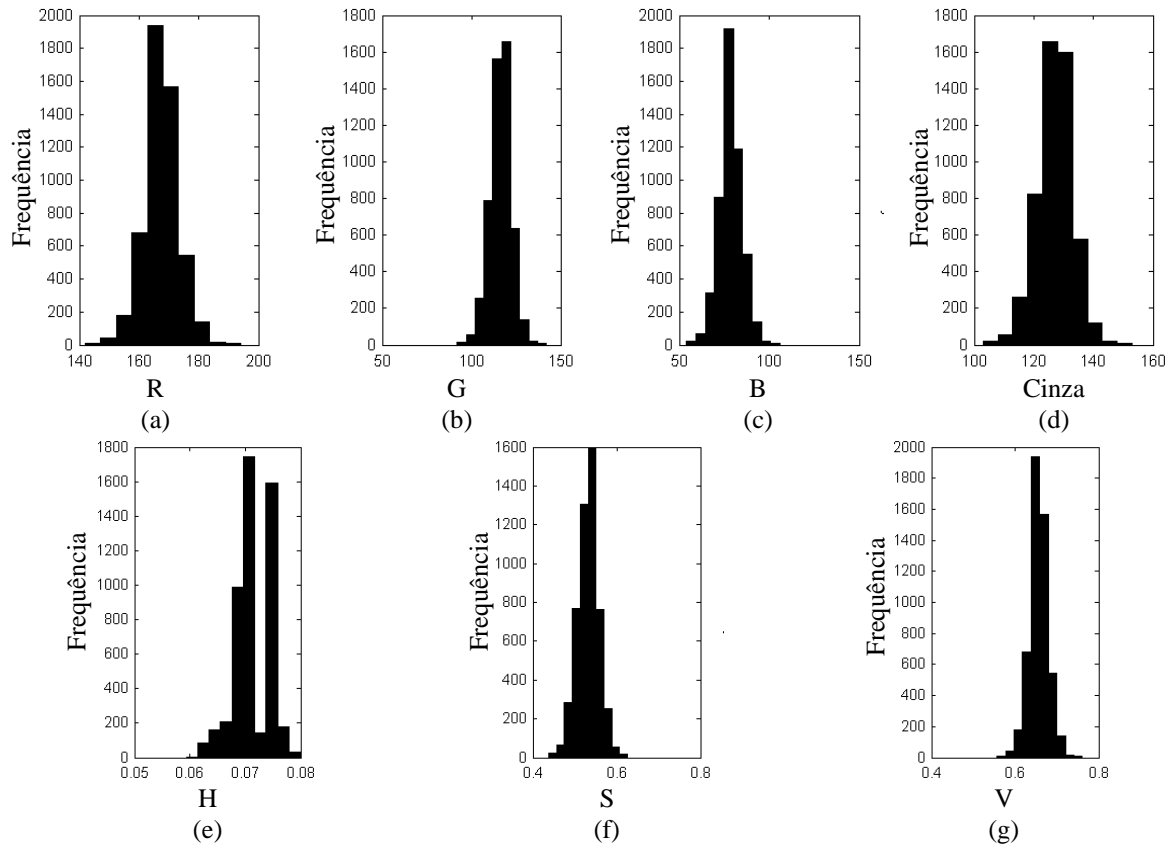


Fonte: Próprio autor.

Análise da classificação por espaços de cores

A Figura 200 apresenta as distribuições de frequências de pixels da amostra selecionada, nos espaços R, G, B, escala de cinza, H, S e V.

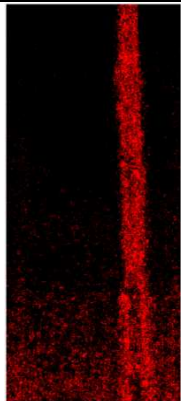
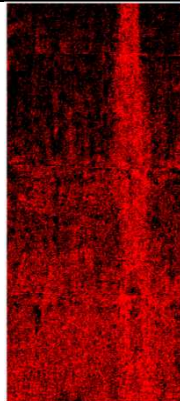
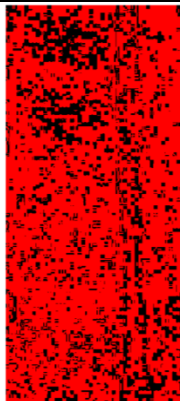
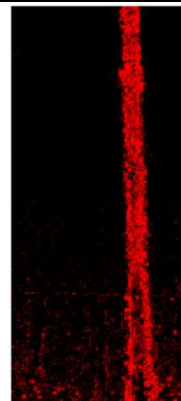
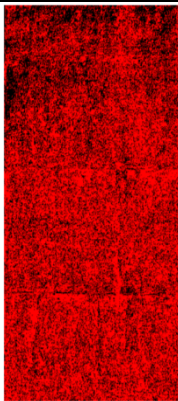
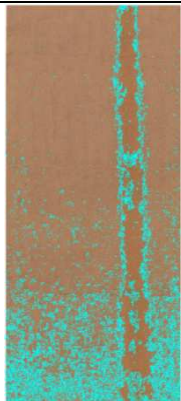
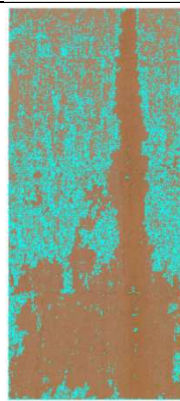

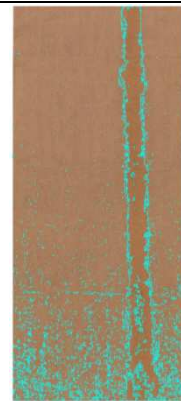

Figura 200 – Distribuições de frequência de píxeis para alteração cromática: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V



Fonte: próprio autor.

O Quadro 50 apresenta os resultados da segmentação e da classificação dos respectivos espaços de cores, assim como o percentual classificado. Os melhores resultados foram observados no espaço de cores RGB e S, para valor de $k = 1$.

Quadro 50 – Alteração cromática: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação

Espaço de cores	RGB	Escalas de cinza	H	S	V
Percentual da classificação (%)	12,94	41,94	76,25	10,66	67,09
Segmentação					
Classificação					
Qualificação	NS	NS	NS	NS	NS

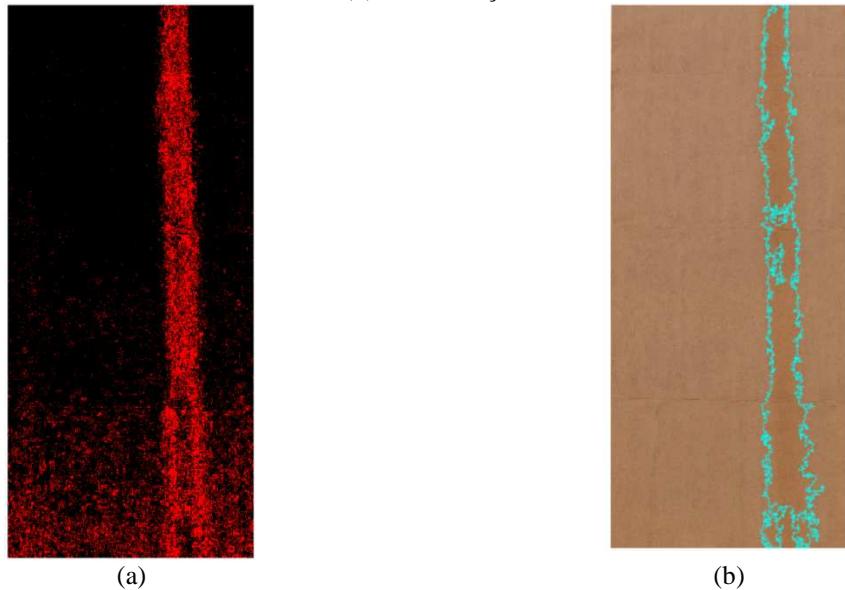
Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: Próprio autor.

Análise da classificação por área

O valor da área mínima para classificação realizada no experimento anterior foi de 1 píxel, o que resultou na segmentação e classificação de pequenos pontos detectados, como ilustrado no espaço de cor escalas de cinza do Quadro 50. Especificando valores de áreas maiores, o programa Tyche (2015) passa a não classificar as áreas menores, mesmo estando identificados na segmentação. Dessa forma, foi especificado, no experimento seguinte, uma área mínima igual a 1.000 píxeis para classificação e também valor de $k = 1$. A segmentação apresentou a mesma identificação de alteração cromática, no entanto para o resultado da classificação as áreas de píxeis inferiores a 1.000 píxeis não foram classificadas. O resultado foi muito satisfatório (MS) e a área classificada de alteração cromática foi 7,35%.

Figura 201 – Classificação da alteração cromática para áreas maiores que 1.000 píxeis: (a) Segmentação; (b) Classificação



Fonte: Próprio autor.

Além da variação dos valores de k para se chegar aos resultados esperados, a especificação de valores de área para a classificação do padrão de interesse é outro recurso disponível no Tyche (2015) e que permite auxiliar na etapa de classificação.

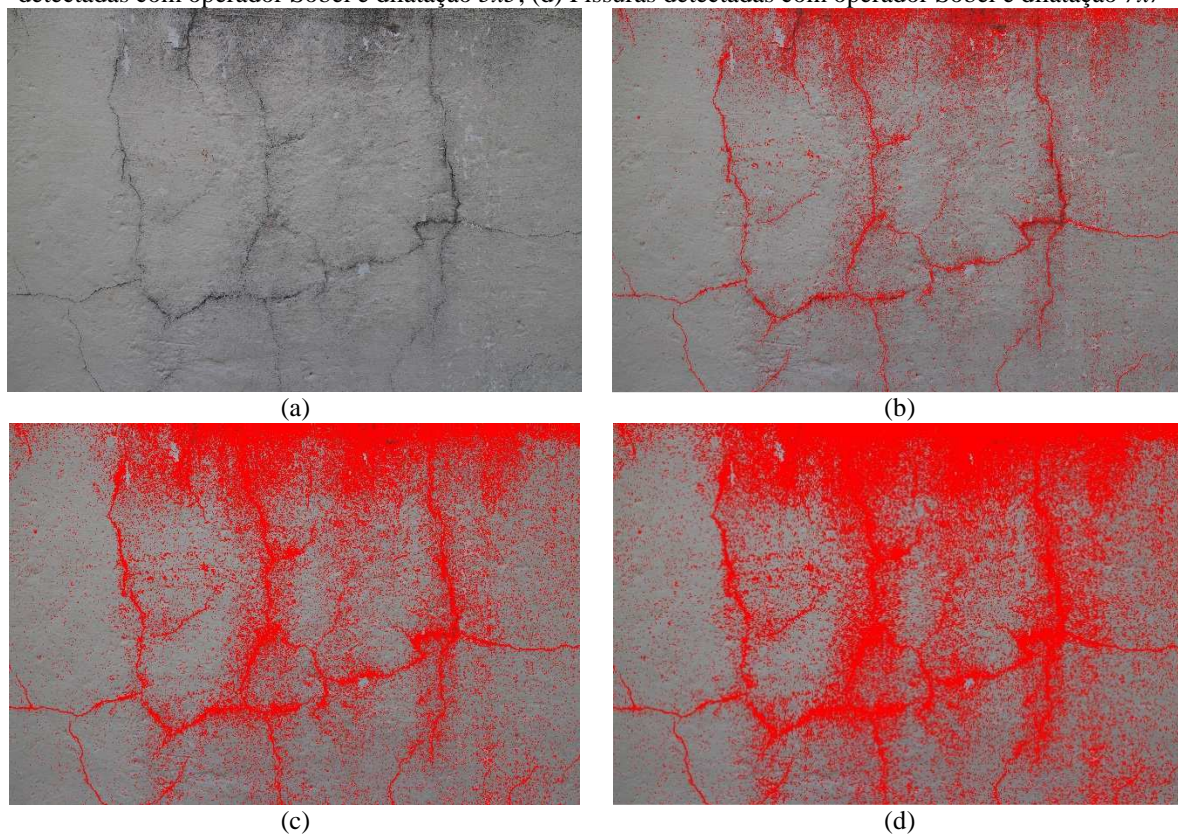
6.3.5 Fissuras

Neste subitem, serão apresentados experimentos em imagens de fachadas com fissuras. Dentre os testes com o programa Detecta Fissura (2016), foram realizados também experimentos com imagens de fissuras do Museu Nacional Honestino Guimarães. A finalidade foi analisar os operadores Sobel e Canny, filtros de dilatação e as opções de limiarização.

Fissura 1

A Figura 202 (a) é uma imagem de uma fachada com fissuras bem definidas e com muito contraste entre as fissuras e a superfície da parede. Para esta imagem, foram aplicados o operador Sobel sem dilatação de imagem, com o elemento estruturante dilatador de imagem 5×5 e dilatador de imagem 7×7 . Os resultados são apresentados nas Figura 202 (b), (c) e (d).

Figura 202 - (a) Imagem original; (b) Fissuras detectadas com operador Sobel e sem dilatação; (c) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 5x5; (d) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 7x7



Fonte: próprio autor.

Para esta imagem, o operador Sobel sem dilatação detectou as fissuras presentes na fachada, mas também gerou ruídos, devido a pequenas formações vizinhas de manchas existentes, e considerou-se um resultado não satisfatório (NS). Com a aplicação dos elementos estruturantes (dilatação de imagem 5x5 e 7x7), as pequenas manchas detectadas (ruídos) tiveram suas extremidades conectadas (aumentadas) com os elementos vizinhos, e os resultados apresentados nas Figura 202 (c) e (d) foram não satisfatórios (NS).

A Figura 203 apresenta resultados da classificação de fissuras utilizando o operador Canny, sem dilatação, limiar máximo de 50% e limiar mínimo de 20%, no entanto para a Figura 203 (a) com $\sigma = 1$ e para Figura 203 (b) com $\sigma = 3$. O resultado da classificação para o valor de $\sigma = 1$ apresentou menos ruídos e uma melhor definição das fissuras, e considerou-se como um resultado satisfatório (RS). Para $\sigma = 3$, o resultado foi não satisfatório (NS), devido à quantidade de ruídos presentes na imagem processada.

Figura 203 - (a) Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 20% e $\sigma = 1$; (b) Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 30% e $\sigma = 3$



(a)



(b)

Fonte: próprio autor.

Por causa das fissuras bem definidas e com um bom contraste com a superfície da fachada, as especificações de valores (limiar e σ) sugeridos pelo programa foram importantes para gerar resultados satisfatórios (RS), como apresentado na Figura 203 (a). Realizando a classificação das fissuras adotando os valores recomendados pelo programa (limiar máximo de 20 a 30%, limiar mínimo de 10 a 15%, e $\sigma = 0,5$), a classificação apresentou muitos ruídos, como pode ser observado na Figura 204.

Figura 204 - Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 20%, limiar mínimo de 15% e $\sigma = 0,5$



Fonte: próprio autor.

Outros experimentos foram realizados. Na Figura 205 (a), foi utilizado também o operador Canny, sem dilatação, com limiar máximo de 80% e limiar mínimo de 10%, e valor de $\sigma = 1$, e considerou-se um resultado não satisfatório (NS). Para a Figura 205 (b), foi usado o mesmo operador, assim como os mesmos valores de limiares, e valor de $\sigma = 5$. Os resultados de ambas as classificações foram considerados não satisfatórios (NS). Ao aumentar o valor de σ , reduziu-se os ruídos, porém deixou-se de classificar partes das fissuras.

Figura 205 - (a) Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 1$; (b) Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 5$



(a)

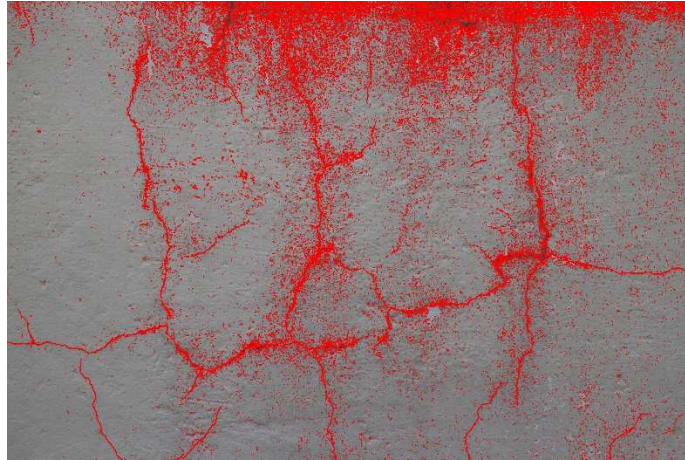


(b)

Fonte: próprio autor.

A Figura 206 apresenta o resultado da classificação de fissuras utilizando o operador Canny, com elemento estruturante de dilatação 5×5 , limiar máximo de 50% e limiar mínimo de 30%, e $\sigma = 1$. O resultado da classificação apresentou muitos ruídos e o resultado foi considerado não satisfatório (NS).

Figura 206 - Fissuras detectadas com operador Canny, dilatação 5x5, limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 20%, $\sigma = 1$



Fonte: próprio autor.

A Figura 207 apresenta o resultado final após a remoção dos ruídos da Figura 203 (a), em que foi usado o operador Canny, sem dilatação, limiar máximo de 50% e limiar mínimo de 20%, e com $\sigma = 1$. O resultado obtido foi considerado muito satisfatório (MS).

Figura 207 - Fissuras detectadas com operador Canny, sem dilatação, limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 20% $\sigma = 1$ e remoção dos ruídos



Fonte: próprio autor.

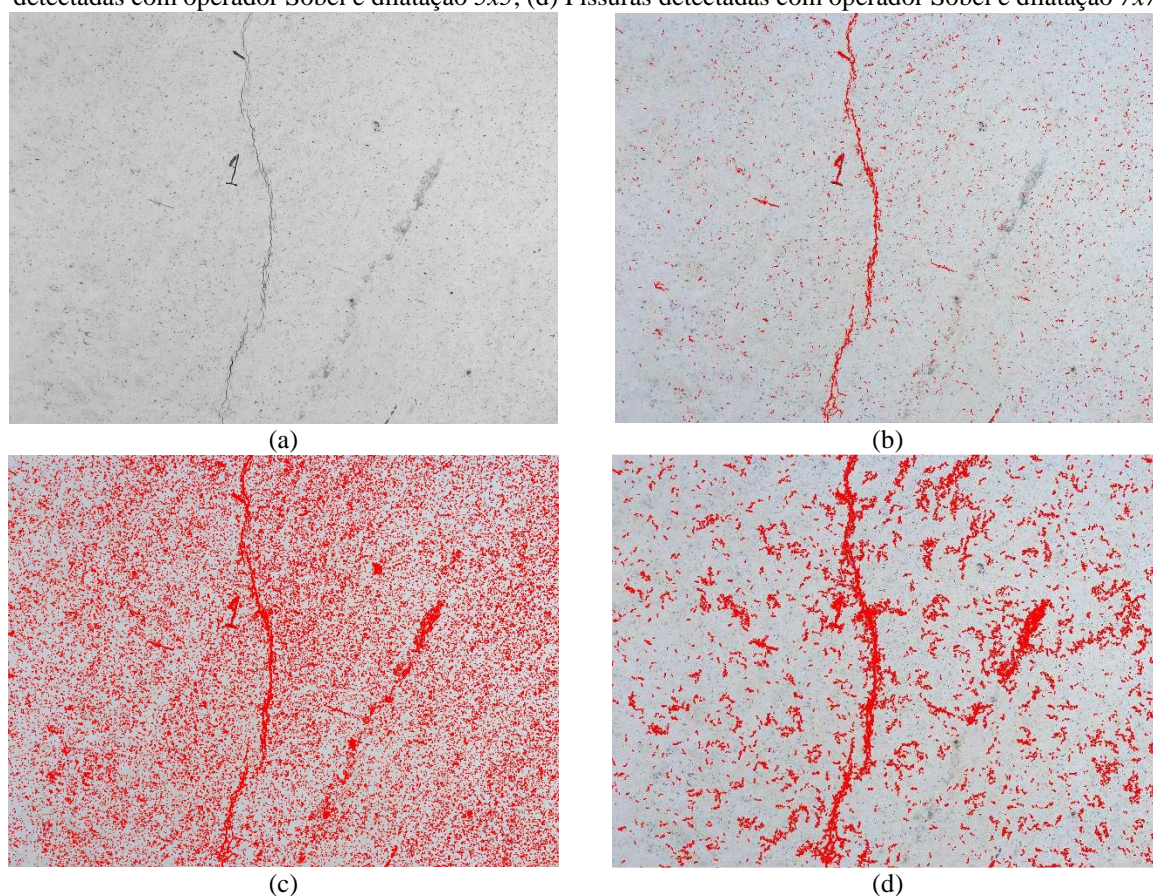
Por meio da técnica de *hysteresis thresholding* implementado para o operador Canny, os píxeis com intensidade maior que o limiar máximo foram considerados pertencentes à classificação, e os valores entre o limiar máximo e mínimo foram também considerados pertencentes à classificação, quando interligados às respostas com valores acima do limiar máximo. Desta

forma, quanto maior o valor do limiar máximo especificado, menos fissuras foram classificadas, e menos ruídos também foram gerados. Devido ao bom contraste entre as fissuras e a fachada, não houve a necessidade de valores muito baixos de limiar máximo. Os valores de σ permitiram suavizar as classificações; quanto maiores os valores menos regiões classificadas e conseqüentemente ruídos também. Estas observações devem ser consideradas para todos os experimentos realizados na detecção das fissuras a serem apresentados a seguir.

Fissura 2

Os experimentos realizados foram com fissuras observadas no Museu Nacional Honestino Guimarães e com largura de 0,05 mm. Porém, estas fissuras foram registradas fotograficamente à uma distância aproximada de 50 cm. Para a Figura 208 (a), foram aplicados o operador Sobel sem dilatação de imagem, com o elemento estruturante dilatador de imagem 5x5 e dilatador de imagem 7x7. Os resultados são apresentados nas Figura 208 (b), (c) e (d).

Figura 208 - (a) Imagem original; (b) Fissuras detectadas com operador Sobel e sem dilatação; (c) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 5x5; (d) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 7x7

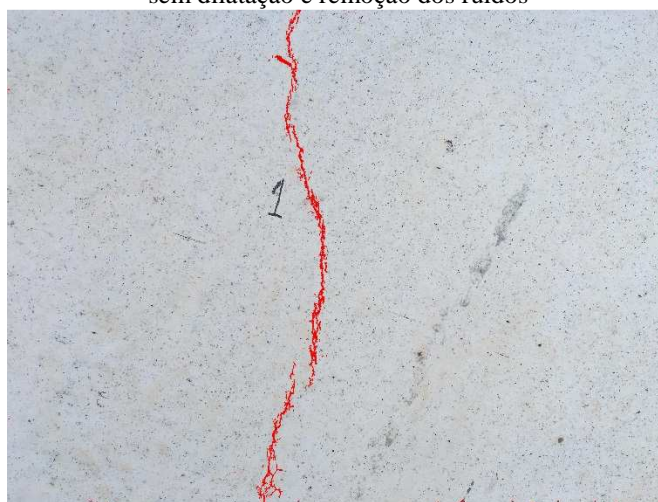


Fonte: próprio autor.

Para o operador Sobel sem dilatação, as fissuras foram detectadas, mas também foram detectados ruídos, e o resultado foi considerado não satisfatório (NS). Para o operador Sobel e aplicação de dilatação 5×5 e 7×7 , as fissuras foram detectadas, no entanto a quantidade de ruídos foi maior que o resultado anterior, considerando-se também como um resultado não satisfatório (NS).

A Figura 209 apresenta o resultado do operador Sobel após a remoção dos ruídos. O resultado final foi considerado muito satisfatório (MS).

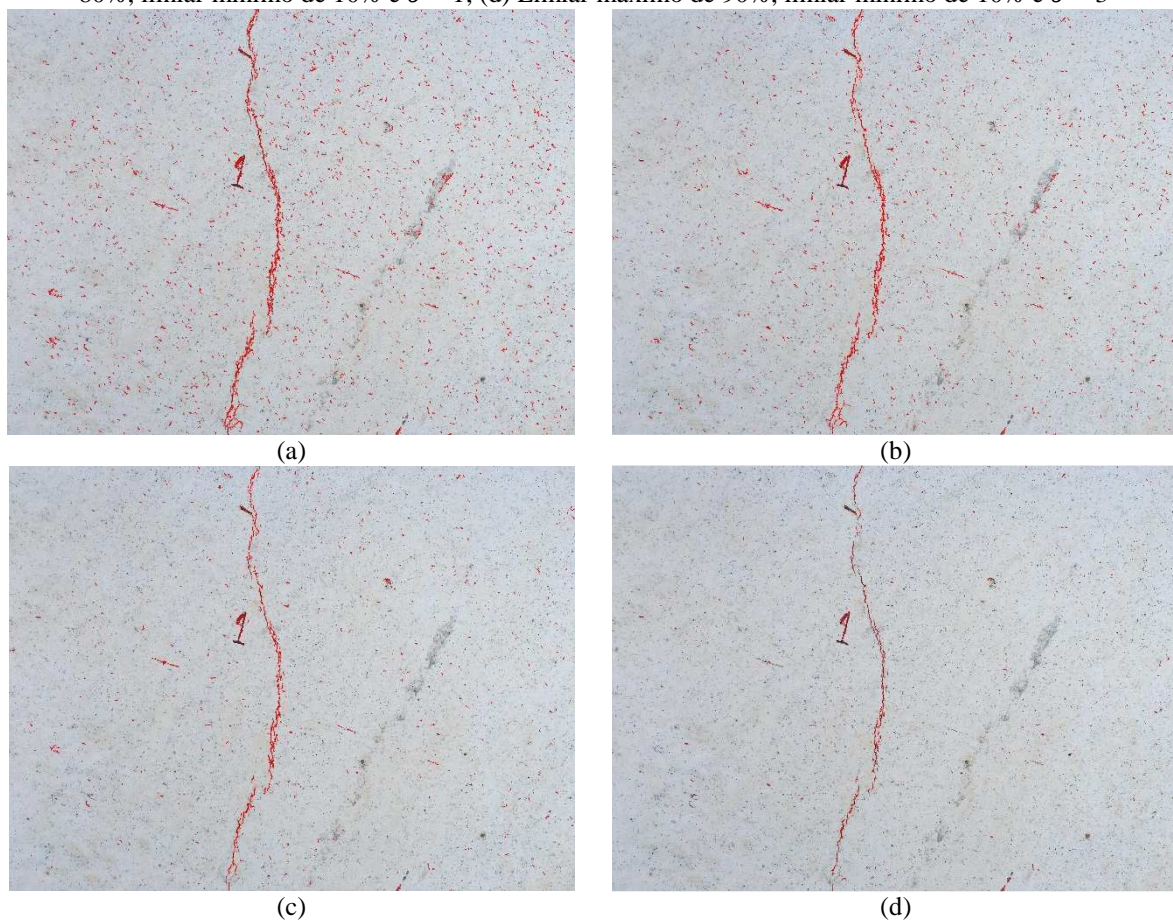
Figura 209 - Fissuras detectadas com operador Sobel, sem dilatação e remoção dos ruídos



Fonte: próprio autor.

A Figura 210 (a) apresenta o resultado do operador Canny, sem dilatação, com limiar máximo de 30% e limiar mínimo de 10%, e valor de $\sigma = 0,5$, e considerou-se um resultado não satisfatório (NS), pela classificação de muitos elementos que não pertenciam às fissuras. Para a Figura 210 (b), foi usado o mesmo operador e sem dilatação, mas com limiar máximo de 50% e limiar mínimo de 20%, e valor de $\sigma = 1$, e o resultado foi considerado não satisfatório (NS), pelos motivos citados anteriormente. A Figura 210 (c) apresenta o resultado do operador Canny, sem dilatação, com limiar máximo de 80% e limiar mínimo de 10%, e valor de $\sigma = 1$, e o resultado foi considerado satisfatório (RS). Na Figura 210 (d) está apresentado o resultado do operador Canny, sem dilatação, com limiar máximo de 90% e limiar mínimo de 10%, e valor de $\sigma = 3$, e o resultado foi considerado satisfatório (RS).

Figura 210 - Fissuras detectadas com operador Canny sem dilatação: (a) Limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 0,5$; (b) Limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 20% e $\sigma = 1$; (c) Limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 1$; (d) Limiar máximo de 90%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 3$



Fonte: próprio autor.

Os valores de limiares indicados no programa foram utilizados, mas observou-se que muitos ruídos foram classificados também. Assim, foram usados limiares máximos maiores e limiares mínimos menores para avaliação dos novos resultados. Houve uma menor quantificação dos ruídos, como pode-se observar na Figura 210 (d), porém fissuras não foram classificadas, como pode-se visualizar na Figura 211.

Figura 211 - Fissuras não detectadas



Fonte: próprio autor.

Com a finalidade de que todas as fissuras fossem mapeadas e com base nos resultados alcançados na Figura 210 (d), utilizou-se os mesmos parâmetros deste experimento (limiar máximo de 90% e limiar mínimo de 10%, e valor de $\sigma = 3$) e o elemento estruturante de dilatação 5×5 e o resultado pode ser observado na Figura 212.

Figura 212 - Fissuras detectadas com operador Canny, Limiar máximo de 90%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 3$, dilatação 5×5



Fonte: próprio autor.

O resultado foi considerado satisfatório (RS), no entanto, alguns ruídos foram classificados na imagem. O removedor de ruídos foi usado para remoção de partes que não caracterizavam as fissuras e o resultado, Figura 213, foi muito satisfatório (MS).

Figura 213 - Fissuras detectadas com operador Canny, dilatação 5x5 e remoção de ruídos

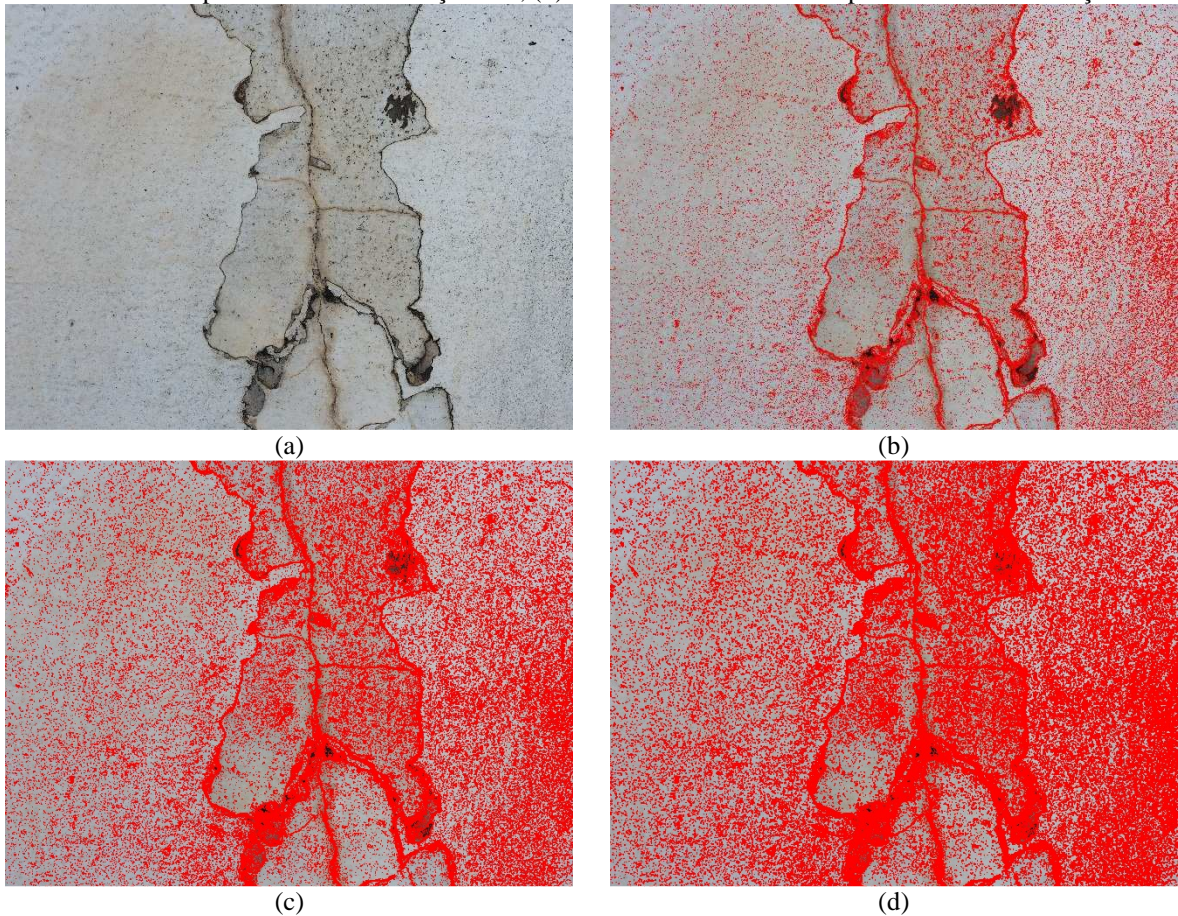


Fonte: próprio autor.

Fissura 3

Esta imagem também foi obtida do Museu Nacional Honestino Guimarães e possui fissuras com até 0,035 mm de largura. Além das fissuras, esta região da fachada também apresenta umas formações de manchas, inclusive manchas que parecem ser do efeito da corrosão devido à sua coloração. Para a imagem da Figura 214, foram aplicados o operador Sobel sem dilatação de imagem, com o elemento estruturante dilatador de imagem 5x5 e dilatador de imagem 7x7. Os resultados são apresentados nas Figura 214 (b), (c) e (d).

Figura 214 - (a) Imagem original; (b) Fissuras detectadas com operador Sobel e sem dilatação; (c) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 5x5; (d) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 7x7



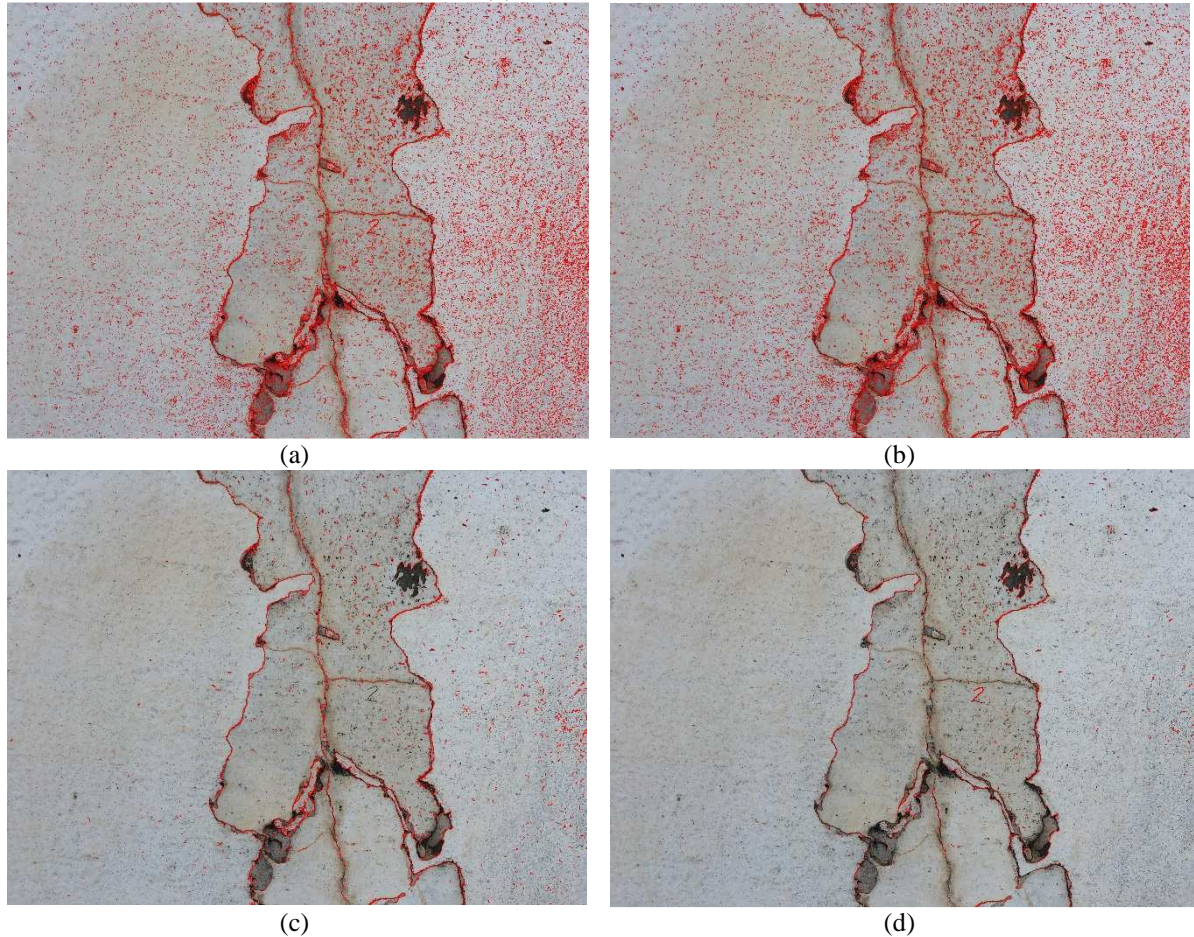
Fonte: próprio autor.

Os resultados gerados com o operador de Sobel apresentaram muitos ruídos, sendo maiores estas quantidades quando aplicados os elementos estruturantes de dilatação 5x5 e 7x7. Assim, para estas três classificações, os resultados foram considerados não satisfatórios (NS).

A Figura 215 (a) apresenta o resultado do operador Canny, sem dilatação, com limiar máximo de 50% e limiar mínimo de 20%, e valor de $\sigma = 1$, e considerou-se um resultado não satisfatório (NS), pela classificação de outros padrões. Para a Figura 215 (b) foi usado o mesmo operador, mas com limiar máximo de 30% e limiar mínimo de 10%, e valor de $\sigma = 0,5$, e o resultado foi considerado não satisfatório (NS) também, pelos motivos citados anteriormente. A Figura 215 (c) apresenta o resultado do operador Canny, sem dilatação, com limiar máximo de 80% e limiar mínimo de 10%, e valor de $\sigma = 1$, e o resultado foi considerado não satisfatório (NS), apesar de alguns ruídos. Na Figura 215 (d) está apresentado o resultado do operador Canny, sem dilatação, com limiar máximo de 80% e limiar mínimo de 10%, e valor de $\sigma = 3$, e o

resultado foi considerado não satisfatório (NS), pois algumas fissuras ficaram sem classificação.

Figura 215 - Fissuras detectadas com operador Canny sem dilatação: (a) Limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 20% e $\sigma = 1$; (b) Limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 0,5$; (c) Limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 1$; (d) Limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 3$

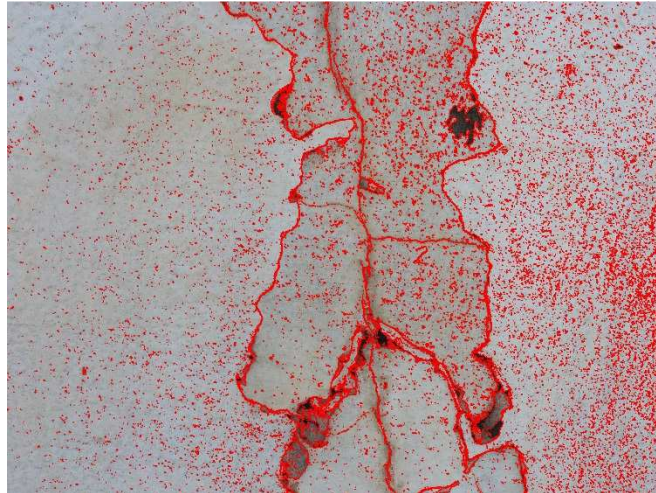


Fonte: próprio autor.

A especificação de um maior valor para o limiar máximo (80%) e de um menor valor para o limiar mínimo (10%) reduziram a classificação de ruídos. Entretanto, o aumento do valor σ reduziu a quantidade de fissuras classificadas.

O emprego do operador Canny com a dilatação 5×5 , utilizado com a finalidade de aumentar a classificação das fissuras, fez a quantidade de ruídos aumentarem pela conectividade dos píxeis, como se pode observar na Figura 216, considerando-se um resultado não satisfatório (NS). Neste experimento, foi utilizado limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10, $\sigma = 1$ e elemento estruturante de dilatação de 5×5 .

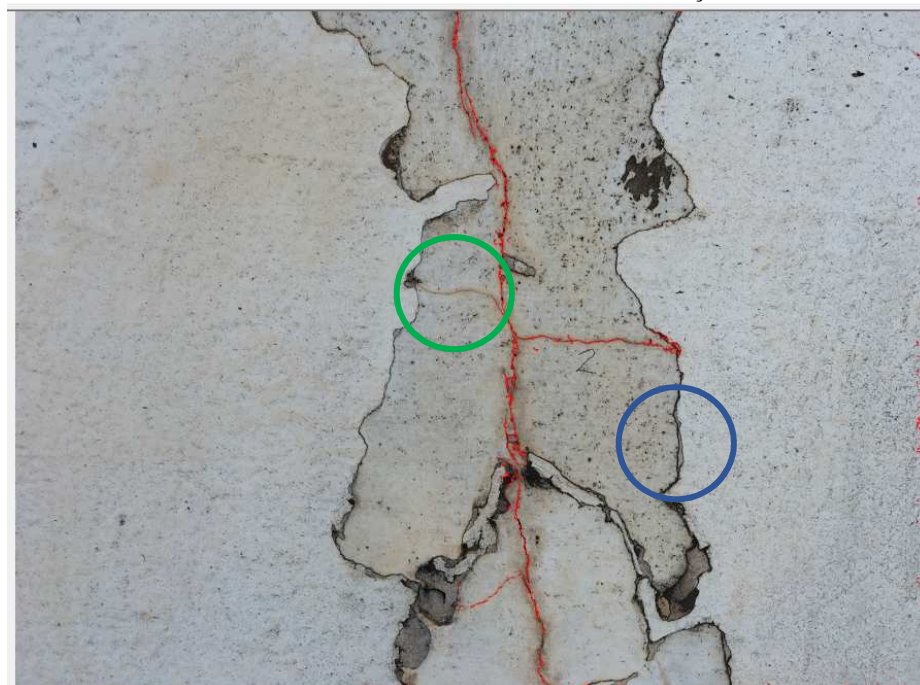
Figura 216 - Fissuras detectadas com operador Canny, limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10%, $\sigma = 1$ e dilatação 5x5



Fonte: próprio autor.

Desta forma, constatou-se que o melhor resultado obtido foi com os parâmetros de limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 1$, em que foi aplicada desta vez a remoção de ruídos, obtendo um resultado satisfatório (RS), como ilustrado na Figura 217.

Figura 217 - Fissuras detectadas com operador Canny, sem dilatação, Limiar máximo de 80%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 1$ e remoção de ruídos



Fonte: próprio autor.



Ressalta-se que a qualificação somente de resultado satisfatório (RS) para a Figura 217 deu-se porque algumas fissuras não foram mapeadas, como a fissura destacada por circunferência verde. Neste experimento, antes da remoção de ruídos, os danos em destaque por circunferência azul tinham sido classificados e, no entanto, foram excluídos da classificação por pertencerem à problemas referentes à descamação da pintura da fachada.

6.3.6 Quadros-resumo das manifestações patológicas classificadas em imagens

O Quadro 51 apresenta o resumo de algumas das manifestações patológicas (manchas escuras, eflorescências, destacamento de revestimento cerâmico e alteração cromática) em imagens e detectados pelo programa Tyche (2016), e função exclusiva dos valores de k . Os melhores resultados obtidos estão apresentados em destaque no Quadro 51. Por estes resultados, verificou-se que não há um padrão para a obtenção de resultados muito satisfatórios (MS) em função de um único valor de k , e que o valor de k apropriado será em função de vários aspectos, como, por exemplo, o contraste entre a manifestação patológica e a composição da fachada.

O Quadro 52 apresenta o resumo dos resultados das classificações de fissuras em imagens detectadas pelo programa Detecta Fissura (2016).

Quadro 51 – Quadro-resumo das manifestações patológicas detectadas em imagens no programa Tyche (2015)

Imagem	Espaço de cor	Valor de k	Área (%)	Qualificação
 Mancha escura	RGB	1	1,24	RS
	Escala de cinzas		1,60	RS
	H		71,62	NS
	S		5,44	NS
	V		1,27	RS
	RGB	2	2,36	RS
	RGB	3	3,41	MS
	RGB	4	4,96	MS
 Eflorescência 1	RGB	1	2,08	MS
	Escala de cinzas		3,26	MS
	H		3,10	RS
	S		10,76	NS
	V		3,83	NS
	RGB	3	33,15	NS
	RGB	5	100,00	NS
	 Eflorescência 2	RGB	1	1,50
RGB		2	2,99	MS
RGB		3	3,73	MS
RGB		4	4,37	MS
RGB		5	9,06	NS
 Destacamento de revestimento cerâmico	RGB	1	3,80	RS
	Escala de cinzas		5,99	NS
	H		27,24	NS
	S		4,92	NS
	V		6,17	NS
	RGB	3	11,56	NS
	RGB	5	23,72	NS
 Alteração cromática	RGB	1	12,94	NS
	Escala de cinzas		41,94	NS
	H		76,25	NS
	S		10,66	NS
	V		67,09	NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: próprio autor.

Quadro 52 – Quadro-resumo das fissuras detectadas em imagens no programa Detecta Fissura (2016)

Imagem	Operador	Dilatação	Limiar (%)		Sigma	Remoção de ruídos	Qualificação
			Máximo	Mínimo			
 Fissura 1	Sobel	Sem dilatação	-	-	-	Não	NS
		Dilatação 5x5	-	-	-	Não	NS
		Dilatação 7x7	-	-	-	Não	NS
	Canny	Sem dilatação	50	20	1	Não	RS
			50	20	3	Não	NS
			20	15	0,5	Não	NS
			80	10	1	Não	NS
			80	10	5	Não	NS
		Dilatação 5x5	50	30	1	Não	NS
	Sem dilatação	50	20	1	Sim	MS	
 Fissura 2	Sobel	Sem dilatação	-	-	-	Não	NS
		Dilatação 5x5	-	-	-	Não	NS
		Dilatação 7x7	-	-	-	Não	NS
		Sem dilatação	-	-	-	Sim	MS
	Canny	Sem dilatação	30	10	0,5	Não	NS
			50	20	1	Não	NS
			80	10	1	Não	RS
			90	10	3	Não	RS
		Dilatação 5x5	90	10	3	Não	RS
		Dilatação 5x5	90	10	3	Sim	MS
 Fissura 3	Sobel	Sem dilatação	-	-	-	Não	NS
		Dilatação 5x5	-	-	-	Não	NS
		Dilatação 7x7	-	-	-	Não	NS
	Canny	Sem dilatação	50	20	1	Não	NS
			30	10	0,5	Não	NS
			80	10	1	Não	NS
			80	10	3	Não	NS
		Dilatação 5x5	80	10	1	Não	NS
		Sem dilatação	80	10	1	Sim	RS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: próprio autor.

Como demonstrado neste quadro-resumo, os melhores resultados na detecção de fissuras foram obtidos usando o operador Canny, em que um dos casos se empregou o operador de dilatação 5x5. Para a obtenção destes melhores resultados, utilizou-se a remoção de ruídos nas imagens.

6.4 MAPAS DE DANOS DAS ORTOIMAGENS DE FACHADAS

Nos subitens seguintes, serão apresentadas a geração de mapas de danos das ortoimagens (geradas pelo programa PhotoScan) das seguintes edificações: Biblioteca Central, ANTAQ, edifício residencial B e Anexo 1 do Congresso Nacional. Estes subitens serão divididos em resultados obtidos com os programas Tyche (2015) e Detecta Fissura (2016), devido às particularidades já mencionadas de cada programa.

Para algumas das ortoimagens, também foram gerados mapas de danos por usuário, usando programa CAD como ferramenta, com a finalidade de possibilitar a análise entre os resultados obtidos pelas duas técnicas: manual e automática.

6.4.1 Mapas de danos gerados no Tyche (2015)

Pelo programa Tyche, foram gerados mapas de danos das ortoimagens geradas pelo programa PhotoScan das seguintes edificações: Biblioteca Central, ANTAQ, edifício residencial B e Congresso Nacional – Anexo I.

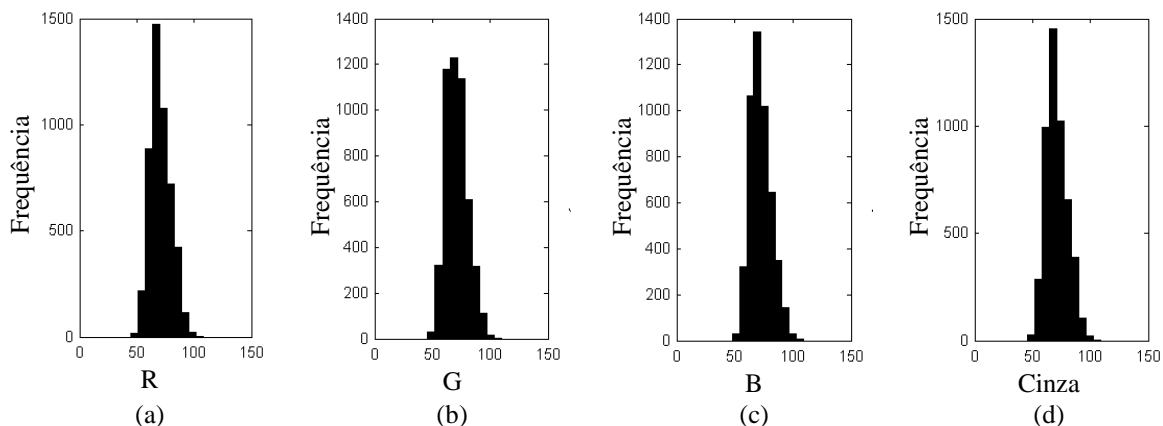
6.4.1.1 Biblioteca Central da UnB

Após manipulação do contraste no Photoshop, a ortoimagem da fachada da Biblioteca Central foi processada no programa Tyche (2015) para a detecção de manchas escuras. A ortoimagem possui uma resolução de 3.472 x 1.513 píxeis, totalizando 5.253.136 píxeis. A seleção foi feita a partir do píxel 412 no eixo x e do píxel 14 no eixo y, com uma caixa de seleção de 86 x 56 píxeis. Mais uma vez, a seleção foi feita de acordo com a percepção do usuário do padrão que se desejou classificar.

Análise da classificação por espaços de cores

A Figura 218 apresenta as frequências de píxeis nos espaços R, G, B e escala de cinza da amostra selecionada. Percebe-se que as distribuições de frequência são muito semelhantes nos espaços R, B e escalas de cinza e um pouco diferente da distribuição no espaço G.

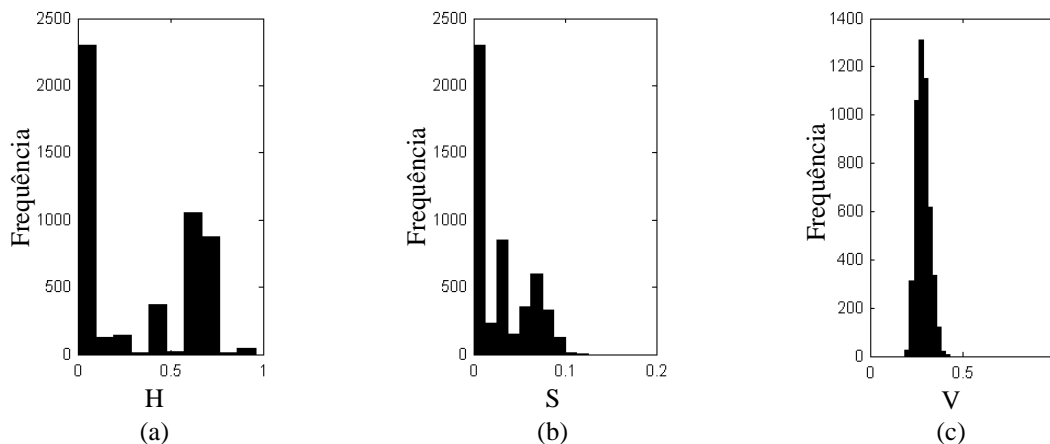
Figura 218 – Distribuições de frequência de píxeis para manchas escuras da Biblioteca Central: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza



Fonte: próprio autor.

A amostra, no espaço de cores RGB, passou por transformação de cores também para os espaços H, S e V, além do espaço em escalas de cinza (*gray scale*). Na Figura 219, são apresentadas as distribuições de frequências para os valores de píxeis nos espaços H, S e V.

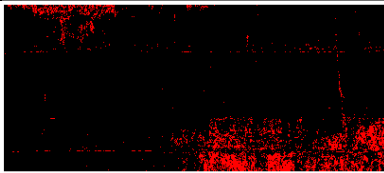
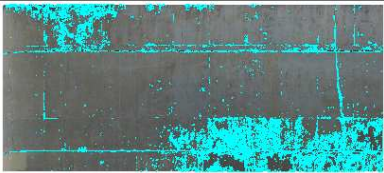
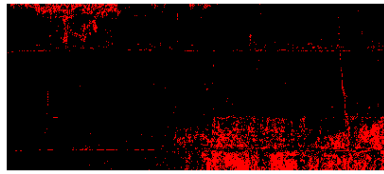
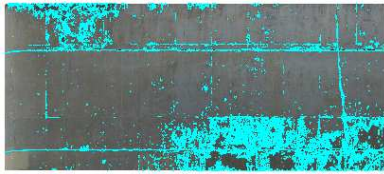
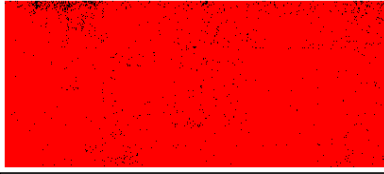

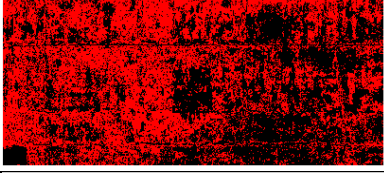
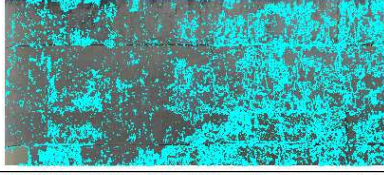
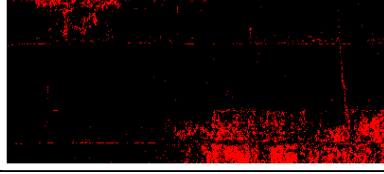
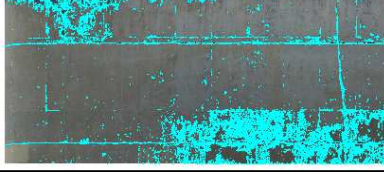
Figura 219 - Distribuições de frequência de píxeis para manchas escuras da Biblioteca Central: (a) H; (b) S; (c) V



Fonte: próprio autor.

Os resultados da classificação nos espaços RGB, escalas de cinza, H, S e V são apresentados no Quadro 53, para o valor de $k = 1$. Os resultados para os espaços RGB, escalas de cinza e V foram muito satisfatórios (MS), alcançando um percentual de 6,40%, 8,31% e 8,12% de manchas escuras, respectivamente. O resultado para a classificação no espaço H foi de 98,54%, o que foi um resultado não satisfatório (NS). Para o espaço de S, o resultado da classificação de manchas foi de 49,50%, apresentando também um resultado não satisfatório (NS).

Quadro 53 – Biblioteca Central: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação de manchas escuras

Espaço de cores	Percentual da classificação (%)	Segmentação	Classificação	Qualif.
RGB	6,40			MS
Escalas de cinza	8,31			MS
H	98,54			NS
S	49,50			NS
V	8,12			MS



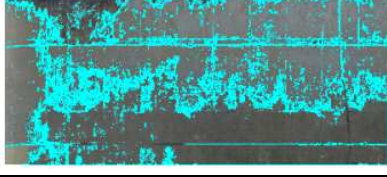
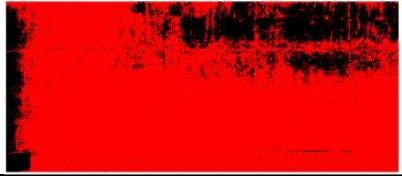
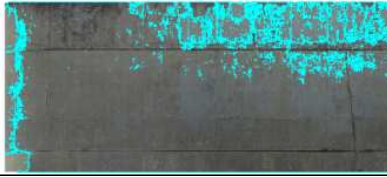
Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: Próprio autor.

Análise da classificação por valores de k

A próxima classificação foi realizada com a mesma seleção da amostra, mas alterando os valores de k : 3 e 5. O Quadro 54 apresenta os resultados, ilustrando a amostra da seleção na coluna da esquerda, a segmentação na coluna central e a classificação na coluna da direita.

Quadro 54 - Biblioteca Central: percentual de classificação de manchas escuras para $k = 3$ e $k = 5$

Seleção da amostra	Píxeis identificados (cor vermelha)	Classificação (Percentagem da área classificada)	Qualif.
	$k = 3$ 	39,37% 	NS
	$k = 5$ 	80,52% 	NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

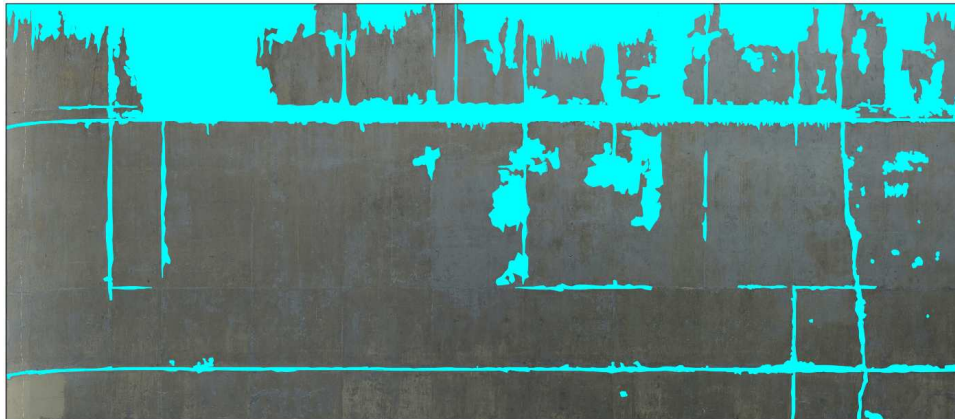
Fonte: Próprio autor.

Para o valor de $k = 3$, a região classificada foi de 39,37% e para $k = 5$, 80,52%. Visualmente, para estes dois valores, os resultados foram não satisfatórios.

Para esta ortoimagem com presença de manchas escuras, os histogramas das distribuições de frequência de píxeis do espaço R, G e B apresentaram uma menor dispersão ou um menor desvio padrão. Assim, o valor de $k = 1$ apresentou uma classificação muito satisfatória (MS), uma vez que os dados analisados foram mais próximos da média.

A imagem da Figura 220 ilustra o resultado do mapeamento feito em programa CAD por um usuário instruído a criar o mapa de danos para a fachada da Biblioteca Central. O usuário, que antes da execução não tinha visto o resultado gerado pelo programa Tyche (2015), construiu o mapa de danos em cerca de 1 hora e 30 minutos, e obteve um percentual de 19,14% de manchas escuras formadas sobre a fachada. O tempo gasto pelo programa Tyche (2015) para gerar os mapas nos espaços de cor RGB, escalas de cinza, H, S e V foi de aproximadamente 3 minutos.

Figura 220 – Biblioteca Central: mapa de danos criado por usuário em programa CAD



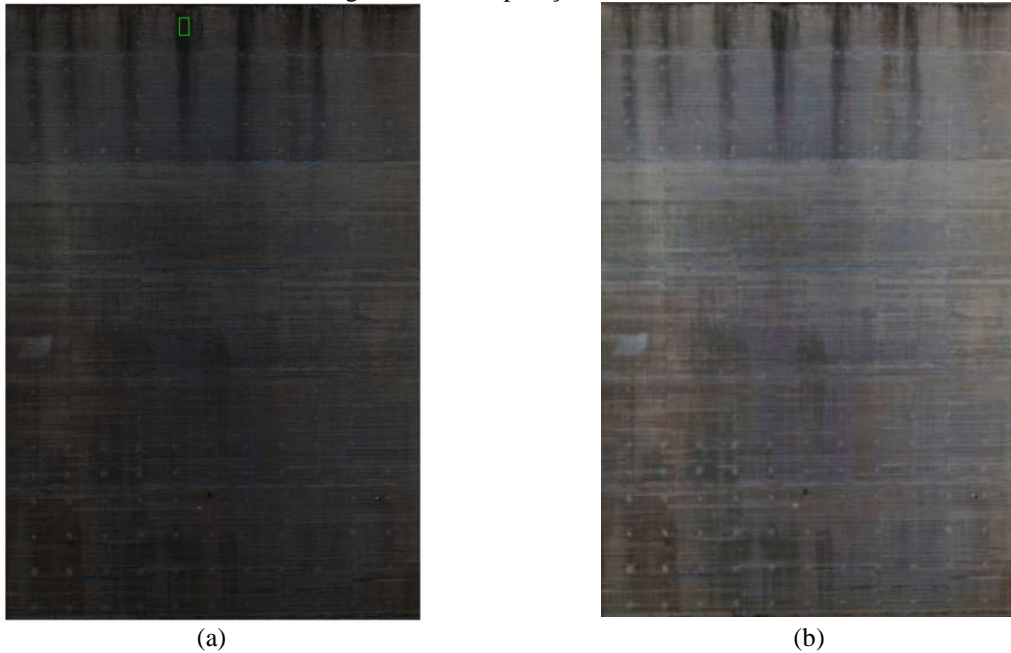
Fonte: Próprio autor.

Alguns aspectos da classificação realizada em programa CAD foram relevantes para a elaboração do mapa de danos. Nesta fachada, as manchas não apresentam uma forma com contornos bem definidos que dificultaram significativamente o processo de criação dos mapas de danos. Desta forma, a classificação foi feita em cima de regiões da fachada que apresentaram os danos, resultando num valor percentual maior que o mapa gerado pelo Tyche (2015), pois este classifica somente os padrões definidos na segmentação. Outro ponto importante, é que o Tyche (2015) classificou padrões em partes da fachada não percebidos, ou seja, não visualizados pelo usuário.

6.4.1.2 ANTAQ

Para a fachada sul do prédio da ANTAQ (Modelo 6-ANT-S), foi realizada a classificação para a ortoimagem original (sem edição de imagem) e ortoimagem com manipulação de brilho e contraste no Photoshop. As ortoimagens possuem uma resolução de 1.200 x 900 píxeis, totalizando 1.080.000 píxeis. A seleção foi feita a partir do píxel 544 no eixo x e do píxel 45 no eixo y, com uma caixa de seleção de 29 x 54 píxeis, sobre a formação de manchas escuras ocorridas próximas à platibanda da fachada. A Figura 221 apresenta as duas ortoimagens citadas.

Figura 221 – Fachada da ANTAQ: (a) Imagem sem a manipulação de contraste e seleção da amostra; (b) imagem com manipulação de contraste



Fonte: Próprio autor.

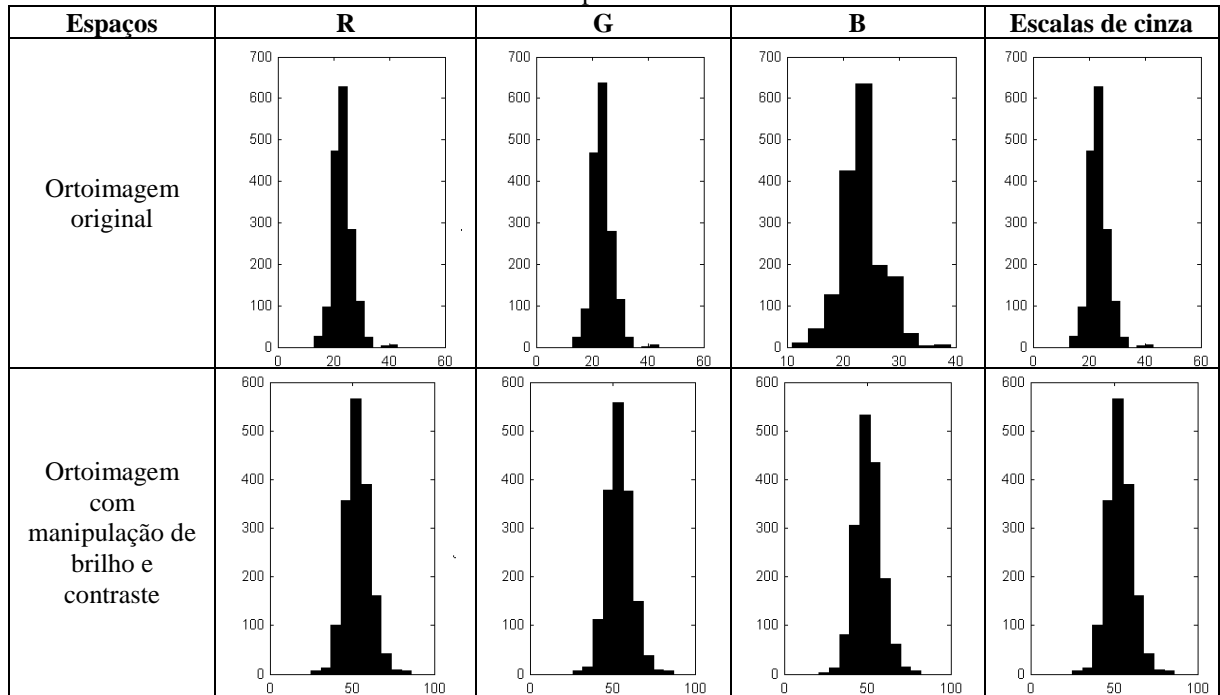
Análise da classificação por espaços de cores

O Quadro 55 apresenta as distribuições de frequências de píxeis nos espaços R, G, B e escalas de cinza das amostras selecionadas para as duas ortoimagens.

Notam-se semelhanças entre as distribuições de frequência de píxeis da ortoimagem original e com a manipulação de brilho e contraste, com exceção para o espaço B da ortoimagem original, que tem uma base mais larga.

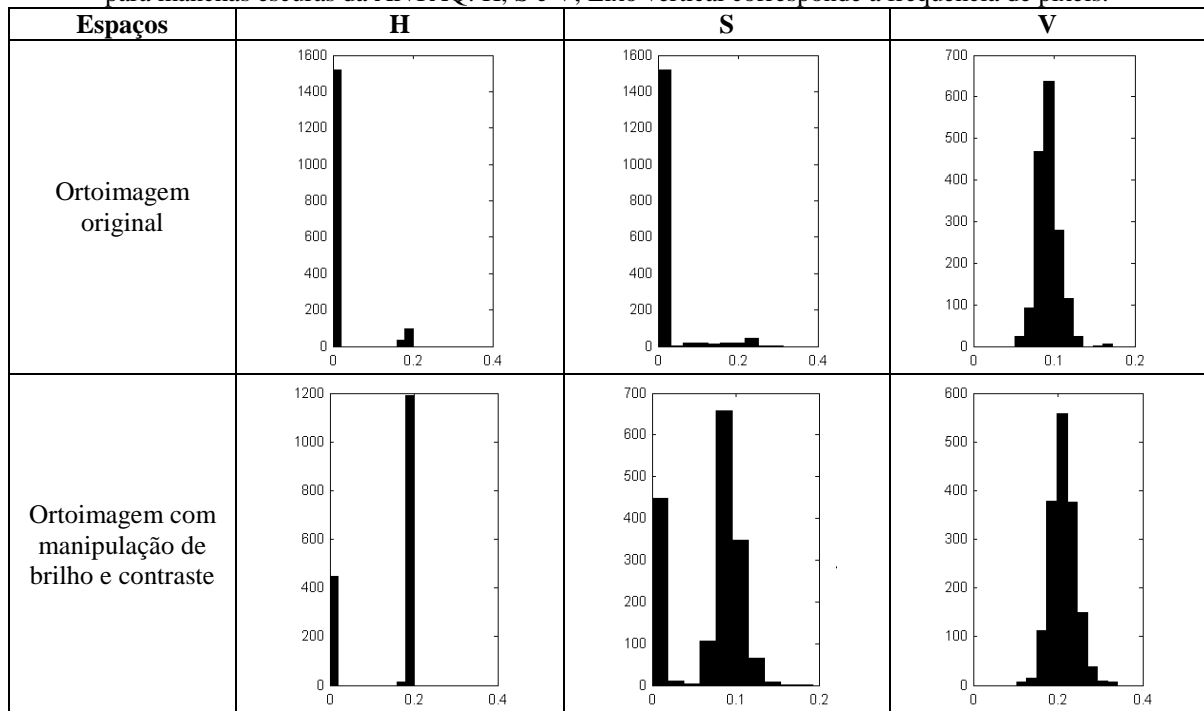
No Quadro 56, são apresentadas as distribuições de frequência para os espaços H, S e V.

Quadro 55 - Distribuições de frequência de píxeis em ortoimagem original e com manipulação de contraste para manchas escuras da ANTAQ: R, G, B e escalas de cinza; Eixo vertical corresponde a frequência de píxeis



Fonte: próprio autor.

Quadro 56 – Distribuições de frequência de píxeis em ortoimagem original e com manipulação de contraste para manchas escuras da ANTAQ: H, S e V; Eixo vertical corresponde a frequência de píxeis.



Fonte: próprio autor.






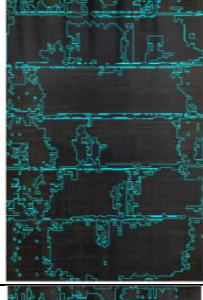
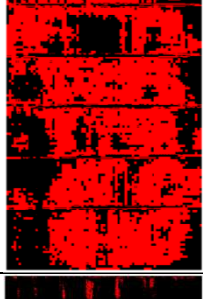

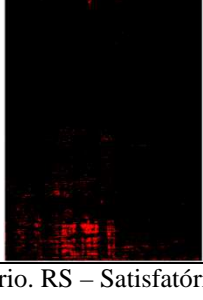

Pelo Quadro 56, verifica-se que a distribuição de frequência do espaço V da ortoimagem original é semelhante à distribuição nos espaços R, G e escalas de cinza da ortoimagem original. A distribuição do espaço V da ortoimagem com manipulação de brilho e contraste é semelhante à distribuição nos espaços R, G, B e escalas de cinza da ortoimagem com manipulação de brilho e contraste.

O Quadro 57 apresenta as percentagens de classificação, as ortoimagens segmentadas e classificadas para a imagem sem edição de contraste e brilho para o valor de $k = 1$. Os espaços de cores RGB, escalas de cinza e V apresentaram uma classificação não satisfatória (NS), com valores percentuais de 2,14%, 3,23% e 2,42%. A análise quanto à não satisfatória (NS), do ponto de vista visual, é devida à classificação de regiões nas partes inferiores da fachada sem manchas perceptíveis à visão humana.

O Quadro 58 apresenta os percentuais de manchas classificadas para $k = 1$, e novamente os espaços RGB, escalas de cinza e V apresentaram valores próximos.

O Quadro 59 apresenta as segmentações e classificações nos espaços RGB e escalas de cinza, e visualmente é imperceptível a diferença em relação à imagem sem manipulação das áreas identificadas.

Quadro 57 - ANTAQ: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação

Espaço de cores	Percentual da classificação (%)	Segmentação	Classificação	Qualificação
RGB	2,14			NS
Escalas de cinza	3,23			NS
H	55,98			NS
S	58,64			NS
V	2,42			NS

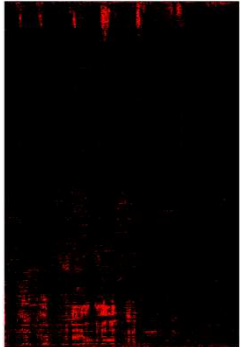
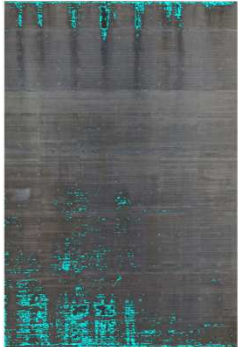


Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.
 Fonte: Próprio autor.

Quadro 58 – ANTAQ. Percentual de classificação nos espaços de cores RGB, escalas de cinza, H, S e V

Espaços	Classificação (%)				
	RGB	Escalas de cinza	H	S	V
Ortoimagem original	2,14	3,23	55,98	58,64	2,42
Ortoimagem com manipulação de brilho e contraste	2,25	3,67	38,28	61,00	2,81

Fonte: Próprio autor.

Quadro 59 – ANTAQ: Segmentação e classificação nos espaços RGB e escalas de cinza em ortoimagem com manipulação de contraste

Espaços	RGB		Escalas de cinza	
	Segmentação	Classificação	Segmentação	Classificação
Ortoimagem com manipulação de brilho e contraste				
Qualificação	NS	NS	NS	NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: Próprio autor.

Análise da classificação por área

Para a fachada do prédio da ANTAQ, o mapa de danos das manchas tinha a finalidade de quantificar as manchas escuras surgidas da parte superior da edificação, mas outras regiões foram segmentadas e classificadas também na parte inferior da fachada. Inserindo ao programa Tyche (2015) outros valores para k e, principalmente, atribuindo outros valores de área mínima e área máxima foi possível chegar a resultados mais esperados, como pode ser visualizado no Quadro 60.

Os experimentos do Quadro 60 apresentaram os resultados das classificações das imagens nos espaços de cor RGB e escala de cinza para mapeamento das manchas da parte superior da fachada e para os valores de $k = 4$ e $k = 5$. Nos dois primeiros modelos deste quadro, verificou-se que aumentando o valor de $k = 4$ para $k = 5$ houve o aumento do percentual de classificação

de 2,27% para 3,97% no espaço RGB e entre área mínima para classificação de 40.000 píxeis e área máxima de 160.000 píxeis. Reduzindo estas áreas mínimas e máximas para 60.000 e 100.000 píxeis, a área de classificação para k igual a 5 continuou com o mesmo valor de 3,97% para o espaço RGB.

A classificação no espaço escalas de cinza foi de 4,52% para $k = 5$ e área mínima estabelecida de 40.000 píxeis e a área máxima foi de 160.000 píxeis para a classificação, maior que o resultado no espaço de cor RGB e demais mesmos valores.

O Quadro 61 apresenta resultados para a classificação da imagem com manipulação de contraste de imagem pelo Adobe Photoshop.

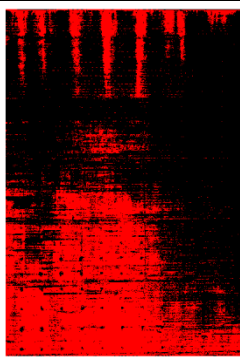

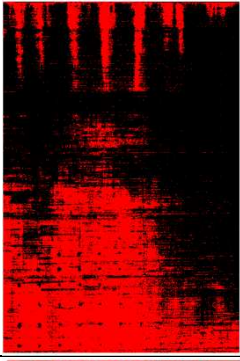
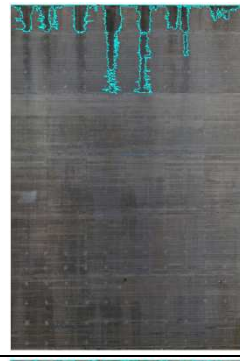
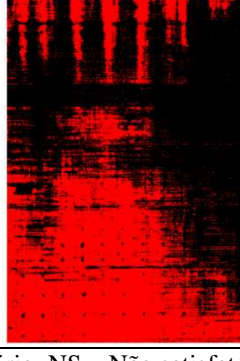
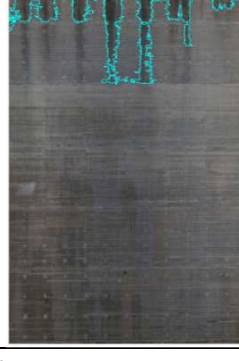
Quadro 60 – ANTAQ. Espaços de cores, valor de k , área mínima e máxima, percentual de classificação, segmentação e classificação em ortoimagem sem manipulação de contraste

Espaço de cor	Valor de k	Área mínima/ Área máxima (píxeis)	Percentual da classificação (%)	Segmentação	Classificação	Qualif.
RGB	4	40.000 160.000	2,27			NS
RGB	5	40.000 160.000	3,79			RS
RGB	5	60.000 100.000	3,79			RS
Escala de cinza	5	40.000 160.000	4,52			RS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: Próprio autor.

Quadro 61 - ANTAQ. Espaços de cores, valor de k , área mínima e máxima, percentual de classificação, segmentação e classificação em ortoimagem com manipulação de contraste

Espaço de cor	Valor de k	Área mínima/ Área máxima (píxeis)	Percentual da classificação (%)	Segmentação	Classificação	Qualif.
Escala de cinza	4	10.000 150.000	4,09			RS
Escala de cinza	4	100.000 200.000	4,09			RS
RGB	5	100.000 200.000	5,10			RS

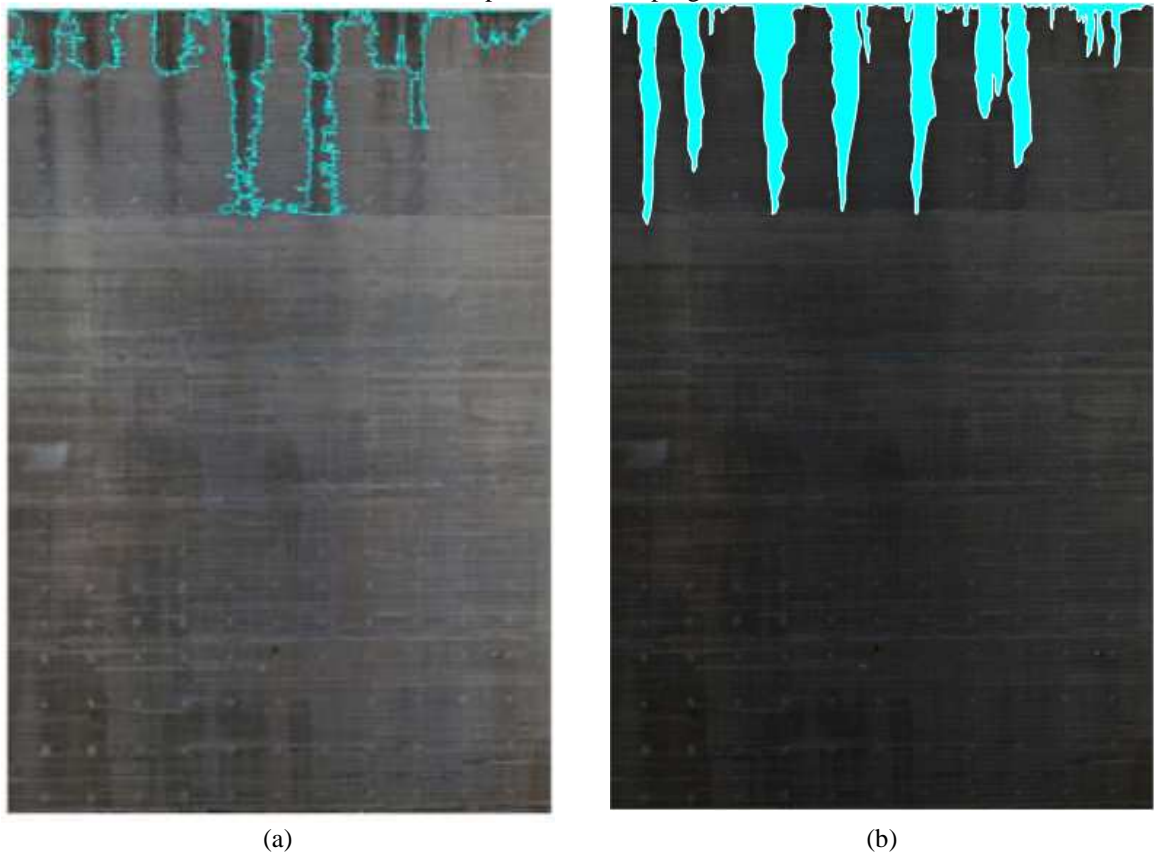
Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.
Fonte: Próprio autor.

O Quadro 61 apresentou os resultados para a classificação nos espaços de cor RGB e escala de cinza para mapeamento das manchas, para os valores de $k = 4$ e $k = 5$. Nos dois primeiros modelos, notou-se que, para o valor de $k = 4$, o aumento do valor da área mínima e área máxima não influenciou no resultado da classificação que se manteve o mesmo para o espaço escala de cinza. Para o espaço RGB, em relação à mesma área mínima e máxima, 100.000 e 200.000 píxeis, o aumento do valor de k influenciou no percentual da área de classificação, alcançando o valor de 5,10%.

Para estes experimentos realizados anteriormente, os melhores resultados obtidos foram resultados satisfatórios (RS), pois, ao determinar a área mínima e máxima para a classificação, parte das manchas deixaram de ser classificadas.

O resultado que está ilustrado na Figura 222 (b) foi realizado manualmente em programa CAD, com duração aproximada de 11 minutos, e identificando um valor de 5,9% de áreas com manchas escuras. O tempo gasto no Tyche (2015) foi de 1 minuto para a geração do mapa de danos nos espaços RGB, escalas de cinza e H, S e V.

Figura 222 – Mapa de danos do prédio da ANTAQ: (a) Mapa de danos do espaço RGB, área mínima de 100.000 píxeis e área máxima de 200.000 píxeis, $k = 5$ e com manipulação de brilho e contraste; (b) Mapa de danos criado por usuário em programa CAD



Fonte: Próprio autor.

6.4.1.3 Edifício B

A fachada do edifício residencial passou também por processamento no programa Tyche (2015), onde a seleção da amostra passou também por transformação dos espaços de cores. A seleção foi feita a partir do píxel 2.392 no eixo x e do píxel 1652 no eixo y, com uma caixa de

31 x 28 píxeis. Ressalta-se que esta posição é da imagem geral e não somente do contorno da edificação.

Figura 223 – Ortoimagem e seleção da amostra no edifício B

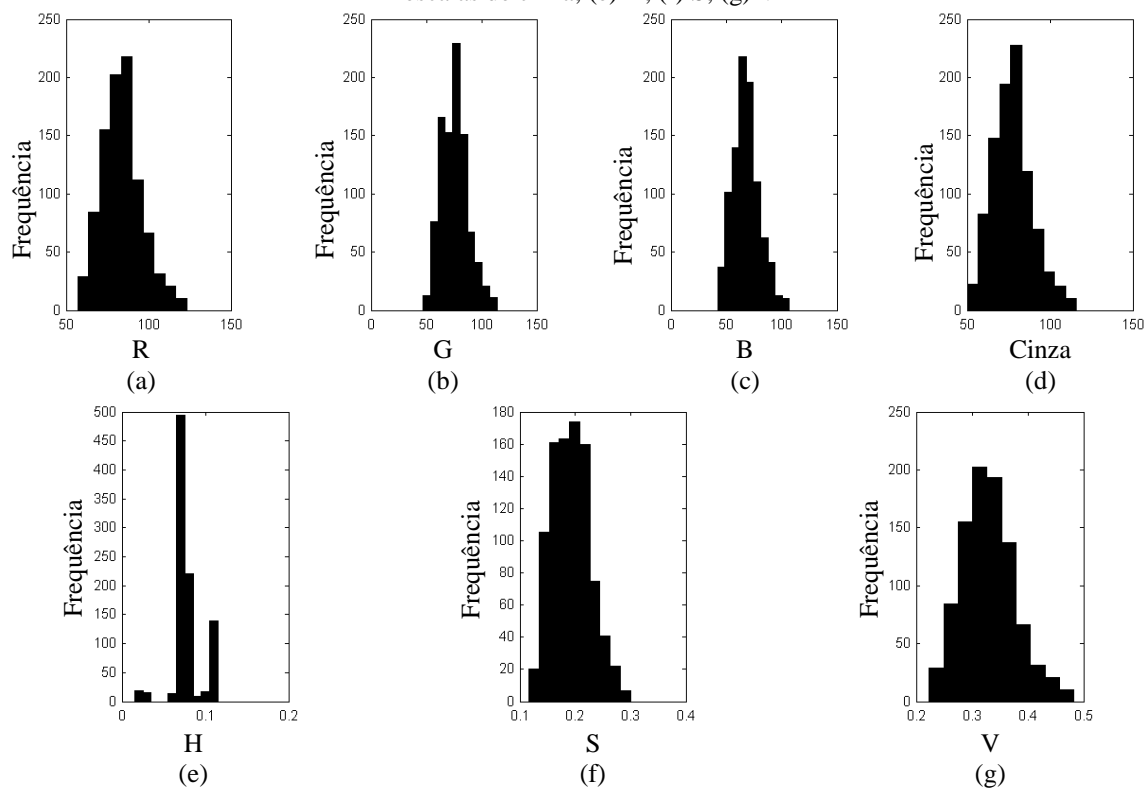


Fonte: próprio autor.

Análise da classificação por espaços de cores

A Figura 224 apresenta as distribuições de frequência de píxeis para os espaços R, G, B, escalas de cinza, H, S e V, para amostra selecionada do padrão de mancha contida na sacada e $k = 1$.

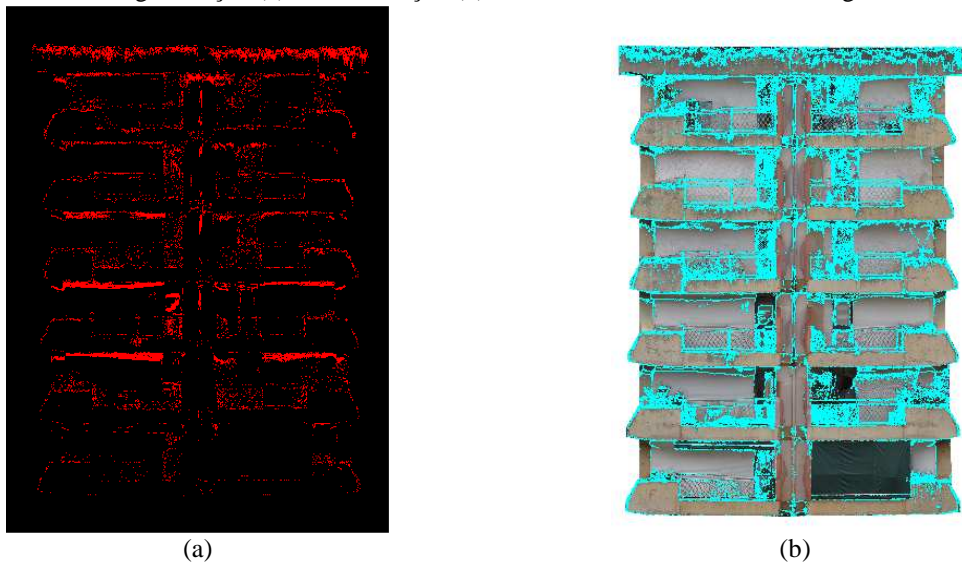
Figura 224 - Distribuições de frequência de píxeis das manchas escuras do edifício B: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V



Fonte: próprio autor.

Como esperado, os resultados não foram satisfatórios, pois a fachada, diferentemente das anteriores, apresenta diversos elementos com padrões de cores semelhantes ao padrão da amostra e, por tanto, muitas outras partes foram classificadas mesmo fora do padrão de interesse, como guarda-corpos de sacadas, vidros de janelas e outros. A Figura 225 apresenta uma imagem da classificação no espaço de cores RGB.

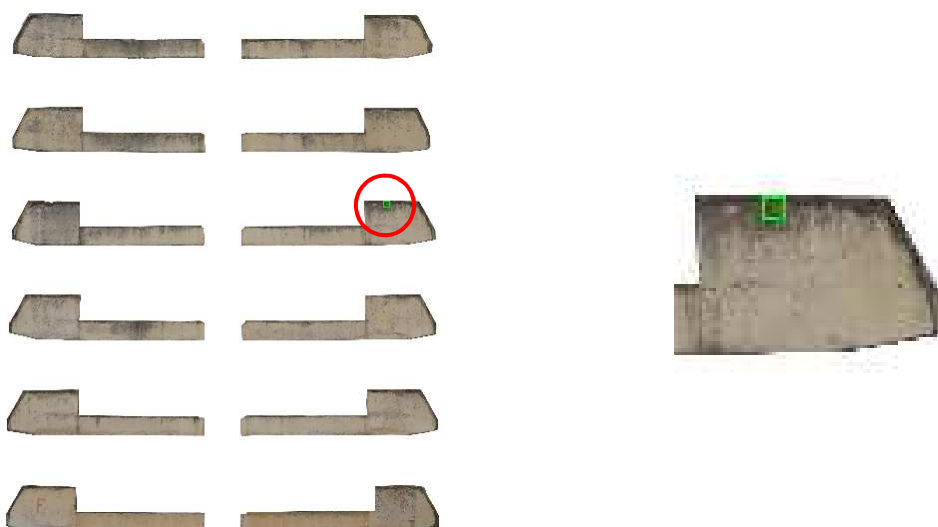
Figura 225 – Segmentação (a) e classificação (b) das manchas escuras em ortoimagem do edifício B



Fonte: Próprio autor.

Pensando em realizar a classificação próxima de um resultado satisfatório, uma alternativa foi adotada para eliminar os riscos de uma classificação indesejada. De modo geral, as classificações podem ser realizadas separando os elementos por características semelhantes em qualquer programa editor de imagem e, assim, evita-se que outras partes também sejam classificadas. A Figura 226 ilustra as sacadas da fachada do edifício B, separadas do restante da fachada para a etapa de classificação. A amostra selecionada do padrão de mancha pode ser visualizada na Figura 226.

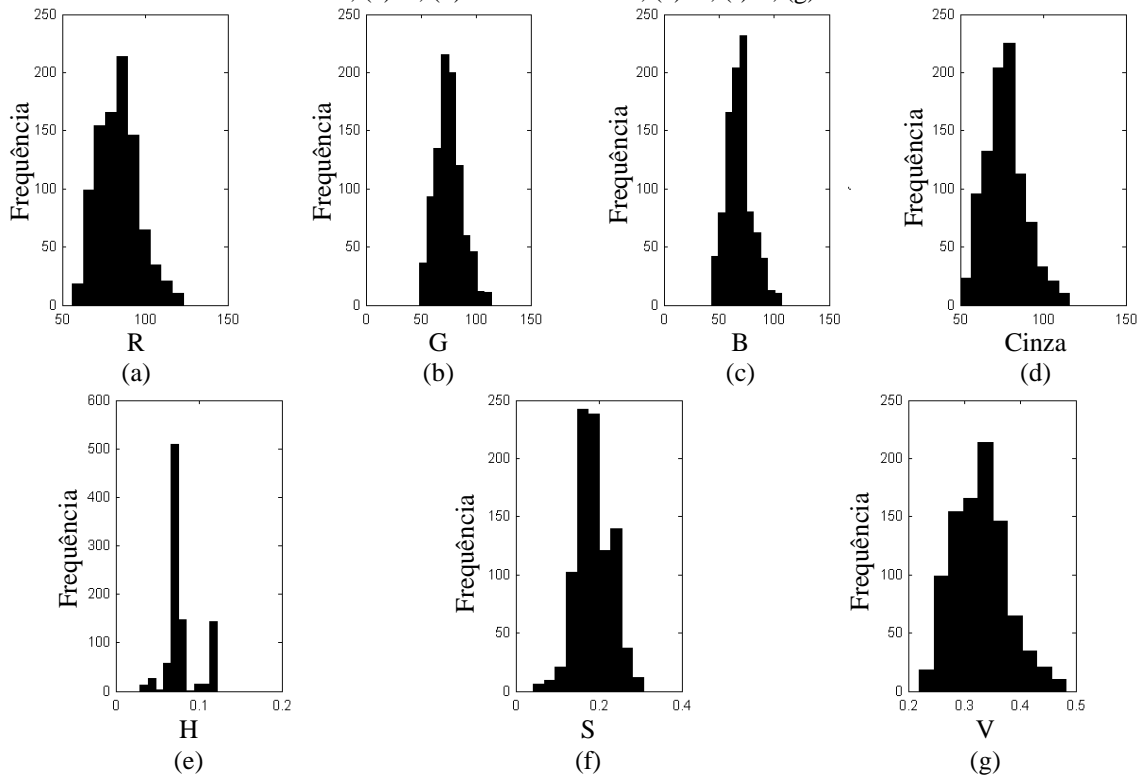
Figura 226 – Sacadas do edifício B e seleção da amostra



Fonte: Próprio autor.

As distribuições de frequência de píxeis para os espaços R, G, B, escalas de cinza, H, S e V estão ilustradas na Figura 227.

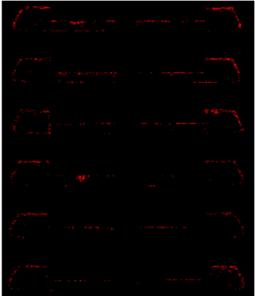
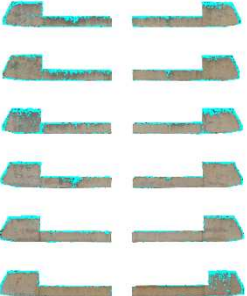
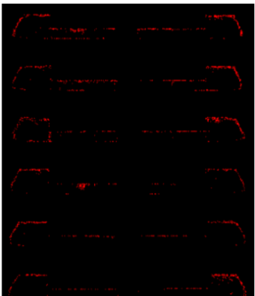
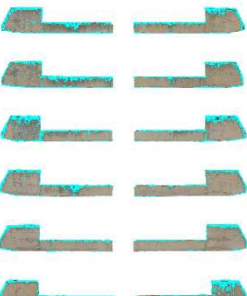
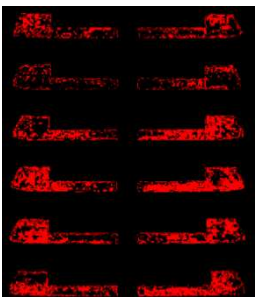
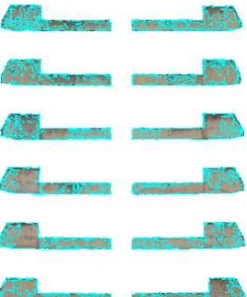
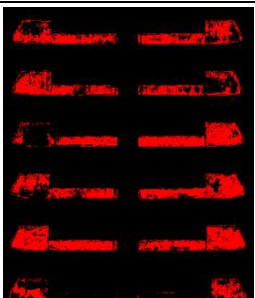
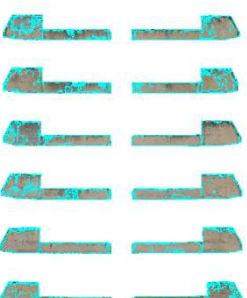
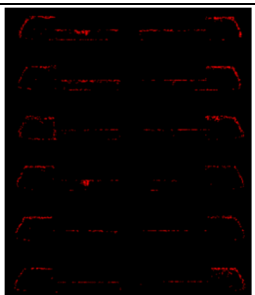
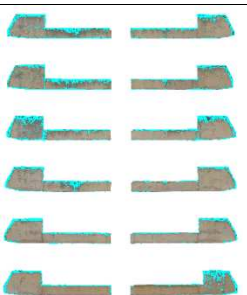
Figura 227 - Distribuições de frequência de píxeis para manchas da sacada do edifício residencial: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V



Fonte: próprio autor.

Os resultados da classificação nos espaços RGB, escalas de cinza, H, S e V estão presentes no Quadro 62, para valor de $k = 1$. Os resultados para a classificação nos espaços de cores RGB, escalas de cinza e V foram satisfatórios, apresentando, respectivamente, os valores de: 0,07%, 0,10% e 0,10%. Para os espaços de cores H e S, os resultados não foram satisfatórios, apresentando valores de 0,95% e 1,22%. Analisando as distribuições, notam-se semelhanças entre as frequências pertencentes aos espaços R, G, B, escalas de cinza e V, justificando os melhores resultados, apresentados no Quadro 62.

Quadro 62 – Edifício B. Espaços de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação em ortomagem sem manipulação de contraste

Espaço de cores	Percentual da classificação (%)	Segmentação	Classificação	Qualificação
RGB	0,07			MS
Escalas de cinza	0,10			MS
H	0,95			NS
S	1,22			NS
V	0,10			MS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: Próprio autor.

Análise da classificação por valores de k

Mapas de danos foram criados para o edifício B com valores de $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$, espaço RGB. A classificação com valores maiores de k abrangeu regiões com padrões distintos da amostra pela seleção, principalmente para $k = 4$ e $k = 5$.

Quadro 63 – Edifício B: segmentação e classificação para valores de $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$, espaço RGB

Para $k = 2$		Para $k = 3$	
Segmentação	Classificação	Segmentação	Classificação
0,19%		0,31%	
(a)		(b)	
Para $k = 4$		Para $k = 5$	
Segmentação	Classificação	Segmentação	Classificação
0,46%		0,70%	
(c)		(d)	

Fonte: Próprio autor.

Para esta ortoimagem com presença de manchas escuras, os histogramas das distribuições de frequência de píxeis do espaço R, G e B apresentaram uma dispersão um pouco maior. Assim, os valores de $k = 1$ e $k = 2$ apresentaram uma classificação muito satisfatória (MS).

6.4.1.4 Congresso Nacional – Anexo I

Para o Congresso Nacional, Anexo I, foi selecionada somente parte da fachada da Câmara dos Deputados (modelo 3-CN-CD-O) por causa do tamanho do arquivo da ortoimagem e, conseqüentemente, custo computacional, para a geração de mapas de danos de manchas

escuras. Para esta fachada, foram realizadas as classificações em ortoimagem original (sem edição de imagem) e ortoimagem com manipulação de brilho e contraste no Photoshop. As ortoimagens possuem uma resolução de 5.480 x 5.672 píxeis, num total de 31.082.560 píxeis. A seleção foi feita a partir do píxel 516 no eixo x e do píxel 904 no eixo y , com uma caixa de seleção de 59 x 16 píxeis, sobre a formação de manchas escuras ocorridas na junta de controle.

Figura 228 – Fachada oeste do Anexo I do Congresso Nacional e seleção da amostra

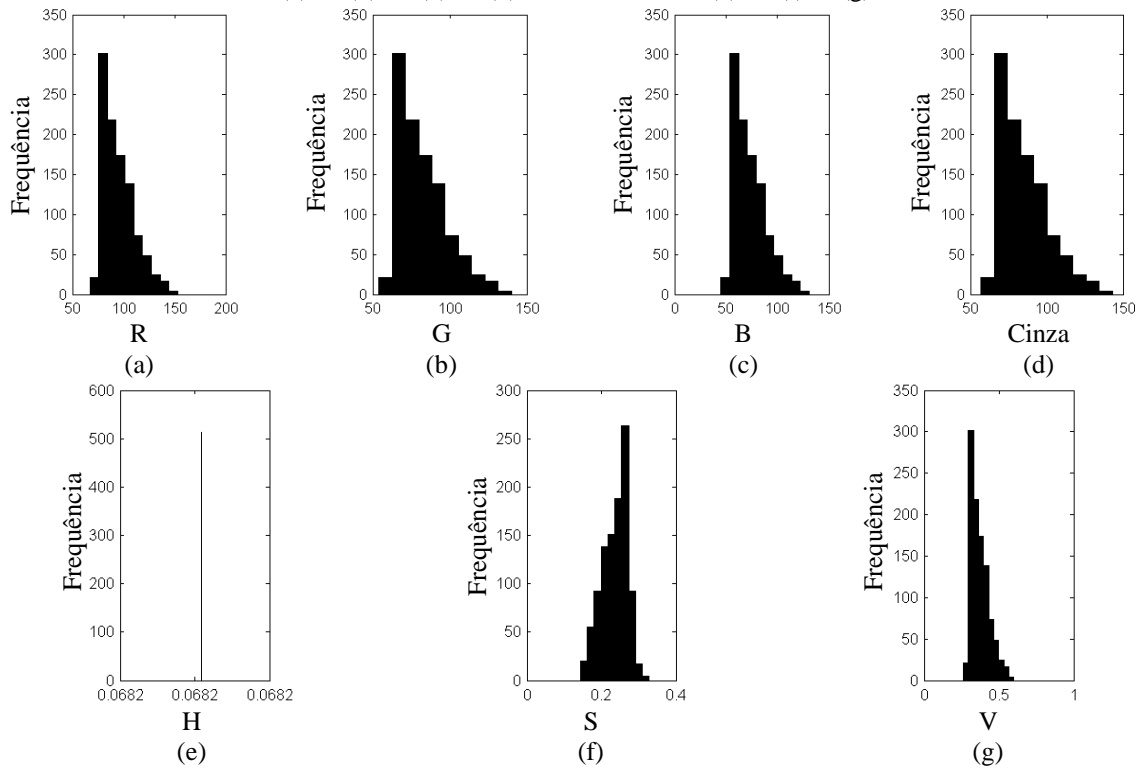


Fonte: Próprio autor.

Análise da classificação por espaços de cores

Na Figura 229, são apresentadas as distribuições de frequência de píxeis para os espaços R, G, B, escalas de cinza, H, S e V, para amostra selecionada do padrão de mancha contida na fachada.

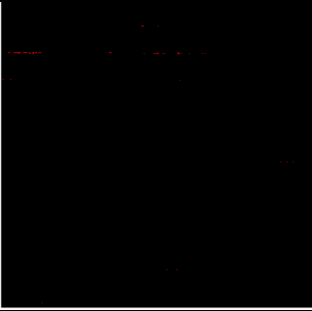

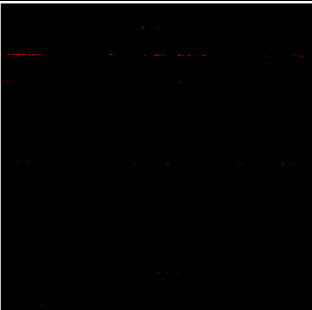

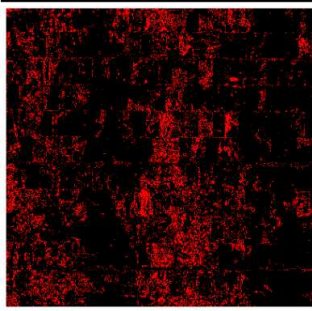
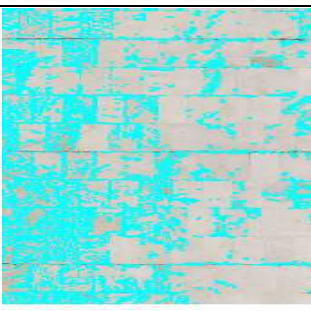
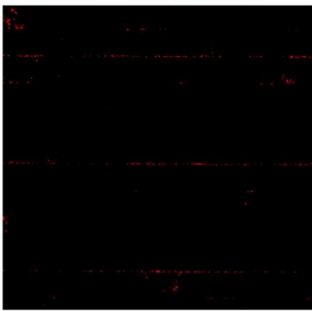

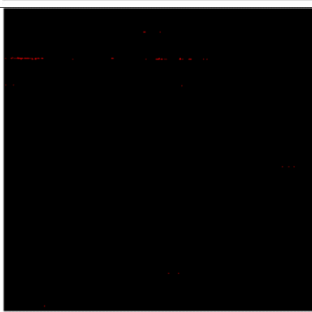

Figura 229 - Distribuições de frequência de píxeis das manchas escuras do Anexo I do Congresso Nacional:
 (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V



Fonte: próprio autor.

As distribuições de frequência dos espaços R, G, B e escalas de cinza apresentaram-se semelhantes, assim como há também uma ligeira semelhança com o espaço de cor V, e estas semelhanças podem ser comprovadas pelo resultado da classificação, presente no Quadro 64, em que os resultados para os espaços RGB, escalas de cinza e V foram, respectivamente, 0,05%, 0,07% e 0,06% para a classificação de manchas e valor de $k = 1$.

Quadro 64 – Anexo I do Congresso Nacional. Espaços de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação em ortoimagem sem manipulação de contraste

Esp. cores	Perc. Classif. (%)	Segmentação	Classificação	Qualif.
RGB	0,05			NS
Escala de cinza	0,07			NS
H	13,10			NS
S	0,38			NS
V	0,06			NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.
 Fonte: Próprio autor.





Os espaços de cores RGB, escalas de cinza e V apresentaram resultados não satisfatórios (NS) porque não classificaram todas as manchas para $k = 1$. Para os espaços S e V, os resultados também foram não satisfatórios (NS) pois classificaram, além das manchas escuras, as manchas próprias do mármore sobre a fachada.

Análise da classificação por valores de k

O Quadro 65 apresenta resultados com os valores de $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$, no espaço de cores RGB. Nestes casos, verificou-se também que à medida que os valores de k foram aumentados, mais imprecisos tornavam-se os resultados, pois os resultados classificaram as manchas características da textura do mármore presente na fachada do Anexo I do Congresso Nacional.

Para o valor de $k = 2$, o resultado apresentado foi não satisfatório, uma vez que muitas manchas não foram classificadas. A classificação para $k = 3$ apresentou o melhor resultado dentre estes valores de k , sendo considerado resultado satisfatório (RS). Ressalta que os histogramas das distribuições de frequência de píxeis do espaço R, G e B tiveram uma dispersão média. Os valores de $k = 4$ e $k = 5$ apresentaram resultados não satisfatórios (NS), pois classificaram, além das manchas escuras, manchas características do mármore.

Quadro 65 – Anexo I do Congresso Nacional: segmentação e classificação para valores de $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$

Para $k = 2$ Classificação (0,12%)	Para $k = 3$ Classificação (0,19%)
 <p>Qualificação: NS</p> <p>(a)</p>	 <p>Qualificação: RS</p> <p>(b)</p>
Para $k = 4$ Classificação (0,32%)	Para $k = 5$ Classificação (0,57%)
 <p>Qualificação: NS</p> <p>(c)</p>	 <p>Qualificação: NS</p> <p>(d)</p>

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

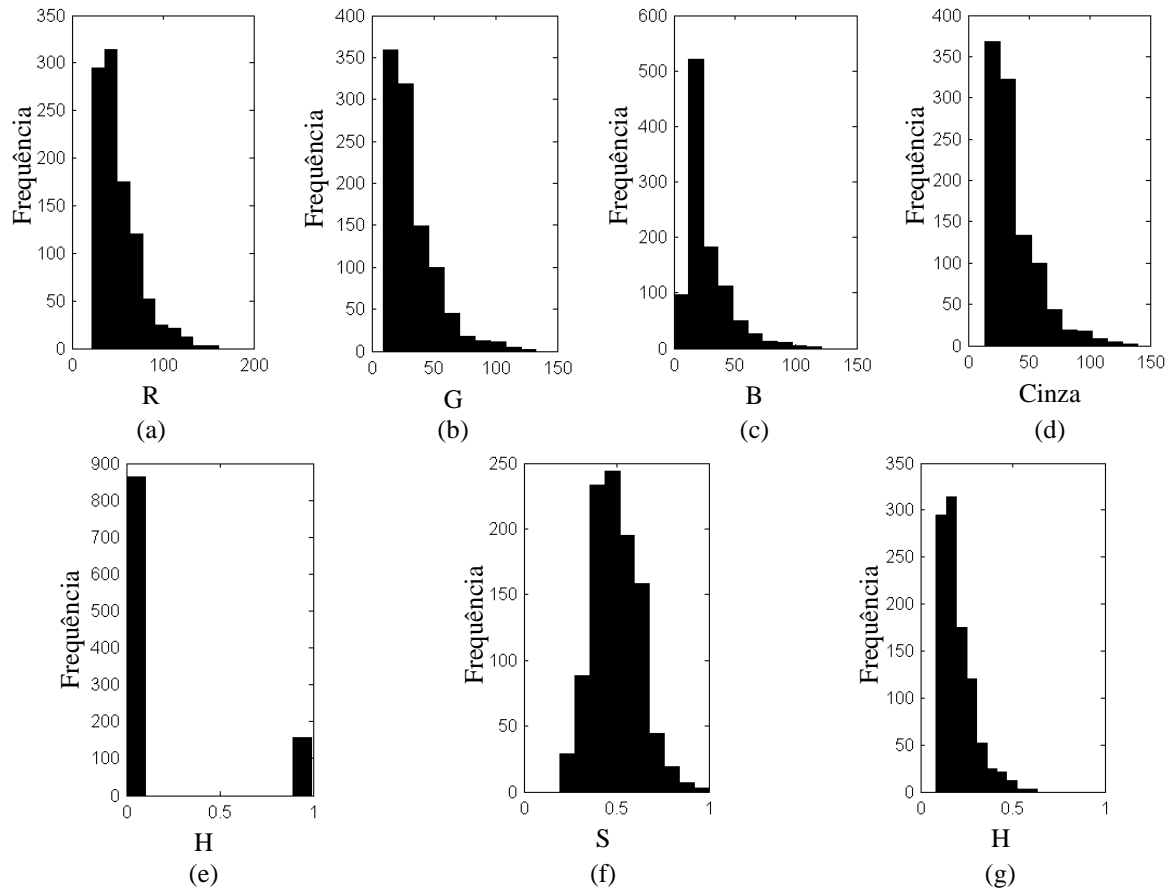
Fonte: Próprio autor.

Análise da classificação por espaços de cores e manipulação de contraste e brilho

Os histogramas da Figura 230 apresentam as distribuições de frequências de píxeis para a imagem do Anexo I do Congresso Nacional com manipulação de contraste e brilho realizada no Adobe Photoshop pelo modo automático. A proposta deste experimento foi obter melhores

resultados que os obtidos nos experimentos anteriores. Notou-se, em relação à imagem original, que a distribuição se aproximou do valor zero.

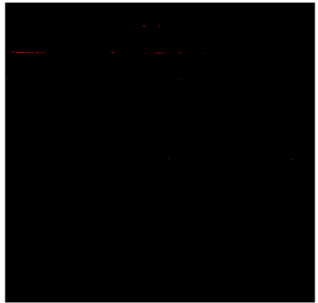

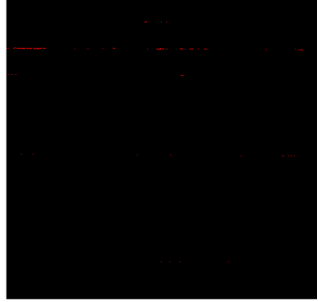

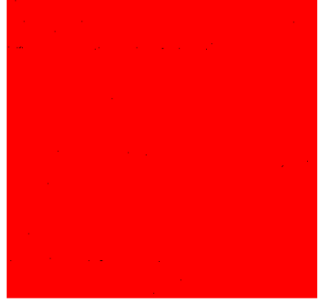

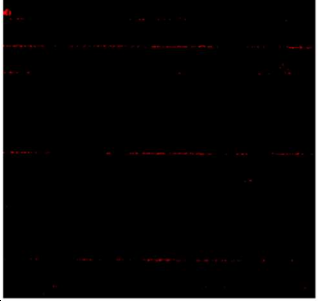

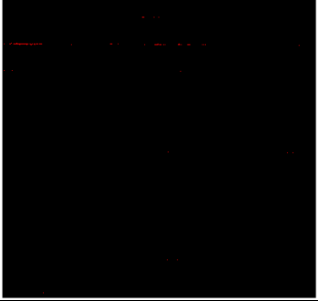

Figura 230 - Distribuições de frequência de píxeis das manchas escuras do Anexo I do Congresso Nacional, com manipulação de contraste e brilho: (a) R; (b) G; (c) B; (d) escalas de cinza; (e) H; (f) S; (g) V



Fonte: próprio autor.

Para o valor de $k = 1$, os resultados do mapeamento de manchas para fachada oeste do Anexo I do Congresso Nacional estão apresentados no Quadro 66.

Quadro 66 – Anexo I do Congresso Nacional. Espaços de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação em ortoimagem com manipulação de contraste

Esp. cores	Perc. Classif. (%)	Segmentação	Classificação	Qualif.
RGB	0,04			NS
Escalas de cinza	0,08			NS
H	100,00			NS
S	0,30			NS
V	0,06			NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: Próprio autor.

Para o valor de $k = 1$, como visto no Quadro 66, os resultados obtidos foram semelhantes aos resultados da imagem sem o tratamento da imagem, não satisfatórios (NS).

Análise da classificação por valores de k e o espaço de cor RGB

Em relação ao espaço de cor RGB, como se pode observar no Quadro 67, a manipulação de contraste e brilho na imagem reduziu a classificação para os valores de $k = 1$, $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$, em relação à imagem sem tratamento.

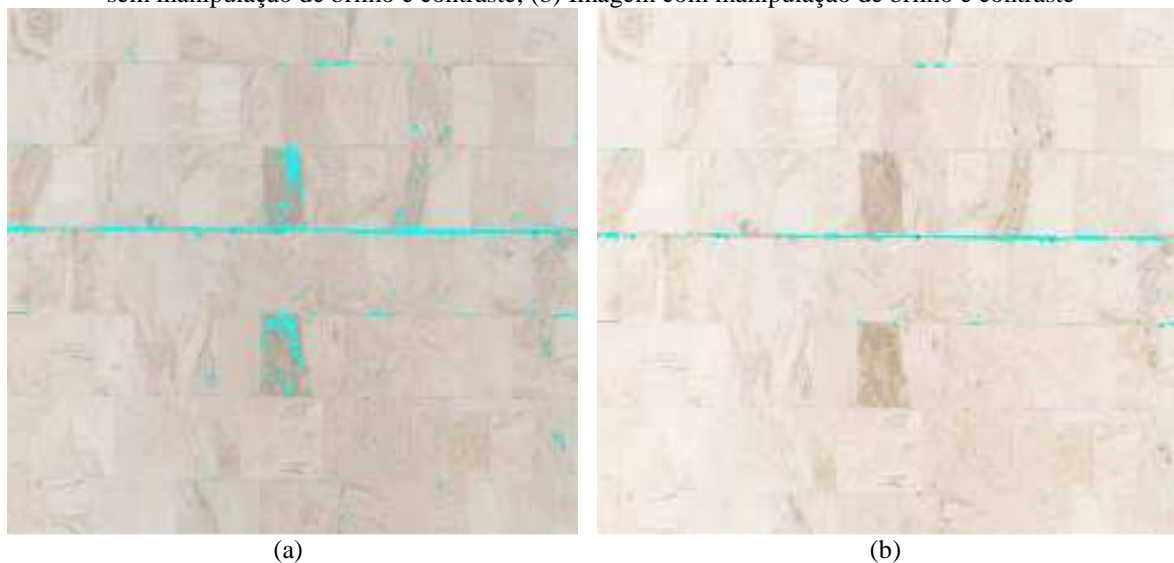
Quadro 67 – Anexo I do Congresso Nacional. Percentual de classificação no espaço de cor RGB, para $k = 1$, $k = 2$, $k = 3$, $k = 4$ e $k = 5$

Ortoimagens	Classificação (%)				
	Valores de k				
	1	2	3	4	5
Ortoimagem original	0,05	0,12	0,19	0,32	0,57
Ortoimagem com manipulação de brilho e contraste	0,04	0,10	0,15	0,21	0,28

Fonte: Próprio autor.

As manchas características do mármore nos modelos com manipulação de contraste e brilho não foram classificadas como manchas escuras, diferentemente das imagens sem a manipulação de contraste e brilho, e comprovou-se que o aumento do contraste pode ser usado para melhorar os resultados. A transformação radiométrica em cada píxel por manipulação de brilho e contraste aumentaram a discriminação entre as manchas e superfícies da fachada, ou seja, aumentaram as suas distinções, favorecendo a classificação de todas as manchas sem serem detectadas as manchas do revestimento. A Figura 231 apresenta duas imagens ampliadas da mesma parte da fachada do Congresso Nacional, em que uma foi sem manipulação de contraste e brilho e a outra com a manipulação, e verifica-se que com manipulação de contraste e brilho as manchas características do mármore não foram classificadas. A classificação destas imagens é do resultado para $k = 5$.

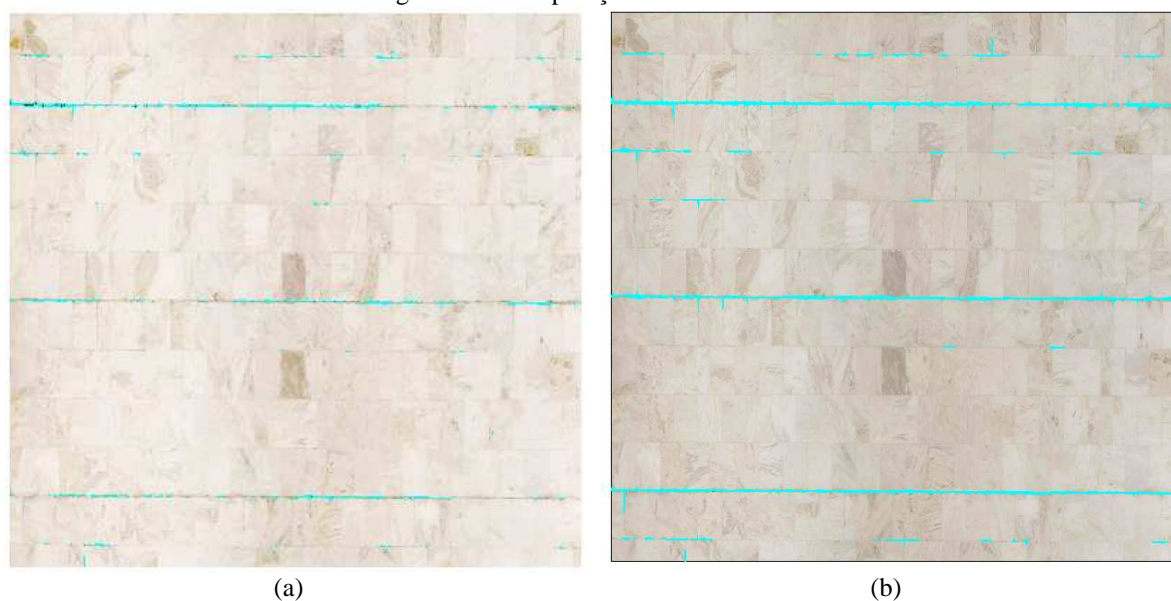
Figura 231 – Resultados da classificação do Congresso Nacional, Anexo I, com valor de $k = 5$: (a) Imagem sem manipulação de brilho e contraste; (b) Imagem com manipulação de brilho e contraste



Fonte: Próprio autor.

A classificação realizada para o valor de $k = 4$ apresentou resultado muito satisfatório (MS), pois todas as manchas escuras presentes foram classificadas, sem serem incluídas também as manchas características do mármore. A Figura 232 apresenta a classificação das manchas escuras formadas próximas às juntas de controle e assentamento do revestimento em mármore pelo programa Tyche (2015) e o mapeamento por processo manual, realizado em programa CAD por usuário.

Figura 232 – (a) Resultados da classificação do Congresso Nacional, Anexo I, com valor de $k = 4$ em imagem com manipulação de brilho e contraste; (b) Classificação realizada por usuário em programa CAD em imagem sem manipulação de brilho e contraste



Fonte: Próprio autor.

O percentual de manchas classificado pelo usuário foi de 1,14% da fachada e foram gastos 39 minutos no mapeamento. Para $k = 4$, o percentual de manchas foi de 0,21%. Devido à alta resolução da imagem, o programa Tyche (2015) gerou os mapas de danos em 1 hora e 20 minutos para criar os mapas de danos nos espaços de cores RGB, escalas de cinza, H, S e V. Se considerado que o usuário classificou somente em um espaço de cor, o programa realizou a classificação num menor tempo. Notou-se a semelhança entre os dois resultados em termos de regiões da fachada classificadas, mas o percentual do mapa gerado pelo usuário foi significativamente maior devido aos procedimentos de contorno dos danos que são pouco precisos.

Importante destacar que o usuário não havia visto anteriormente à execução o resultado do Tyche (2015), e ambos os resultados são muito similares, não em função da alta precisão do usuário, mas alta acurácia.

6.4.2 Mapas de danos gerados no Detecta Fissura (2016)

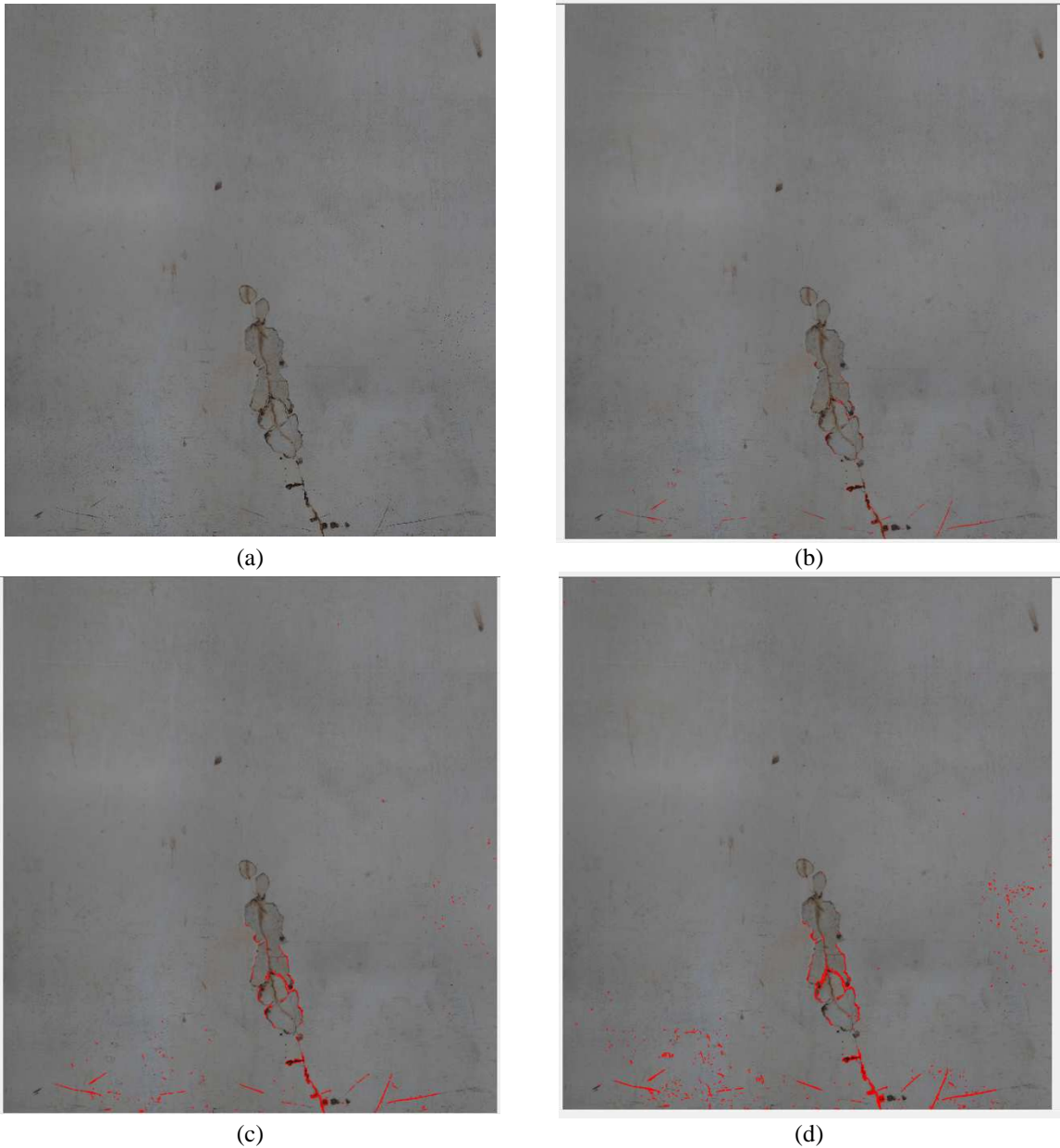
Neste subitem, serão apresentadas as detecções de fissuras geradas no programa Detecta Fissura (2016) para as ortoimagens do Museu Nacional Honestino Guimarães e da Biblioteca Central da UnB. Os resultados foram obtidos por meio da especificação de valores de limiares e σ , além da opção do operador de dilatação, pré-indicados pelo programa e também a partir de valores aleatórios estipulados pelo usuário a fim de obter os melhores resultados ou avaliar, empiricamente, outras especificações de valores.

6.4.2.1 Museu Nacional Honestino Guimarães

Os experimentos apresentados neste subitem foram realizados em parte de ortoimagem da fachada do Museu Nacional Honestino Guimarães e na ortoimagem da Biblioteca Central da UnB. Como demonstrado no subitem 5.4.5 por meio de medições, estas fissuras possuem larguras que variaram de 0,045 mm até 0,1 mm.

A Figura 233 apresenta os resultados obtidos com o operador Sobel. A Figura 233 (b) foi por meio do operador Sobel sem dilatação e o resultado foi não satisfatório (NS). Para as Figura 233 (c) e Figura 233 (d), com dilatação 5×5 e 7×7 , respectivamente, os resultados foram também não satisfatórios (NS).

Figura 233 - (a) Imagem original; (b) Fissuras detectadas com operador Sobel e sem dilatação; (c) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 5x5; (d) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 7x7



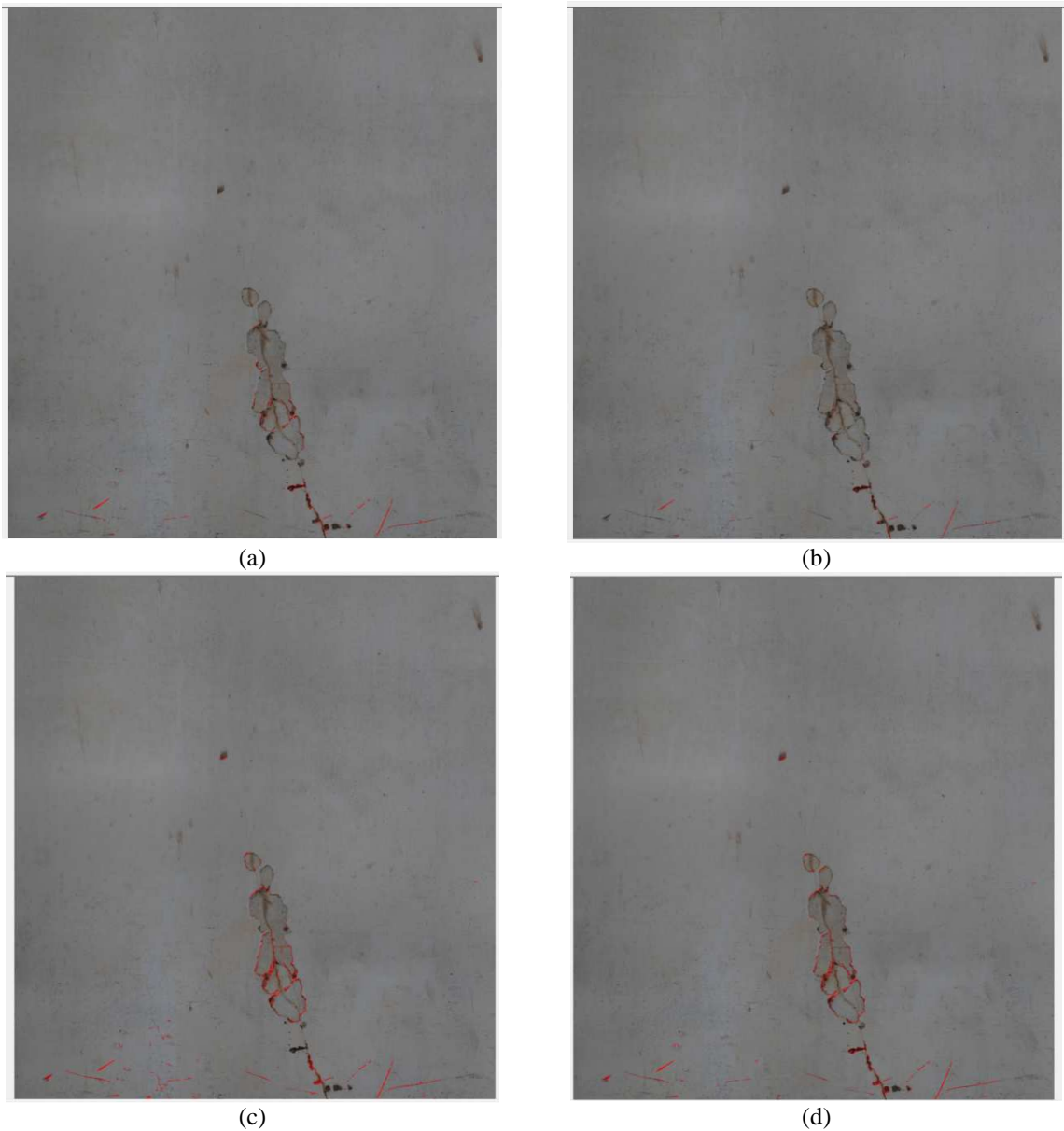
Fonte: próprio autor.

Nos resultados apresentados na Figura 233, partes não pertencentes às fissuras foram classificadas, como as bordas da descamação da pintura e manchas em formato de riscos.

A Figura 234 apresenta as fissuras detectadas por operador Canny, sem dilatação, em que: a Figura 234 (a) possui classificação com limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 0,5$; a Figura 234 (b) possui classificação com limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 30% e $\sigma = 1$; a Figura 234 (c) possui classificação com limiar máximo de 20%, limiar mínimo

de 10% e $\sigma = 1$; e a Figura 234 (d) possui classificação com limiar máximo de 20%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 3$.

Figura 234 – Fissuras detectadas com operador Canny sem dilatação: (a) Limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 0,5$; (b) Limiar máximo de 50%, limiar mínimo de 30% e $\sigma = 1$; (c) Limiar máximo de 20%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 1$; (d) Limiar máximo de 20%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 3$

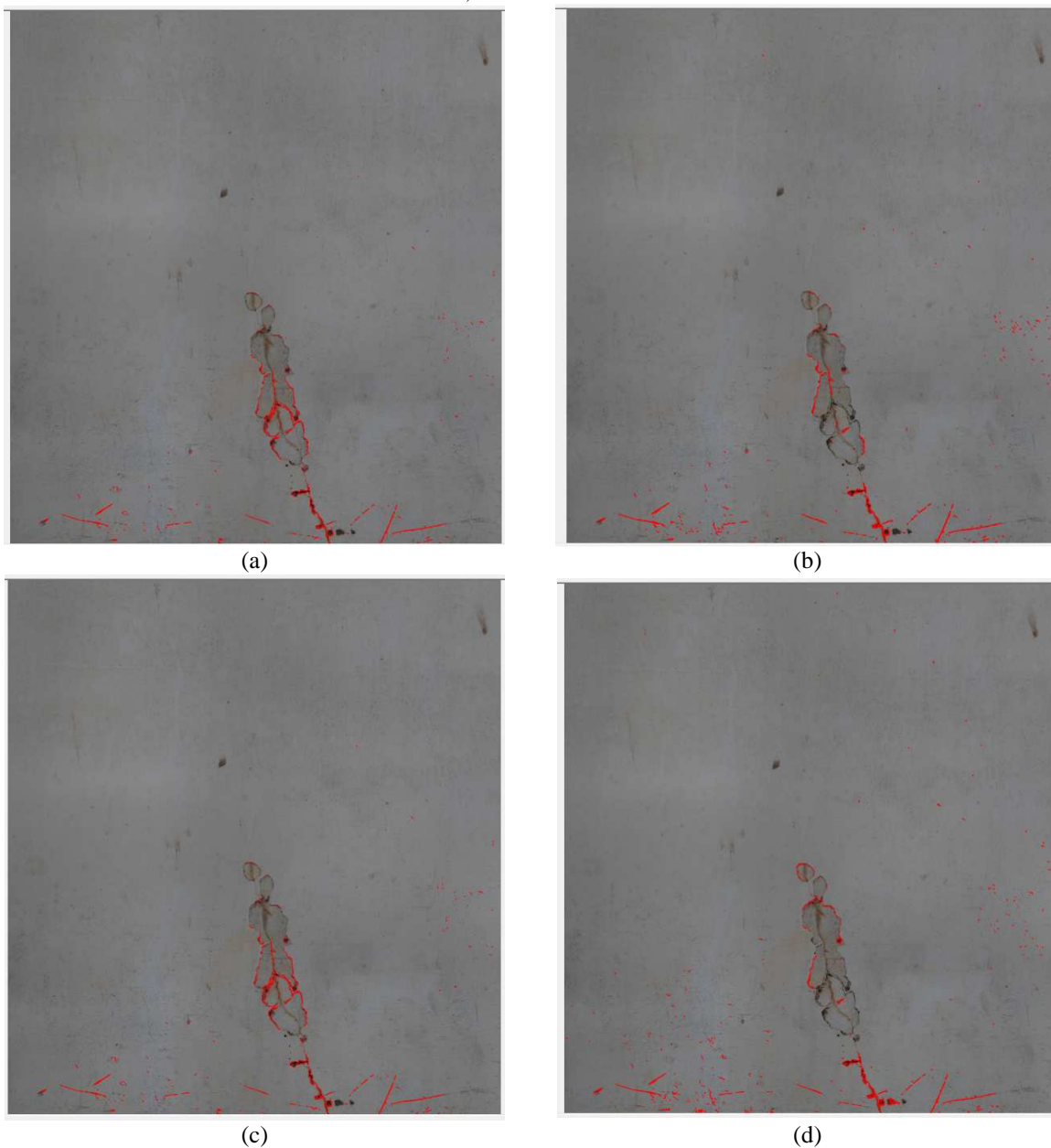


Fonte: próprio autor.

Nestes experimentos, os resultados obtidos usando o operador Canny, valores de limiares e sigma foram não satisfatórios (NS).

A Figura 235 apresenta resultados utilizando operadores de dilatação 5x5 e dilatação 7x7.

Figura 235 – Fissuras detectadas com operador Canny: (a) Dilatação 5x5, limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 0,5$; (b) Dilatação 7x7, limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 0,5$; (c) Dilatação 5x5, limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 10% e $\sigma = 5$; (d) Dilatação 5x5, limiar máximo de 20%, limiar mínimo de 15% e $\sigma = 5$

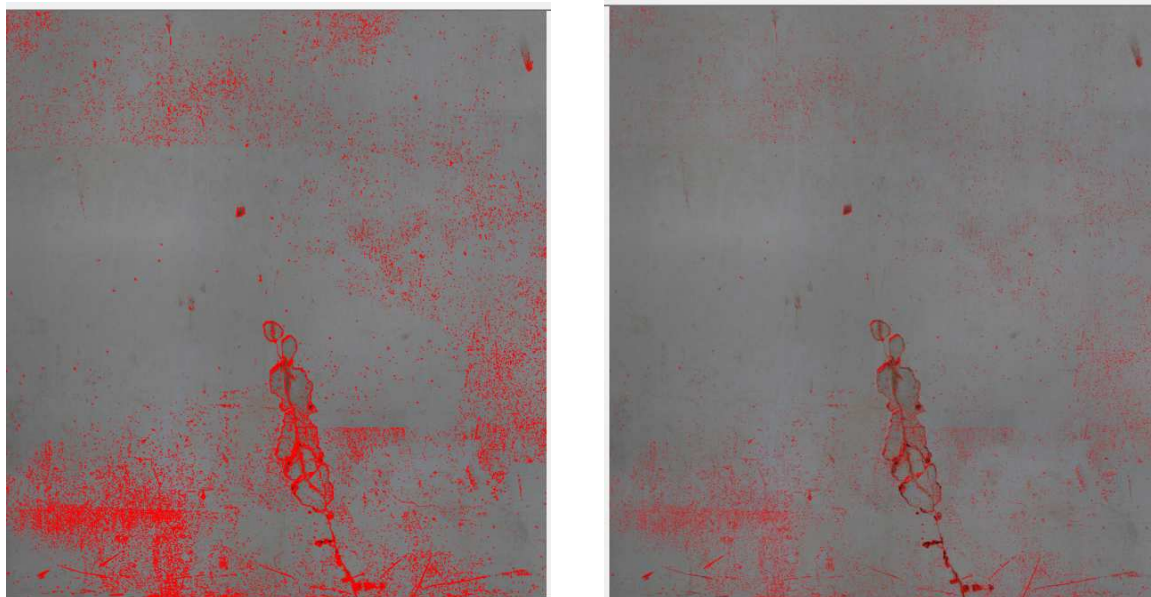


Fonte: próprio autor.

Os resultados obtidos também foram não satisfatórios (NS). As imagens das Figura 235 (a) e Figura 235 (c) foram obtidas com valores iguais de limiares e dilatação, e valores distintos de $\sigma = 0,5$ e $\sigma = 5$, respectivamente, e notou-se que estes valores não influenciaram nos resultados de detecção das fissuras.

A Figura 236 apresenta resultados de experimentos com operador Canny, limiar máximo de 10%, limiar mínimo de 5% e $\sigma = 5$, diferenciando-os entre resultado com dilatação 5x5 e sem dilatação.

Figura 236 – Fissuras detectadas com operador Canny: (a) Dilatação 5x5, limiar máximo de 10%, limiar mínimo de 5% e $\sigma = 5$; (b) Sem dilatação, limiar máximo de 10%, limiar mínimo de 5% e $\sigma = 5$



(a)

(b)

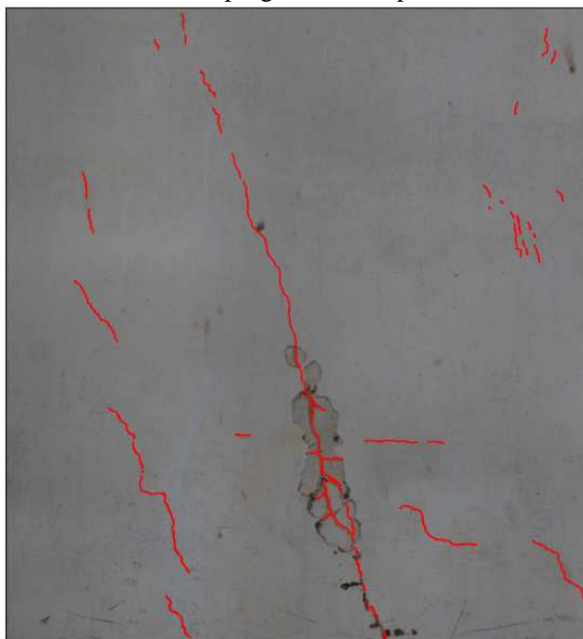
Fonte: próprio autor.

A Figura 236 (a) apresentou maior número de ruídos devido ao operador de dilatação e ambos os resultados foram não satisfatórios (NS), pois nem todas as fissuras foram detectadas.

Para as ortoimagens do Museu Nacional Honestino Guimarães, não foram gerados resultados com o removedor de ruídos, já que nenhum experimento apresentou-se como resultado satisfatório (RS). Para os resultados obtidos pelo Detecta Fissura (2016), o tempo de duração para a geração dos mapas de danos pelo operador Sobel foi de aproximadamente 9 min e para o operador Canny foi de 11 minutos.

A Figura 237 apresenta a realização dos mapas de danos das fissuras na ortoimagem do museu realizada por usuário em programa CAD. O tempo para realização do mapa de dano foi de 63 min.

Figura 237 – Museu Nacional: mapa de fissuras realizado em programa CAD por usuário



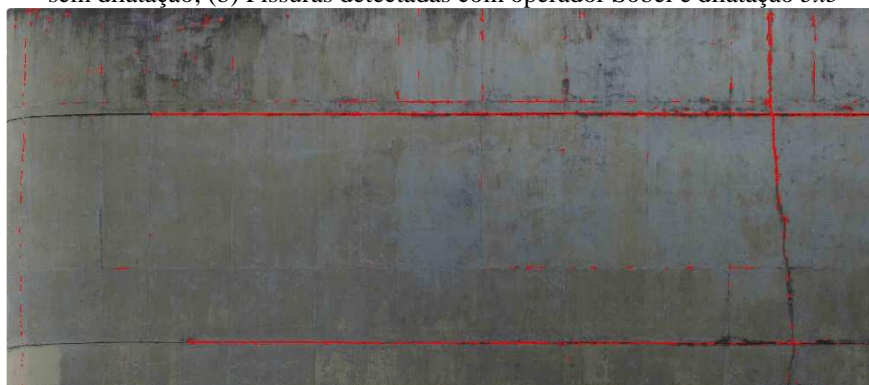
Fonte: próprio autor.

6.4.2.2 Biblioteca Central da UnB

Relembrando, as fissuras da Biblioteca Central possuem fissuras maiores que 3 mm, como apresentado no subitem 5.4.3.

A Figura 238 (a) apresenta o resultado da detecção de fissuras na Biblioteca Central da UnB feita por operador Sobel e a Figura 238 (b) o resultado por meio do operador Sobel e dilatação 5x5.

Figura 238 – Biblioteca Central: (a) Fissuras detectadas com operador Sobel e sem dilatação; (b) Fissuras detectadas com operador Sobel e dilatação 5x5



(a)



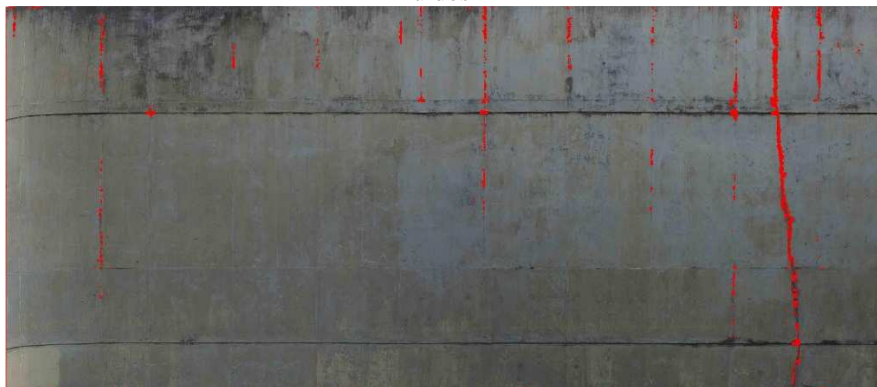
(b)

Fonte: próprio autor.

Na Figura 238 (a), além das fissuras existentes, as manchas escuras formadas sobre frisos (elementos horizontais da fachada) também foram classificadas devido ao formato linear de ambos os danos. De certa maneira, a classificação das manchas sobre os frisos demonstra a eficiência do programa, uma vez que estas se assemelham pela sua forma. No entanto, foi atribuído o resultado não satisfatório (NS) para este experimento. A Figura 238 (b) apresentou um resultado não satisfatório (NS) também, porque as manchas escuras formadas sobre outras partes da fachada também foram classificadas.

A Figura 239 apresenta a classificação com o operador Sobel, dilatação 5x5 e com remoção de ruídos.

Figura 239 - Fissuras detectadas com operador Sobel, dilatação 5x5 e remoção de ruídos



Fonte: próprio autor.

O resultado presente na Figura 239 foi considerado somente como satisfatório (RS), pois algumas fissuras presentes não foram classificadas.

A Figura 240 apresenta os resultados obtidos com o operador Canny, em que a Figura 240 (a) foi obtida sem dilatação, com limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 25% e $\sigma = 1$, e a Figura 240 (b) com dilatação 5x5, limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 25% e $\sigma = 1$.

A Figura 240 (a), obtida pelo operador Canny, apresenta semelhanças na classificação com a Figura 238 (b), com manchas formadas sobre os frisos também classificadas. No entanto, algumas fissuras foram detectadas por este operador, caso não observado com o operador Sobel, como ilustrado na Figura 241. O resultado da Figura 240 (a) foi considerado também não satisfatório (NS), assim como o resultado obtido na Figura 240 (b), pois manchas escuras formadas sobre a fachada também foram classificadas.

A Figura 242 apresenta o resultado do operador Canny, com dilatação 5x5, limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 25%, $\sigma = 1$ e remoção de ruídos. O resultado foi considerado muito satisfatório (MS), pois as fissuras foram classificadas e as formações de manchas, antes classificadas, foram excluídas da classificação pela própria ferramenta do programa com interação do usuário.

A Figura 243 apresenta o resultado do mapa de danos das fissuras da fachada do Museu Nacional realizado por usuário em programa CAD.

Figura 240 – Biblioteca Central: (a) Fissuras detectadas com operador Canny, sem dilatação, limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 25% e $\sigma = 1$; (b) Fissuras detectadas com operador Canny, dilatação 5x5, limiar máximo de 30%, limiar mínimo de 25% e $\sigma = 1$



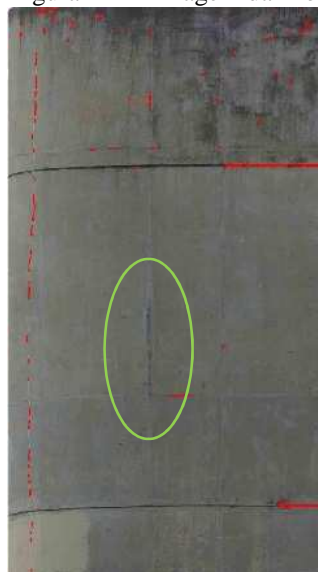
(a)



(b)

Fonte: próprio autor.

Figura 241 – Imagem da Biblioteca Central: (a) Operador Sobel; (b) Operador Canny



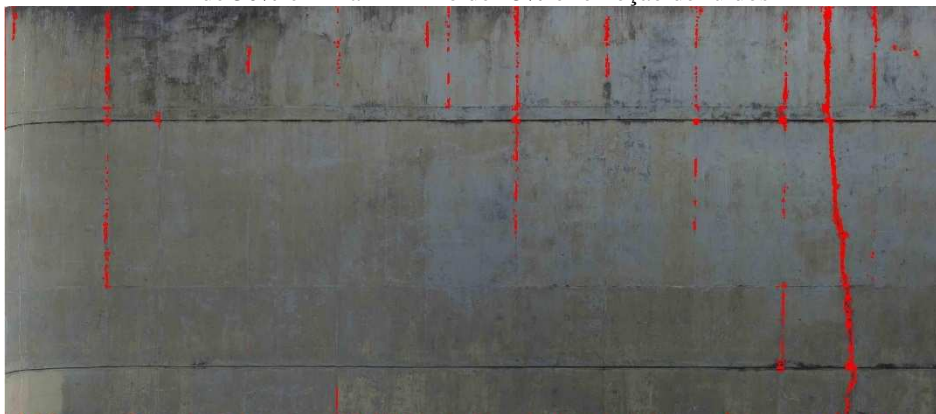
(a)



(b)

Fonte: próprio autor.

Figura 242 – Fissuras detectadas com operador Canny, dilatação 5x5, limiar máximo de 30% e limiar mínimo de 25% e remoção de ruídos



Fonte: próprio autor.

Figura 243 – Biblioteca Central: mapa de fissuras realizado em programa CAD por usuário



Fonte: próprio autor.

O resultado obtido pelo operador Canny, com remoção de ruídos (Figura 242), foi similar ao mapa gerado por usuário. Em relação aos tempos gastos em cada método e operador, têm-se: a detecção realizada com operador Sobel teve a duração de 1 minuto e 20 segundos; a detecção feita com o operador Canny teve a duração de 2 minutos, sendo a remoção dos ruídos em torno de 11 minutos; e a detecção manual das fissuras realizada pelo usuário durou 22 minutos.

Assim, o tempo realizado pelo programa Detecta Fissura (2016) mais a realização da remoção de ruídos foi menor que o procedimento realizado pelo usuário, demonstrando a vantagem em se empregar este método. O operador Sobel apresentou menor tempo de processamento, porém os resultados alcançados pelo operador Canny foram mais satisfatórios.





Algumas das fissuras observadas na fachada da Biblioteca Central da UnB possuem largura maior que 3 mm e, por esta característica e pelas especificações técnicas da câmera utilizada,

possibilitaram serem visualizadas e favoreceram a detecção pelo programa Detecta Fissura (2016).

6.4.3 Quadros-resumo das manifestações patológicas classificadas em ortoimagens

No Quadro 68, é apresentado o resumo da formação de manchas escuras em ortoimagens de edificações processadas em programas de fotogrametria digital e detectados pelo programa Tyche (2016), em função exclusiva dos valores de k . Os melhores resultados obtidos estão apresentados em destaque para os quadros a seguir.

Quadro 68 - Quadro-resumo das manifestações patológicas detectadas em ortoimagens no programa Tyche (2015)



Ortoimagem	Espaço de cor	Valor de k	Área (%)	Qualificação
 Biblioteca Central da UnB	RGB	1	6,40	MS
	Escala de cinzas		8,31	MS
	H		98,54	NS
	S		49,50	NS
	V		8,12	MS
	RGB	3	39,37	NS
		5	80,52	NS
 ANTAQ	RGB	1	2,14	NS
	Escala de cinzas		3,23	NS
	H		55,98	NS
	S		58,64	NS
	V		2,42	NS
 Edifício residencial B	RGB	1	0,07	MS
	Escala de cinzas		0,10	MS
	H		0,95	NS
	S		1,22	NS
	V		0,10	MS
 Câmara dos deputados - Congresso Nacional, Anexo I	RGB	1	0,05	NS
	Escala de cinzas		0,07	NS
	H		13,10	NS
	S		0,38	NS
	V		0,06	NS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.
 Fonte: próprio autor.

A detecção dos danos em função exclusivamente dos valores de $k = 1$ apresentou-se resultados muito satisfatórios (MS) para a fachada da Biblioteca Central e para o edifício residencial C, nos espaços RGB, escalas de cinza e V. Para outras ortoimagens, foram necessários outros procedimentos, como manipulação de contraste e classificação por valor máximo e mínimo de área do dano.

O Quadro 69 apresenta o resumo dos resultados obtidos por meio da detecção de fissuras em ortoimagens, e dos operadores Sobel e Canny, assim como operadores de dilatação, limiar máximo e mínimo, valores de σ e removedor de ruídos. Para a fachada da Biblioteca Central da UnB, o melhor resultado obtido foi por meio do operador Canny e com a aplicação da remoção de ruídos. Para o Museu Nacional Honestino Guimarães, não se obteve nenhum resultado satisfatório (RS) ou muito satisfatório (MS).

Quadro 69 - Quadro-resumo das fissuras detectadas em ortoimagens no programa Detecta Fissura (2016)

Ortoimagem	Operador	Dilatação	Limiar (%)		Sigma	Remoção de ruídos	Qualificação
			Máximo	Mínimo			
 <p>Museu Nacional Honestino Guimarães</p>	Sobel	Sem dilatação	-	-	-	Não	NS
		Dilatação 5x5	-	-	-	Não	NS
		Dilatação 7x7	-	-	-	Não	NS
	Canny	Sem dilatação	30	10	0,5	Não	NS
		Sem dilatação	50	30	1	Não	NS
		Sem dilatação	20	10	1	Não	NS
		Sem dilatação	20	10	3	Não	NS
		Dilatação 5x5	30	10	0,5	Não	NS
		Dilatação 7x7	30	10	0,5	Não	NS
		Dilatação 5x5	30	10	5	Não	NS
		Dilatação 5x5	20	15	5	Não	NS
		Dilatação 5x5	10	5	5	Não	NS
Sem dilatação	10	5	3	Não	NS		
 <p>Biblioteca Central da UnB</p>	Sobel	Sem dilatação	-	-	-	Não	NS
		Dilatação 5x5	-	-	-		NS
		Dilatação 5x5	-	-	-	Sim	RS
	Canny	Sem dilatação	30	25	1	Não	NS
		Dilatação 5x5	30	25	1		NS
		Dilatação 5x5	30	25	1	Sim	MS

Legenda: MS – Muito satisfatório. RS – Satisfatório. NS – Não satisfatório.

Fonte: próprio autor.

6.5 DISCUSSÃO DA GERAÇÃO DE MAPAS DE DANOS

Os experimentos realizados neste capítulo visaram a elaboração automática de mapas de danos por meio das técnicas de processamento digital de imagens. Os estudos foram realizados em manifestações patológicas visualizadas em imagens não retificadas e também em ortoimagens.

O programa Tyche (2015) foi utilizado para gerar os mapas de danos das manchas escuras, eflorescências, destacamento de revestimento cerâmico e alteração cromática. Por meio das

seleções de amostras do dano na imagem, a segmentação e a classificação foram realizadas nos espaços de cores RGB, escalas de cinza, H, S e V, e os resultados foram avaliados visualmente, qualificando-os em: muito satisfatório (MS), resultado satisfatório (RS) e não satisfatório (NS). A qualificação do resultado foi realizada pela avaliação visual, uma vez que estas manifestações patológicas são identificadas ou reconhecidas visualmente. Para estas manifestações patológicas estudadas, o espaço de cor RGB apresentou os melhores resultados, como já observado por Gonzalez e Wood (2010) ao afirmarem que a etapa de segmentação tem apresentado os melhores resultados neste espaço.

Os histogramas apresentaram a distribuição da frequência de píxeis de cada seleção da amostra em cada espaço de cores, possibilitando estabelecer relação com o valor de k e a classificação final em cada imagem ou ortoimagem. Quanto menor a dispersão dos dados ou desvio padrão, menores os valores de k necessários para a classificação com resultados muito satisfatórios dos danos. Para dispersões maiores dos dados, maiores valores de k foram necessários para classificar os danos nas imagens e ortoimagens.

Notou-se que apesar da classificação das manifestações patológicas semelhantes, como as manchas escuras sobre imagens e ortoimagens, as distribuições de frequências dos píxeis vistas nos histogramas apresentaram-se distintas. Isto ocorre por vários fatores, citando-se as condições de iluminação sobre as superfícies, parâmetros estabelecidos da câmera, matiz das manchas, contraste e brilho e cor do revestimento da fachada, que influenciaram na distribuição de píxeis. Assim, a interação pelo usuário foi importante para selecionar a amostra do dano, no programa Tyche (2015), porque apesar de em alguns casos se tratar de danos semelhantes (como as duas imagens com a presença de eflorescências) as distribuições de píxeis demonstraram-se diferentes.

Em alguns casos, a manifestação patológica assemelhou-se a demais partes da fachada, como o caso da imagem usada para a classificação do destacamento do revestimento. Por se tratar de uma técnica que se baseia em valores de píxeis, estas regiões que não são danos podem ser classificadas, como observado no experimento citado. Outro aspecto que foi notado, é que partes das regiões com destacamento haviam a formação de manchas, fazendo com que estas regiões não fossem classificadas em função do padrão especificado da amostra. Em um dos casos estudados, foi necessário a separação dos elementos da fachada em partes, ou seja, separar

em elementos com as mesmas características, objetivando realizar a classificação dos danos sem que outros elementos da fachada, devido à semelhança entre os píxeis da seleção da amostra, fossem segmentados e classificados.

Os experimentos realizados com o programa Detecta fissura (2015) foram a partir de imagens e ortoimagens, visando avaliar a aplicabilidade na detecção das fissuras, assim como os operadores Sobel e Canny, operador de dilatação, limiars e valor de sigma que possui a função de delimitar a região de classificação para mais ou para menos.

Para as imagens das fissuras 1, 2 e 3, o operador Sobel apresentou resultados com muitos ruídos e as classificações foram consideradas não satisfatórias (NS). Ao aplicar os operadores de dilatação 5×5 e dilatação 7×7 , as imagens apresentaram-se com mais ruídos devido às conectividades entre os píxeis próximos. Na imagem da fissura 2, foi realizada a remoção dos ruídos e o resultado foi muito satisfatório (MS). Nas imagens das fissuras 1 e 3 não foram feitas as remoções de ruídos, pois a quantidade não tornou o procedimento prático.

Juntamente ao operador Sobel, a utilização de operadores de dilatação 5×5 ou dilatação 7×7 aumentou a quantidade de ruídos, não favorecendo à classificação das fissuras nas imagens e ou ortoimagens.

O operador Canny apresentou, em relação ao operador Sobel, os melhores resultados. Para as fissuras bem definidas sobre às superfícies, os valores indicados pelo programa de limiar máximo e mínimo, 50% e entre 20 a 30%, respectivamente, apresentaram resultados satisfatórios (RS) como observado na imagem da fissura 1. Em alguns casos, como para as imagens das fissuras 2 e 3, os valores de limiars máximos foram aumentados e limiars mínimos reduzidos para diminuir a classificação de ruídos, entretanto houve a necessidade de se utilizar somente o operador de dilatação para que demais fissuras também fossem classificadas na imagem da fissura 2. A alteração dos valores de σ foram importantes para a suavização das imagens, reduzindo também a quantidade de ruídos: quanto maiores os valores, menos ruídos foram classificados. Na imagem da fissura 3, as bordas da descamação da pintura da fachada possuíam semelhanças com fissuras, e o programa resultou na sua classificação, levando à necessidade da remoção de ruídos para extrair estas regiões classificadas.

Os procedimentos adotados para as imagens foram adotados nas ortoimagens. Para a ortoimagem de parte da fachada do Museu Nacional Honestino Guimarães, os operadores Sobel e Canny não apresentaram resultados satisfatórios (RS) ou muito satisfatórios (MS) para a classificação automática das fissuras. Apesar de serem visíveis nas ortoimagens, as fissuras com dimensões inferiores à 0,1 mm não puderam ser detectadas pelo programa Detecta Fissura (2016), muito em função do seu baixo contraste e tamanho da abertura.

Para a fachada da Biblioteca Central da UnB, com fissuras maiores que 3 mm, o operador Sobel apresentou resultado satisfatório (RS), mas sempre algumas fissuras não eram classificadas devido ao pouco contraste com a fachada, mesmo empregando o operador de dilatação 5x5. O operador Canny apresentou resultados muito satisfatórios (MS) usando o operador de dilatação 5x5. Em ambos os casos, foi necessário o uso de remoção de ruídos para obtenção dos melhores resultados. Para classificação das fissuras com pouco contraste, utilizou-se limiar máximo de 30%, para aumentar a probabilidade de detecção destas fissuras.

O resultado da classificação das fissuras na ortoimagem da Biblioteca Central realizado com operador Canny foi similar ao resultado obtido pelo processo manual em programa CAD, e num período menor de geração do mapa. Apesar dos resultados não satisfatórios, o tempo gasto pelo programa para a classificação das fissuras na ortoimagem do Museu Nacional foi muito inferior ao mapa gerado manualmente. O método de geração de mapas de danos para fissuras no Detecta Fissura (2016) demonstrou que se pode obter atividades menos onerosas na atividade de mapeamento, mesmo com procedimentos de remoção de ruídos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

7.1 CONCLUSÕES

O uso do VANT como método para obtenção das imagens demonstrou ser uma técnica eficiente, além da sua praticidade para alcançar as partes mais altas dos edifícios. Representa uma alternativa para as inspeções de fachadas necessárias para as atividades de restauração, recuperação ou manutenção, também pela agilidade que pode proporcionar aos processos. Foi fundamental para a aquisição das imagens a serem utilizadas na geração dos modelos por meio da técnica *Dense Stereo Matching*, principalmente porque as imagens necessitam ser registradas próximo da perpendicular ao plano da cena, ou melhor, das fachadas.

A geração de modelos fotogramétricos e, em especial nesta pesquisa, obtidos pelo método automático por meio das nuvens de pontos apresentaram resultados satisfatórios. A exportação das ortoimagens no PhotoScan produziram os modelos imprescindíveis, e com excelente qualidade, para a geração dos mapas de danos, em virtude da sua forma efetiva, uma vez que os modelos são construídos a partir de fotografias. Os demais programas, via web e livre gratuito não permitem a exportação de ortoimagens. A fotogrametria é uma ciência viável e prática para a realização de levantamentos de edificações porque, também, na atual fase, permite que trabalhos sejam realizados com equipamentos e ferramentas de baixo custo.

Os métodos apresentados para obtenção de produtos fotogramétricos por *Dense Stereo Matching* mostraram-se eficientes e fundamentais no propósito de obter a forma efetiva das edificações. A equação para o cálculo do número de fotos (N°_{fotos}) em função das sobreposições longitudinal e lateral, demonstrou-se eficiente para se ter a quantidade de imagens em uma cena. No entanto, a quantidade de fotos capturadas das fachadas pelo VANT para se alcançar a sobreposição determinada ficou em função da habilidade do piloto, uma vez que os voos não foram feitos no modo automático, com velocidade de subida e descida controlada manualmente. Outro aspecto relevante para os métodos, é que a relação $R = B / L$ não é recomendada para se alcançar a sobreposição para todas as distâncias focais.

Por meio da aferição da largura da ortoimagem do prédio da ANTAQ, obtida no programa PhotoScan, foi calculada a diferença entre a medida real e a medida obtida por meio de processamento, com diferença de apenas 0,2% entre as mesmas. Considerou-se um bom resultado, baseando-se em outros trabalhos (GROETELAARS, 2004) e na obtenção de medidas por meio exclusivo de fotografias. Desta maneira, ressalta-se a também a importância da técnica para o levantamento cadastral de edificações.

Os dois programas utilizados para a geração dos mapas de danos foram o Tyche (2015) e o Detecta Fissura (2016). As técnicas de processamento digital de imagens apresentaram resultados também satisfatórios, produzindo, de forma semiautomática, a classificação dos danos. Além das ortoimagens de fachadas, criadas por DSM, com manifestações patológicas, os mapas de danos foram gerados sobre imagens não retificadas.

Utilizou-se o programa Tyche (2015) para gerar os mapas de danos das manchas escuras, eflorescências, destacamento de revestimento cerâmico e alteração cromática. A segmentação e a classificação foram realizadas nos espaços de cores RGB, escalas de cinza, H, S e V, e os resultados nos espaços RGB e escalas de cinza apresentaram resultados muito satisfatórios (MS) para todos os danos. A geração de mapas de danos no espaço escalas de cinza, por ter apresentado resultados satisfatórios e por ter um custo computacional menor que o espaço RGB, demonstrou ser um método que pode trazer benefícios neste sentido.

O programa Tyche (2015) permitiu a segmentação com base na análise estatística a partir da seleção da amostra e especificação pelo usuário de valores de k que conduziram a diferentes resultados, isto é, valores percentuais maiores ou menores dos padrões classificados. Este programa classificou os padrões com base em valores de área mínima e máxima, o que fez com que regiões que não eram de interesse não fossem classificadas. Pode-se confirmar isto na classificação da alteração cromática, em que se teve a região classificada sendo menor que a região segmentada, em virtude de ter-se estabelecido o valor de 1.000 píxeis de área mínima para classificação, excluindo, desta forma, os conjuntos de píxeis menores que esta dimensão.

Os mapas gerados no programa Tyche (2015) mostraram que o tempo gasto para classificação é menor por meio das técnicas de processamento de dados que pela digitalização manual por usuário, aspectos comprovados nos três mapas gerados das ortoimagens. Também foi notado que nos mapas de danos gerados pelo usuário houve uma simplificação do processo devido à

dificuldade em se mapear, isto é, os contornos dos danos são mais generalizados, abrangendo áreas que não possuem danos, mas que são bem próximas, levando, assim, a uma maior área encontrada da manifestação patológica. Em suma, o programa Tyche (2015) foi mais preciso e, também, menos oneroso.

Quanto à detecção das fissuras para geração dos mapas de danos, com o Detecta Fissura (2016) os resultados gerados pelo operador Canny apresentaram os melhores resultados. A limiarização por histerese demonstrou ser um método de segmentação eficiente na geração de mapas de danos para detecção automática de fissuras, auxiliado pelo operador de dilatação e remoção de ruídos, além da opção de especificação para valores de σ , que suavizam as classificações.

A ortomagem em que as fissuras apresentam pouco contraste com a superfície da fachada dificultam a geração de mapas de danos por PDI, e isto foi observado no Museu Nacional. A aplicação do programa demonstrou que a geração de mapas pode ser menos onerosa, mesmo com a interação de usuário. Importante destacar que, ainda, a ação de profissional experiente no auxílio da geração de mapas de danos é necessária, uma vez que podem existir formações sobre a fachada que se assemelham a manifestações patológicas buscadas. A partir do conhecimento empírico, as intervenções do homem são imprescindíveis para a obtenção ou manipulação dos resultados esperados.

Expõe-se que outras manifestações patológicas podem ser existentes sobre as fachadas das ortomagens geradas pela técnica de *Dense Stereo Matching*, mas devido a aspectos mencionados anteriormente, como resolução da câmera e distância de voo do VANT, estas manifestações não foram visualizadas e chegando-se a classificação somente dos danos apresentados nesta tese.

É importante mencionar que a quantificação de danos próxima de valores reais somente é possível em projeções ortográficas de fachadas (ortomagens), visto que estas possuem a correção do efeito perspectivo de um objeto numa imagem não retificada. Uma fotografia da fachada de um edifício alto obtida do nível do solo pode apresentar partes da fachada não visíveis devido a distintos planos verticais (como sacadas), dificultando, assim, a visualização de possíveis danos devido às oclusões. A técnica DSM permite a obtenção de vistas ortográficas com as formas e danos presentes nas faces externas de edifícios a partir de várias imagens. No

entanto, as imagens usadas no processamento precisam ser obtidas próximo à perpendicular do plano da fachada para a geração dos modelos sem deformações, como observado em alguns experimentos. Para estes registros fotográficos, procedimentos alternativos de captura devem ser utilizados, e o emprego do VANT demonstrou-se ser uma excelente ferramenta para esta finalidade.

Por fim, a tese alcançou os propósitos estabelecidos pelos objetivos, que era, em suma, a geração de mapas de danos pelo uso de VANT, fotogrametria digital e processamento de imagens digitais, compondo a aplicação de métodos e técnicas de seguimentos científicos específicos para o desenvolvimento de procedimentos para a inspeção visual de fachadas de edifícios. Entretanto, a pesquisa apresentou algumas delimitações e estas podem ser direcionadas às realizações em pesquisas futuras.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- aplicar a metodologia para um grupo maior de edificações com o objetivo refinar os procedimentos e a automatização da quantificação de manifestações patológicas;
- aplicar as técnicas de *Dense Stereo Matching* para geração de modelos de superfície para barragens e pontes com a finalidade de criar métodos para monitoramento das manifestações patológicas destas obras com uso de VANT;
- desenvolver uma metodologia para acompanhamento da evolução de manifestações patológicas em edifícios por meio da comparação de mapas de danos gerados em período distintos;
- elaborar códigos em linguagem computacional para a classificação quanto à sua extensão e tamanho de abertura de fissuras;
- desenvolver uma metodologia de inspeção de edificações a partir de câmeras termográficas embarcadas em VANT.

REFERÊNCIAS

- AGISOFT PhotoScan User Manual: Professional edition, Version 1.1. 2014. 85 p.
- ALBERTZ, Jörg; WIEDEMANN, Albert. **Acquisition of CAD data from existing buildings by photogrammetry**. Berlin, Germany: Technical University of Berlin, 1995.
- ALBUQUERQUE, M. P.; ALBUQUERQUE, M. P. **Processamento de imagens: métodos e análises**. Rio de Janeiro: Editora da FACET, 2001 (Revista Científica).
- ALSHAWABKEH, Y.; EL-KHALILI, M. Detection and quantification of material displacements at historical structures using photogrammetry and laser scanning techniques. **Mediterranean Archaeology and Archaeometry**. Greece, 2013, 13, 57–67.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – E 632-82/96**: Standard practice for developing accelerated tests to aid prediction of the service life of building components and materials. Philadelphia: ASTM, 1996.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – E 2270**: Standard practice for periodic inspection of building facades for unsafe conditions. Philadelphia: ASTM, 2005.
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. **Manual of photogrammetry**. 4. ed. Virginia: Falls Church, 1980. 1187 p., p. 01-173.
- AMORIM, A. L. Fotogrametria: uma introdução. In: PRATINI, E. F., SILVA, E. A. **Criação, representação e visualização digitais**. Brasília, DF: Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 2012. p. 63-89.
- AMORIM, A. L.; SILVA, L. S.; CHRISTAKOU, E. D. Uso de VANTs em documentação arquitetônica. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COMO USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS, Belém. **Anais...** Belém: LACORE/UFGPA, 2012.
- ANDRADE, J. B. de. **Fotogrametria**. 2. ed. Curitiba: SBEE, 2003. 274 p.
- ANTUNES, G. R. **Estudo de manifestações patológicas em revestimento de fachada em Brasília**: sistematização da incidência de casos. 2010, 166 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) Universidade Federal de Brasília. Brasília, 2010
- ARJOMANDI, A.; AGOSTINO, S.; MAMMONE, M.; NELSON, M.; ZHOU, T. **Classification of unmanned aerial vehicle**: Report for mechanical engineering class. University of Adelaide, Adelaide, Australia, 2006. 48 pp.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13752**. Perícias de engenharia na construção civil. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5674**. Manutenção de edificações. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14653-1**: Avaliação de bens. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14037**. Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5674**: Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575**: Edifícios Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ASTM. **Standard practice for developing accelerated tests to aid prediction of the service life of building components and materials**, ASTM E632-82. Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1996.

ASTM - **Standard practice for periodic inspection of building facades for unsafe conditions**. ASTM E2270. Philadelphia: American Society for Testing Materials, 2005.

ATKINSON, K. B. **Close range photogrammetry and machine vision**. Caithness, UK.: Whittles Publishing, 2003.

AUGUSTO, E. **Determinação automática dos parâmetros da orientação exterior de uma imagem fotogramétrica digital**. Rio de Janeiro: IME, 1999.

AZEVEDO, Eduardo, CONCI, Aura. **Computação gráfica: Teoria e prática**. Elsevier, 2003.

BALENOVIĆ, Ivan.*et al.* Digital photogrammetry – state of the art afornd potential for application in forest management in Croatia. **SEEFOR-South-East European Forestry**. V. 11, nº 2, 2011 (p. 81-93).

BARTHEL, C.; LINS, M.; PESTANA, F. **O papel do mapa de danos na conservação do patrimônio arquitetônico**. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO Y JORNADA TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN E CONSERVACIÓN DEL PATRIMÔNIO, VIII 2009, La Plata, Buenos Aires, Argentina. **Anais...** La Plata, 2009. 20 p.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; ANTUNES, G. R. E LEAL, F. E. Identification and quantification of pathologies in facades of new buildings in Brasília. DBMC INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, XII. Porto, Portugal. **Anais...** Porto, 2011.

BAUER, E.; KRAUS, E.; SILVA, M. N. B. Patologia e deterioração das fachadas de edifícios em Brasília – estudo da quantificação de danos, PATORREB. CONGRESO DE PATOLOGÍA Y REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS, 4. Santiago de Compostela, Espanha. **Anais...** Santiago de Compostela, 2012.

BECKER, A.J et al. **Condition Assessment of Roofs**. Joint Committee CIB W83/RILEM TC 166-RMS. CIB Publication 289. Rotterdam: International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), 2003. 24 p.

BRANCO, F. A.; BRITO, J. de. **Handbook of concrete bridge management**. USA: American Society of Civil Engineers, 2005. 468 p.

BRITO, Bruno Leão de; GROETELAARS, Natalie Johanna, AMORIM, Arivaldo Leão de. O uso da tecnologia dense stereo matching para levantamento de edificações existentes. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS, II .2012, Belém. **Anais...** Belém: ARQDOC, 2012.

BSI. **Guide to durability of buildings and building elements, products and components**. BS 7543. London: British Standards Institute, 2003.

CAMPBELL, James B. Origins of aerial photographic interpretation, U.S. Army, 1916 to 1918. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** Vol. 74, No. 1, January 2008, pp. 77–93.

CARASEK, H. Patologia das argamassas de revestimento. In: ISAIA, G.C. (Org.). **Materiais de construção e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007, v. 1, p. 1-11.

CARDOSO, Rodrigo. **Inteligência de sinais**: A criação de cenários futuros para o DPF com a utilização de sistemas de veículos aéreos não tripulados. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Execução de Política de Segurança Pública) 2008. 132f. Academia Nacional de Polícia, Brasília, 2008.

CARRIÉ, C.; MOREL, D. **Salissures de façades**. Paris: Eyrolles, 1975.

CARRIÓ, J. M. Arquitetura, arte funcional. **Informes de la Construcción**. Madrid, Instituto Eduardo Torroja, v. 37, n.374, p. 5-16, 1985.

CARVALHO, E. A.; ARAÚJO, P. C. de. **Leituras cartográficas e interpretações estatísticas II**. Natal: 2009. v. 1. 244 p.

CARVALHO, Isabella Chaves; PICANÇO, Marcelo de Souza; MACEDO, Alcebíades Negrão. Identificação de patologias em fachadas e metodologia de análise: estudos de casos na Universidade Federal do Pará. (D.O.I. 10.5216/reec.V9i2.29559). **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S.l.], v. 9, n. 2, out. 2014. ISSN 2179-0612. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/reec/article/view/29559>>. Acesso em: 10 set. 2016. doi:<http://dx.doi.org/10.5216/reec.v9i2.29559>.

CENTENO, Jorge Antonio Silva; WUTKE, Juliana Dias; KERSTING, Ana Paula Baungarten. Comparação de geração de modelos tridimensionais usando laser scanner terrestre e restituição fotogramétrica monocular. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO - SIMGEO, I. 2004, Recife. **Anais ...** Recife: 2004. v. 1.

CHEW, M. Y. L.; TAN, P. P. Façade staining from designers features. **Construction and building materials**. v. 17, p. 181-187, ago/2003. Disponível em: <www.sciencedirect.com.> Acesso em: 5 fev. de 2009.

CIB The performance concept and its terminology, **CIB Report**. Publication 32. Paris: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 1975. 8 p.

COELHO, L; BRITO, J. **Fotogrametria digital**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro: 2007. Disponível em: <<http://e-foto.sourceforge.net/cap1.pdf>>. Acesso em: 14 mai. 2013.

COSTA, L. G. G. **Cronidas**: Elaboração da base de dados para auxílio em representação de mapa de danos. 2010, 264 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2010.

COSTA, L. G. G. ; AMORIM, A. L. Geração de ortofotos para produção de mapas de danos. In: SIGRADI 2009 - CONGRESSO DA SOCIEDADE IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 13, 2009, São Paulo. SIGRADI – **Anais...** São Paulo: Sociedade Ibero-americana de Gráfica Digital, 2009. v. 1. p. 62-64.

COSTA, L. G. G. Cronidas: uma proposta de base de dados para confecção de mapas de danos em edificações de interesse histórico-cultural. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL (SIGRADI), XV. 2011, Santa Fé. **Anais...** SIGRADI 2011 Cultura aumentada - Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, XV. Santa Fé-AR, 2011a. v. 1.

COSTA, Luciana. **Noções teóricas e práticas de fotogrametria**. Cap. 2. Disponível em: <http://www.mundogeomatica.com.br/Fotogrametria/Livro_Fotogrametria/Capitulo2_Nocoas_Teoricas_Praticas_Fotogrametria.pdf>. 2011b.

COSTA, M. S. **Identificação de danos em fachadas de edificações por meio de imagens panorâmicas geradas por plataforma robótica fotográfica**. 2014. 184 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

DETECTA FISSURA. Ferramenta computacional para detecção de fissuras. Programa não registrado a ser patentado. Versão 5. Lenildo Santos Silva, 2016.

DONEUS, M.; VERHOEVEN, G.; FERA; M.; BRIESE, CH.; KUCERA, M.; NEUBAUER, W. From deposit to point cloud – a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. In: INTERNATIONAL CIPA SYMPOSIUM, 23rd. **Proceedings....** Prague, Czech Republic, September 12–16, 2011.

DORFMAN, G.; PETRUCCI, H. M. C. Recomendações para o projeto de fachadas com vistas à sua maior durabilidade e facilidade de manutenção. In: SIMPÓSIO SOBRE PATOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES: PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO, 1989. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1989. p. 251-262.

DOWMAN, I. J. Fundamentals of digital photogrammetry. In: ATKINSON, K. B. (Edit.). **Close range photogrammetry and machine vision**. Scotland: Whittles Publishing. 1996. (P. 52-77).

ESQUEF, I. A.; ALBUQUERQUE, M. P.; ALBUQUERQUE, M. P. **Processamento digital de Imagens**. Rio de Janeiro, 2003. p. 12. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.

FALKINGHAM, Peter L. Acquisition of high resolution 3D models using free, open-source, photogrammetric software. **Palaeontologia Electronica** Vol. 15, Issue 1; 1T:15p. Disponível em: palaeo-electronica.org/content/93-issue-1-2012-technical-articles/92-3dphotogrammetry. 2012.

FARIA, Diogo Alexandre Borges. **Segmentação, reconstrução e quantificação 3D de estruturas de imagens médicas: aplicação em imagem funcional e metabólica**. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, 2013.

FLORES-COLEN, I. S. **Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva**. 2009, 487f. Tese (Doutorado em Engenharia) Instituto Superior Técnico - Universidade de Técnica de Lisboa; Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2009.

FLORES-COLEN, I. S.; BRITO, J. de; FREITAS, V. P. Stains in facades' rendering: diagnosis and maintenance techniques classification. **Construction and Building Materials**. 2008, 22(3): pp. 211-221.

FLORES-COLEN, I. S.; BRITO, J. de; FREITAS, V. P. Técnicas de diagnóstico e de manutenção para remoção de manchas em paredes rebocadas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO. 1. **Anais...** Lisboa: APFAC, CD, 2005.

FLORES-COLEN, I. S.; BRITO, J. de; FREITAS, V. P. Ensaio *in-situ* e em laboratório para caracterização do desempenho em serviço de rebocos pré-doseados aplicados em fachadas de edifícios correntes. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO. 2. **Anais...** Lisboa: APFAC, CD, 2006.

FOLIENSTE, G.C.; LEICESTER, R. H.; PHAM, L. Development of the CIB proactive program on performance based building codes and standards. **BCE 98/232**. Highett: CSIRO Building, Construction and Engineering, 1998.

FU, K. S.; GONZALEZ, R. C.; LEE, C. S. G. **Robotics: control, sensing, vision, and intelligence**. New York: McGraw-Hill, Inc., 1987.

GASPAR, P. L.; BRITO, J. de. Quantifying environmental effects on cement-rendered facades: A comparison between different degradation indicators. **Building and Environment**, 43(11), 1818–1828. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.022>, 2008>. Acesso em: 10 mai. 2013.

GASPAR, P. L.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de. **Técnicas de diagnóstico e classificação de fissuração em fachadas rebocadas**. In: PATORREB 2006 - ENCONTRO

SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS. 2. Porto, **Anais...** Porto: FEUP / UPC. II; pp. 541-550, 2006.

GASPAR, P. M. dos S. L. **Vida útil das construções:** Desenvolvimento de uma metodologia para a estimativa da durabilidade de elementos da construção. Aplicação a rebocos de edifícios correntes. 2009. 358 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciências de Engenharia, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2009.

GOMIDE, T. L. F.; GULLO, M. A.; FAGUNDES, J. C. P. **Técnicas de inspeção e manutenção predial.** São Paulo: Editora PINI, 2006.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing.** 3d. Reading, MA: Addison-Wesley, 2010. 716 p.

GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. 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, 2012, Fortaleza. SIGraDi 2012 [**Proceedings of the 16th Iberoamerican Congress of Digital Graphics**], 2012. p. 361-365.

GROETELAARS, N. J. **Um estudo da fotogrametria digital na documentação de formas arquitetônicas e urbanas.** 2004. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Arquitetura. Salvador, 2004.

GROETELAARS, N. J.; AMORIM, Arivaldo L. Fotogrametria digital na documentação do patrimônio arquitetônico. **Fórum patrimônio:** ambiente construído e patrimônio sustentável, Belo Horizonte, v. 2, n. 2, mai./ago. 2008.

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

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/UFGA, 2012.

HANKE, K.; GRUSSENMEYER, P. **Architectural photogrammetry: basic theory, procedures, tools.** Corfu: ISPRS Commission 5, set. 2002. 27 p. Tutorial. Disponível em: <http://www.isprs.org/commission5/tutorial/gruss/tut_gruss.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2013.

HARTLEY, R., ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in Computer Vision.** 2.ed. Cambridge University Press, 2004.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1993.

HENRIQUES, F. **Ação de humidade em paredes**. 1992. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 1992.

HENRIQUES, M. The effects of differential thermal insulation of walls. IAHS World Congress on Housing, XXX. 2002. Coimbra, 09-13 de setembro de 2002. University of Coimbra Constructions Laboratory Portugal. **Proceedings....** , pp. 1515-1521. Coimbra, 2002.

HERMANS, M. H. **Deterioration characteristics of building components** – a data collecting model to support performance management. 1995. 234 f. Thesis (Doctoral). Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS DE ENGENHARIA DE SÃO PAULO (IBAPE/SP). **Inspeção predial: A saúde dos edifícios**. São Paulo: IBAPE/SP, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS DE ENGENHARIA. IBAPE. **Norma de Inspeção Predial Nacional**, 2012. São Paulo. Disponível em: <<http://ibape-nacional.com.br/biblioteca/category/normas-estudos-tecnicos/>>. Acesso em: 16 mai. 2016.

ISO - **Buildings and constructed assets- Service life planning - Part 1: General Principles**. ISO 15686- 1. Geneva: International Organization for Standardization, 1999.

ISO 15686-1 **Buildings - Service Life Planning - Part 1: General Principles**, International Standards Organization. Switzerland, 2000.

ISO - **Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 2: Service life prediction procedures**. ISO 15686-2. Geneva: International Organization for Standardization, 2001.

JAN, Abeerullah. **Fundamentals of photointerpretation and photogrammetry**. Volume 5 de North West Frontier forest records inventory series 1972. Cidade: Peshawar. Aerial Forest Inventory Project, Pakistan Forest Institute, 1972

JOHANSSON, S.; LI, Y.; WADSÖ, L. **Biological organisms on building façades**. 2005. Disponível em: <http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_116.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2009.

KOATZ, Gilson Dimenstein; SEGRE, Roberto. Levantamento do paço imperial da praça XV empregando fotogrametria de curta distância e digitalização por laser 3D. In: ARQ.DOC 2010 - SEMINÁRIO NACIONAL: DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS, 1., 2010, Salvador. **Anais...** Salvador: FAUFBA, 2010. 1 CD-ROM.

KOUTSOUDIS, A. VIDMAR, B., IOANNAKIS, G., ARNAOUTOGLU, F., PAVLIDIS, G, CHAMZAS, C. Multi-image 3D reconstruction data evaluation. **Journal of Cultural Heritage** [online] <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2012.12.003>. Acesso em: 5 fev. 2014.

KOUTSOUDIS, Anestis; Vidmar; Blaz; ARNAOUTOGLU, Fotis; REMONDINO, Fabio; BASSETT, Sheena; CHAMZAS, Christos. 3D ICONS – 3D **Digitisation of icons of european architectural and archaeological heritage**. Case studies for testing the

digitisation process interim report. 2012. Project co-funded by the European Commission within the ICT Policy Support Programme.2012

LÉON, Josefa García; SÁEZ, Aurora Cuartero. Comparación de los procesos de rectificación y ortoproyección mediante Fotogrametría Terrestre Digital. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA GRÁFICA, 14, 2002, Santander. **Anais...** Santander, 2002. Disponível em: <<http://departamentos.unican.es/digteg/ingegraf/cd/ponenciais/57.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2003.

LERSCH, M. I. **Contribuição para a identificação dos principais fatores e mecanismos de degradação em edificações do patrimônio cultural de Porto Alegre.** 2003. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2003.

LESSA, A. M. ; GOMES, O. D. M. ; FERREIRA, H. O. ; D. ABREU, J. C. ; PACIORNIK, Sidnei. Classificação automática de hematita especular e hematita porosa em *pellet feed* por análise digital de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO. VIII Salvador. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. v. 2. p. 582-588.

LI, J.I.E.; SHI, Wenxuan; DENG, Dexiang; JIA, WENYAN; SUN, Mingui. Dense stereo matching method based on local affine model. **Journal of Computers**, vol. 8, no. 7, July 2013.

LICHTENSTEIN, N. B. **Patologia das construções:** boletim técnico n. 6. São Paulo: EPUSP, 1986.

LIMA, J. F. S.; AMORIM, A. L.; SCHMIDT, F. Levantamento da portada das igrejas de São Francisco e do Rosário com nuvens de pontos. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS, Salvador, 2010. **Anais...** Salvador: ARQDOC, 2010.

LOGEAS, L. Les fantômes de joints. **Sycodés Informations**, Paris, n.2, p. 20-22, 1989.

LOPEZ, A. L. R. **Algebraic epipolar constraints for efficient structureless multiview motion estimation. PhD thesis.** Universidad de Murcia. Facultad de Informática. Departamento de Ingeniería y Tecnología de Computadores. June. 2013.

LUHMANN, T.; ROBSON, S.; KYLE, S.; HARLEY, I. **Close range photogrammetry: principles, methods and applications.** New Jersey: Wiley, 2006. 510 p.

MAGALHÃES, A. C. Patologia de rebocos antigos, **Revestimentos de Paredes em Edifícios Antigos, Cadernos Edifícios** n° 2, LNEC, Lisboa, 2002, pp. 69-85.

MARCHETTI, Delmar A. B.; GARCIA, Gilberto J. **Princípios de fotogrametria e fotointerpretação.** São Paulo: Nobel, 1990.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento digital de imagens.** Rio de Janeiro: Brasport, 1999. 406 p.

MATEUS, Luis Miguel Cotrim. **Contributos para o projeto de conservação, restauro e reabilitação** - uma metodologia documental baseada na fotogrametria digital e no varrimento laser 3D terrestres. 2012. V. II, 490 f. Tese (Doutorado em Arquitetura – Comunicação Visual). Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2012.

MATHWORKS. MATLAB. Programming fundamentals. R2014. **MathWorks**. 2014.1015 p. disponível em: <http://www.uow.edu.au/~phung/resources/matlab_prog.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO JÚNIOR, Carlos Mariano; ALVES, Gelson de Sousa; EVANGELISTA JR., Francisco; CHRISTAKOU, Evangelos Dimitros; SILVA, Lenildo Santos da; NEPOMUCENO, Antônio Alberto. Geração de mapas de danos de fachadas a partir de processamento digital de imagens. ENCONTRO NACIONAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. ENTAC. XV. Maceió, 12, 13 e 14 de novembro de 2014. **Anais...** Maceió, 2014.

MELO JÚNIOR, C. M.; SHIRAKAWA, M.; TANACA, H.; CARASEK, H. Influência de elementos da fachada no crescimento de microrganismos em revestimentos: estudo de caso em Goiânia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 9. Belo Horizonte, 2011. **Anais...** Belo Horizonte: ANTAC, v. 1. p. 1-14. 2011

MELO JÚNIOR, Carlos Mariano. **Influência da chuva dirigida e dos detalhes arquitetônicos na durabilidade de revestimentos de fachada**. 2010. 204 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Construção Civil e Mecânica das Estruturas) Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Construção Civil e Mecânica das Estruturas, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2010.

MELO JÚNIOR, C. M.; CARASEK, H. Relationship between the deterioration of multi story buildings facades and the driving rain. **Revista de la construcción**, Santiago, v. 13, n. 1, p. 64-73, abr., 2014.

MENDÉZ, Ricardo Brod. **Construção de ambientes virtuais interativos baseados em imagens para estudos arquitetônicos e urbanísticos**. 2002. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPq, 2012. v. 1. 256p.

METNI, N.; HAMEL, T. A UAV for bridge inspection: visual servoing control law with orientation limits. **Elsevier Automation in Construction**, Amsterdam, v. 7, n. 1, p. 3-10. 22 dec. 2006. Disponível em:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580507000052>>. Acesso em: 5 fev. 2016.

MIKHAIL, Edward; BETHEL, James S.; MACGLONE, Chris, J. **Introduction to modern photogrammetry**. New York: John Wiley & Sons, 2001. 479p.

MIRANDA NETO, Arlindo Bastos de; ALMEIDA, Isnard Edson Sampaio de. **A análise do emprego do veículo aéreo não tripulado (VANT) nas ações e operações PM, 2009.** 2009, 87f. Monografia (Especialização em Gestão de Segurança Pública). Universidade do Estado da Bahia. Academia da Polícia Militar da Bahia. Salvador, 2009.

MORALES, J. I. M.; URTEAGA, L.; NADAL, F. La fotogrametría terrestre em España (1914-1958). **Investigaciones Geográficas**, 27., 2002, pp. 151-171. Instituto Universitario de Geografía. Universidade de Alicante. Disponível em: <<http://www.ieg.csic.es/age/hispengeo/documentos/fotogrametria.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2013.

NASCIMENTO JR., J. O. do.; SCHULER, C. A. B.; CAVALCANTE, R. B. de S. Sistema laser scanner. SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO. III. Aracaju, 2006. **Anais...** Aracaju, 2006.

NORVAISIENE, R.; BURLINGIS, A.; STANKEVICIUS, V. Climatic and air pollution effects on building facades. **Materials Science**. V. 9, nº 1, 2003, pp. 102-105.

OLIVEIRA, MÁRIO MENDONÇA de. **A documentação como ferramenta de preservação da memória:** cadastro, fotografia, fotogrametria e arqueologia. Brasília, DF: IPHAN/Programa Monumenta, 2008. 144 p.

PADILHA JR., Marcos; AYRES, Giovanni; LIRA, Raphaele; JORGE, Daniel; MEIRA, Gibson. Levantamento quantitativo das patologias em revestimentos cerâmicos em fachadas de edificações verticais na cidade de João Pessoa – PB. CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA. II João Pessoa. **Anais...** Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba (CEFET – PB). João Pessoa, 2007.

PEDRINI, Hélio; SCHWARTZ, William Robson. **Análise de imagens digitais:** Princípios, algoritmos e aplicações. 30. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2008.

PEREIRA, F. C. **Análise de desempenho de algoritmos para auxílio ao reconhecimento de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa visando sua embarcação em VANTs.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

PETRUCCI, Helena Maria Cabeda. **A alteração da aparência das fachadas dos edifícios:** interação entre as condições ambientais e a forma construída. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 2000.

PHOTOMODELER'S New Point Cloud Meshing Capabilities. Disponível em: <<http://info.photodeler.com/blog/photodelers-new-point-cloud-meshing-capabilities/>>. Acesso em: 18 abr. 2013.

PHOTOMODELER tutorial. Disponível em: <<http://www.photodeler.com/tutorial-vids/online-tutorials.htm>>. Acesso em: 18 abr. 2013.

PHOTOSCAN. Version 1.1.2. Agisoft LLC, 2013.

PIERROT-DESEILLIGNY, Marc; DE LUCA, Livio; REMONDINO, Fabio. Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation. **Geoinformatics CTU FCE**. 2011. Disponível em: <<http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/113.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2012.

PINHEIRO, L. K.; DIAS, F. H. S.; BECKER, A. J.; SILVA, D. M. I. **Programação em MatLab**. Santa Maria (RS) Universidade Federal de Santa Maria, Outubro de 2010.

REAL world objects and materials that will and won't work well with PhotoModeler Scanner's DSM tools. Disponível em: <http://info.photomodeler.com/blog/kb/real_world_objects_and_materials_that_wi/>. Acesso em: 18 abr. 2013.

REICH, M.; WIGGENHAGEN, M.; MUHLE, D. Filling the holes - Potential of UAV-based photogrammetric facade modelling. **Tagungsband des 15. 3D-NordOst Workshops der GFaI**, ISBN 978-3-942709-07-1, S. 147-156, 2012.

RIBEIRO, José Carlos. **Fotogrametria digital**. Departamento de Engenharia Florestal. Universidade Federal de Viçosa, 2002. Disponível em: <<http://www.ufv.br/nugeo/ufvgeo/2002/resumos/jcristeiro.pdf>>. Acesso em: 6 set. 2013.

RICCI, M.; PETRI, S. **Princípios de aerofotogrametria e interpretação geológica**. São Paulo: Cia. Editora Nacional, 1965.

ROBINSON, G.; BAKER, M. C. **Wind-driven rain and buildings**. Ottawa: National Research Council Canada, Division of Building Research, 1975. (Technical Paper, 445).

ROMEO, M. **Architettura digitale: tecnologie ed applicazioni informatiche per l'architettura**. Firenze: Facoltà de Architettura, 2002.

ROQUE, Dora; FONSECA, Ana; MIMOSO, João Manuel. Detecção e mapeamento de anomalias em fachadas urbanas azulejadas com técnicas de processamento digital de imagem. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS. II. Belém, 26, 27 e 28 de novembro de 2012. **Anais...** Belém, 2012.

RUDBECK, C. **Methods for designing building envelope components prepared for repair and maintenance**. 1999. 209 f. Thesis (Doctoral) Copenhagen: Technical University of Denmark, 1999.

RUIZ, Luis Angel; LERMA, José Luiz; GIMENO, Josep. Application of computer vision techniques to support in the restoration of historical buildings. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 2002, Graz-Austria. **Anais...** Graz-Austria: ISPRS, 2002. P. 227-230.

SABBATINI, F. H. **Tecnologia de execução de revestimentos de argamassas**. In: SIMPÓSIO DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO CONCRETO. 13. Campinas (SP): 1990. **Anais...** Campinas, 1990.

SABBATINI, F.H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária.** 1984. 298 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1984.

SANTOS, Daniel Rodrigues dos. **Fotogrametria I** (1ª. ed. 2009) última atualização 2014 Departamento de Geomática UFPR. Curitiba, 2014.

SANTOS, Érico Rossano Moreto dos. **O emprego de veículo aéreo não tripulado na Segurança Pública:** uma proposta para o Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal. 2011. 103 f. Monografia (Especialização em Altos Estudos de Política e Estratégia). Escola Superior de Guerra. Rio de Janeiro, 2011.

SCHARSTEIN, D.; SZELISKI, R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. **International Journal of Computer Vision.** V. 47, nº 1/2/3, pp. 7-42, April-June 2002.

SCHENK, T. **Introduction to photogrammetry.** Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus. Autumn Quarter 2005. Disponível em: < <http://gscphoto.ceegs.ohiostate.edu/courses/GeodSci410/docs/GS41002.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2009.

SCURI, A. E. **Fundamentos da imagem digital.** Tecgraf/PUC. Rio de Janeiro: PUC, 2002.

SEITZ, S., CURLESS, B., DIEBEL, J., SCHARSTEIN, D., SZELISKI, R. A Comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. **CVPR** 2006/1, 519–526.

SHIRAKAWA, M. A.; MONTEIRO, M. B. B.; SELMO, S. M. S.; CINCOTTO, M. A. Identificação de fungos filamentosos em revestimentos de argamassa com bolor evidente. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ARGAMASSAS. I. Goiânia, 1995. **Anais...**, 1995. p. 402-410.

SHIRAKAWA, M. A.; VIEIRA, E. N.; TANACA, H.; CESAR, R. T.; BRUM, F.; JOHN, V. M. Avaliação do crescimento de fungos após um ano de envelhecimento natural de argamassa de revestimento aditivadas e com pintura. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. VIII., **Anais...** Curitiba, 2009.

SILVA, D. C.; COSTA, Glauber Carvalho da. **Aerofotogrametria em projetos de estradas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO. III, 2010, Recife. **Anais....** Recife: CPGCGTG, 2010. v. 1. p. 1-13, 2010.

SILVA, Fábio Pinto da; SALVALAIO, Cláudio Luiz; KINDLEIN JÚNIOR, W. Análise comparativa de processos de digitalização 3D para modelos de partes humanas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN. 9. : 2010 out. 13-16: São Paulo. **Anais...** São Paulo: AEND-BR, 2010.

SILVA, M. N. B. **Avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada** – aplicação ao caso de Brasília/DF. 2014. 198 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil). Publicação E.TD-006A/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília: Universidade de Brasília, 2014.

SILVESTRE, J.D.; BRITO, J. de. Ceramic tiling in building façades: Inspection and pathological characterization using an expert system. **Construction and Building Materials** 25 (2011) 1560–1571, 2011.

SIQUEIRA, Mozart Lemos de. **Reconhecimento automático de padrões de imagens ecocardiográficas**. 2010. 107 f. Tese (Doutorado em Computação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pós-graduação em Computação. Instituto de Informática. Porto Alegre: UFRG, 2010.

SOLOMON, C.; BRECKON, T. **Fundamentos de processamento digital de imagens** – uma abordagem prática com exemplos em Matlab. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SZELISKI, R. **Computer vision: Algorithms and applications**. London: Springer, 2010.

SZELISKI, R; TORR, P. H. S. **Geometrically constrained structure from motion: points and plane**. Microsoft Research, One Microsoft Way, Redmond, WA 98052, USA, szeliski-philtorr@microsoft.com, <http://www.research.microsoft.com/research/vision/>.

TANG, L.; WU, C., CHEN, Z. **Image dense matching based on region growth with adaptive window**. ISN National Key Lab, Institute of Comm. Eng., Xidian University, Xi'an 710071, China Received 8 July 2002; received in revised form 20 October 2002.

TAVANI, S.; GRANADO, P.; CORRADETTI, A.; GIRUNDO, M.; IANNACE, A.; Arbués, P.; MUÑOZ, J.A.; MAZZOLI, S. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). **Computers & Geosciences**. V. 63; 2014; 44–53.

TINOCO, Jorge Eduardo Lucena. **Mapa de danos** – Recomendações básicas. Centro de estudos avançados da conservação integrada – CECI. Vol. 43. Olinda, Pernambuco, 2009.

TIRELLO, R. A.; CORREA, R. Sistema normativo para mapas de danos de edifícios históricos aplicados à Lidgerwood Manufacturing Company de Campinas. In: COLÓQUIO LATINOAMERICANO SOBRE RECUPERAÇÃO E PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO INDUSTRIAL. VI 2012. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Centro Universitário belas Artes de São Paulo, 2012. V. 1. P. 44-26.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria básica**. Presidente Prudente: Departamento de Cartografia, 1999 (Apostila).

TOMASI, Carlo. **CS 223B: Introduction to computer vision**. Docs-Engine.com. Stanford University. Matlab and Images. Disponível em: <<http://www.umiacs.umd.edu/~ramani/cmssc828d/matlab.pdf>>. Acesso em : 18 mar. 2014.

TRIGO, T. **Equipamento fotográfico: teoria e prática**. 5. ed. São Paulo. Editora SENAC. 2012.

TYCHE. A computational tool for damage identification using image processing. Programa não registrado a ser patentado. Versão 1. Francisco Evangelista Junior, 2015.

UAV. **UNMANNED Air vehicle classification table**. EUA, 2012. Disponível em: <<http://www.globalsecurity.org/military/world/europe/aircraft-uav-class.htm>>. Acesso em: 28 set. 2012.

UEMOTO, Kai L.; AGOPYAN, Vahan; BRAZOLIN, Sergio. Degradação de pinturas e elementos de fachada por organismos biológicos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6. 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ANTAC, 1995. v. 2. p. 723-728.

UFRGS. **Métodos de pesquisa**. UAB/UFRGS. Porto Alegre, Editora UFRGS, 2009. 120 p.

UNSW. **Unmanned aerial vehicle-based mapping**. School of Surveying & Spatial Information Systems, Faculty of Engineering. Aus, 2012. Disponível em: <<http://www.gmat.unsw.edu.au/currentstudents/ug/projects/Salameh/Physical%20Characteristics.htm>>. Acesso em: 29 set. 2012.

VALE, Alessandra Mendes Pacheco Guerra *et al.* Automatic segmentation and classification of blood components in microscopic images using a fuzzy approach. **Rev. Bras. Eng. Bioméd.** [online]. 2014, vol.30, n.4, pp.341-354. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1517-31512014000400007&lng=es&nrm=iso>. Acesso em: 08 jul. 2016.

VALE, Alessandra Mendes Pacheco Guerra; GUERREIRO, Ana Maria Guimarães; DÓRIA NETO, Adrião Duarte, CAVALCANTI JUNIOR, Geraldo Barroso; LEITÃO, Victor Cezar Lucena Tavares de Sá; MARTINS, Allan Medeiros. Automatic segmentation and classification of blood components in microscopic images using a fuzzy approach. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica. Brazilian Journal of Biomedical Engineering**. v. 30. N. 4. P. 341-354, 2014. 05 nov 2014.

VALE, Giovane Maia do. DAL POZ, Aluir Porfírio. Processo de detecção de bordas de Canny. **Bol. Ciênc. Geod.**, sec. Artigos, Curitiba, v. 8, n° 2, p. 67-78, 2002.

VALENÇA, J. M. de A. **Monitorização do estado de conservação de estruturas de betão por processamento de imagem e análise multi-espectral**. 2011. 285 f. Tese (Doutorado em Mecânica de Estrutura dos Metais e dos Materiais). Universidade de Coimbra. Coimbra, 2011.

VALLEJO, F. J. L. Ensuciamiento de fachadas pétreas por la contaminación atmosférica. El caso de la ciudad de Valladolid: Universidad, España. **Informes de la Construcción**, Madrid, Instituto Eduardo Torroja, v.41, n. 405, p. 45-72, 1990(b).

VALLEJO, F. J. L. **Ensuciamiento de fachadas por contaminación atmosférica: análisis y prevención**. Valladolid: Universidad, Secretariado de Publicaciones, 1990.

VERHOEVEN, G. TAELMAN, D. VERMEULEN, F. Computer vision-based orthophoto mapping of complex archaeological sites: the ancient quarry of pitaranha (Portugal–Spain). **Archaeometry**. 54, 6 (2012). 1114-1129.

VERHOEVEN, G. Taking computer vision aloft – archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan. **Archaeological Prospection**. V 18, nº 1; 2011, 67-73.

VILHENA, A. Anomalias mais frequentes na superfície corrente de paredes devidas à humidade. In: PATORREB 2003 -ENCONTRO NACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS. 1. Porto. **Anais...** Porto: FEUP. pp. 127- 135, 2003.

WALFORD, Alan. **A new way to 3D scan:** photo-based scanning saves time and money. 2009. Disponível em: <<http://www.photomodeler.com/downloads/ScanningWhitePaper.pdf>>. Acesso em 14 mai. 2013.

WATT, D. **Building pathology, principles and practice**. [S.l]: Blackwell science.1999.

WEFELSCHIED, C.; HANSCH, R; HELLWICH, O. Three-dimensional building reconstruction using images obtained by unmanned aerial vehicles. In: **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland. 2011.

WON-KI, Jeong; WHITAKER, Ross; DOBIN, Mark. Interactive 3D seismic fault detection on the graphics hardware. In: **Proceedings International Workshop on Volume Graphics** 2006, pp.111-118.

YILMAZ, H. M.; YAKAR, M.; GULEC, S. A.; DULGELER, O. N. Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. **Journal of Cultural Heritage**. 2007, 8: 428-433.

ZANDONÁ, Daniele Felix; LINGNAU, Christel; NAKAJIMA, Nelson Y. Varredura a Laser aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, p. 295-306, dez. 2008.

ZISCHINSKY, T; DORFFNER, L; ROTTENSTEINER, F. Application of a new model helicopter system in architectural photogrammetry. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. Vol. XXXIII, Supplement B5. Amsterdam 2000.