




Determinação de Coordenadas Tridimensionais para os Levantamentos do Patrimônio Cultural Edificado com Fotogrametria Digital

Determination of Three-dimensional Coordinates for Surveys of Cultural Heritage Building with Digital Photogrammetry

Deniezio dos Santos Gomes , Francisco Jaime Bezerra Mendonça 
& Andréa de Seixas 

Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Cartográfica, Recife, PE, Brasil

E-mails: deniezio@hotmail.com; jaimeufpe@gmail.com; adeseixas7@gmail.com

Resumo

A fotogrametria é a tecnologia disponível mais adequada no levantamento cadastral do patrimônio cultural edificado. O trabalho descreve procedimentos para obtenção de pontos de controle tridimensionais com precisão compatível com o levantamento fotogramétrico digital. A metodologia associou procedimentos modernos e tradicionais, tais como: uso de receptores de *Global Navigation Satellite System* (GNSS) para determinar as bases tridimensionais; nivelamento geométrico; transporte das coordenadas dos pontos da base para os locais próximos às feições com o cálculo ajustado pelo método dos mínimos quadrados a um método que determinou as coordenadas tridimensionais em função dos cossenos diretores dos ângulos medidos. O método conhecido como interseção espacial analítico foi utilizado no levantamento dos pontos de controle da igreja Nossa Senhora do Livramento, no bairro da Várzea, em Recife-PE. Fotografou-se a fachada utilizando uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) multirotor, do tipo quadricóptero. Processou-se as imagens no programa de fotogrametria digital *ContextCapture*, da Bentley. Os pontos de controle apresentaram no resultado da aerotriangulação uma precisão espacial de $\pm 0,0046\text{m}$. Concluiu-se o processo fotogramétrico digital com o modelo tridimensional fotorealístico da fachada que permite sua documentação detalhada.

Palavras-chave: Controle Geodésico; Fotogrametria Digital; Patrimônio Cultural Edificado

Abstract

Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Cartográfica The photogrammetry is the thechnology available most suitable in the cadastral survey of the built up cultural heritage. The work describes procedures for obtaining three-dimensional control points with precision compatible with the digital photogrammetric survey. The methodology associated with modern and traditional procedures, such as: use of Global Navigation Satellite System (GNSS) receivers to determine the three-dimensional bases; geometric leveling; transport of the coordinates from the base points to the locations near the features with the calculation adjusted by the least squares method to a method that determined the three-dimensional coordinates in function to the directors cosine to the angles measured. The method known as analytical spatial intersection was used to survey the control points of the church Our Lady of Deliverance, in the neighborhood of Varzea, in Recife-PE. The facade was photographed using a multi-engine Remotely Piloted Aircraft (RPA), of the quadricopter type. The images were processed using Bentley's ContextCapture digital photogrammetry program. The control points presented a spatial accuracy of $\pm 0.0046\text{m}$ in the result of the aerotriangulation. The digital photogrammetric process is completed with the photorealistic three-dimensional model of the facade that allows detailed documentation.

Keywords: Geodetic control; Digital photogrammetry; Cultural Heritage Building

1 Introdução

A utilização da fotogrametria arquitetural teve início na Europa, por volta de 1858, com o trabalho do arquiteto alemão Albrecht Meydenbauer no levantamento da catedral da cidade de Wetzlar na Alemanha, pelo procedimento da interseção fotogramétrica, baseada em duas vistas fotográficas da obra (Westphal, 1999; Altrock, 2004; Groetelaars & Amorim, 2008).

A fotogrametria passou por importantes transformações no último século. Nos anos 80 ocorre uma inovação importante, a fonte primária de dados passa a ser com imagens digitais obtidas de uma câmara digital. A fotogrametria digital representa uma forma promissora para a documentação do patrimônio arquitetônico e apresenta uma série de vantagens em relação às formas tradicionais de levantamento, como custo, rapidez, precisão e variedade de produtos que podem ser obtidos: ortofotos, desenhos e modelos geométricos tridimensionais (Groetelaars & Amorim, 2008).

A fotogrametria digital demanda pontos de controle acurados para o georreferenciamento, que sejam compatíveis com a melhor qualidade das imagens e a redução do tamanho do pixel. Entretanto, o método mais utilizado para o levantamento de coordenadas tridimensionais é o método da interseção espacial trigonométrica. O método que não utiliza nenhuma medição de distância, as coordenadas horizontais planas X e Y são obtidas em função dos ângulos horizontais X e Y entre duas estações de referências e o alvo e a coordenada Z da medição do ângulo vertical zenital. Nesse método, em consequência do processo de separação dos cálculos planimétrico e altimétrico, uma alteração na medição do ângulo horizontal, não altera o valor da coordenada Z, bem como se ocorrer uma alteração no ângulo zenital, não alterará as coordenadas X e Y. Essa circunstância, torna o método inconsistente para a determinação de coordenadas espaciais, tendo em vista que um erro em qualquer um dos ângulos implica, inevitavelmente, um erro no cálculo da posição tridimensional do ponto (Moreira, 1998; Martins, 2013).

Apresenta-se, neste trabalho, para superar essa inconsistência, o método da Interseção Espacial Analítico. Nesse método as coordenadas espaciais são definidas a partir da medição de direções horizontais e ângulos verticais entre duas estações de referência e em função dos cossenos diretores dos ângulos medidos e o ponto onde são determinadas as coordenadas tridimensionais conjuntamente.

1.1 Interseção Espacial Trigonométrica

De acordo com Moreira (1998) e Martins (2013), este foi o primeiro método desenvolvido para a determinação de

coordenadas tridimensionais, a partir de medições angulares sem a medição de distâncias.

Observa-se na Figura 1 que o cálculo das coordenadas X e Y é dependente do ângulo horizontal. Enquanto o cálculo da coordenada Z, contém somente o ângulo zenital.

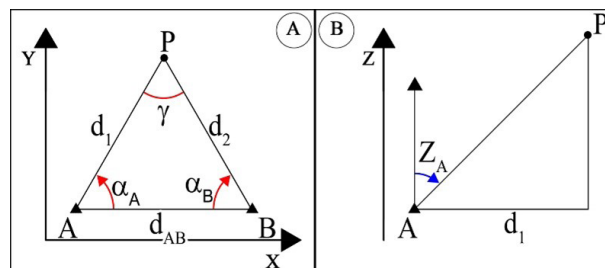


Figura 1 Método Interseção espacial trigonométrica; A. Ângulos horizontais; B. Ângulo zenital. Fonte: Os autores, 2020.

Por este método a determinação das coordenadas se dá por resolução de triângulos, Equação 1 e lei dos senos, Equações 2 e 3, com base nos elementos geométricos apresentados nas Figuras 1A e 1B.

$$\gamma = 180^\circ - (\alpha_A + \alpha_B) \tag{1}$$

$$d_1 = \frac{d_{AB} \cdot \text{sen}(\alpha_B)}{\text{sen}(\gamma)} \tag{2}$$

$$d_2 = \frac{d_{AB} \cdot \text{sen}(\alpha_A)}{\text{sen}(\gamma)} \tag{3}$$

Em que: α_A , α_B e γ são os ângulos horizontais; d_1 e d_2 são as distâncias horizontais entre as estações A e B e o ponto visado, respectivamente.

Com isto, as coordenadas X, Y e Z do ponto de interesse são dadas por:

$$X_p = X_A + d_1 \cdot \cos(\alpha_A) \tag{4}$$

$$X_p = X_B + d_2 \cdot \cos(\alpha_B) \tag{5}$$

$$Y_p = Y_A + d_1 \cdot \text{sen}(\alpha_A) \tag{6}$$

$$Y_p = Y_B + d_2 \cdot \text{sen}(\alpha_B) \tag{7}$$

$$Z_p = Z_A + d_1 \cdot \cotg(Z_A) \tag{8}$$

$$Z_p = Z_B + d_2 \cdot \cotg(Z_B) \tag{9}$$

Em que: X_A , Y_A , Z_A , X_B , Y_B , Z_B são as coordenadas das estações A e B; X_p , Y_p e Z_p são as coordenadas do ponto de interesse

1.2 Método Interseção Espacial Analítico

No método de interseção espacial analítico as coordenadas espaciais são definidas a partir da medição de direções horizontais e ângulos verticais zenitais entre duas estações de referência e o ponto a ser medido conforme descrito na Figura 2 (Silva & Segantine, 2015).

No cálculo, as linhas de visada são consideradas vetores que partem das estações conhecidas em direção ao alvo (Moreira, 1998).

Os pontos A e B possuem coordenadas conhecidas e o ponto P é o alvo a se determinar. A solução do problema exige o cálculo das distâncias inclinadas d'_{AP} e d'_{BP} (Silva & Segantine, 2015). Para a determinação das coordenadas do ponto P pelo método, é necessário o cálculo dos cossenos diretores, conforme escrito nas Equações 10, 11 e 12.

$$k_i = \text{sen}(Z_i) + \text{sen}(Az_{ip}) \quad (10)$$

$$m_i = \text{sen}(Z_i) + \cos(Az_{ip}) \quad (11)$$

$$n_i = \cos(Z_i) \quad (12)$$

Em que: k_i , m_i e n_i são os cossenos diretores; Z_i são os ângulos zenitais e Az_{ip} são os azimutes.

Deste modo obtém-se as Equações 13 a 18 para o cálculo das coordenadas do ponto P.

$$X_{P(A)} = X_A + (k_A * d'_{AP}) \quad (13)$$

$$Y_{P(A)} = Y_A + (m_A * d'_{AP}) \quad (14)$$

$$H_{P(A)} = H_A + (n_A * d'_{AP}) \quad (15)$$

$$X_{P(B)} = X_B + (k_B * d'_{BP}) \quad (16)$$

$$Y_{P(B)} = Y_B + (m_B * d'_{BP}) \quad (17)$$

$$H_{P(B)} = H_B + (n_B * d'_{BP}) \quad (18)$$

Em que: $X_{P(A)}$, $Y_{P(A)}$, $Z_{P(A)}$ e $X_{P(B)}$, $Y_{P(B)}$, $Z_{P(B)}$ são as coordenadas do ponto de interesse em função das estações A e B.

Igualando os termos X, Y e H (em função das coordenadas de A e B), e fazendo a média entre ambas as equações, tem-se 3 equações com duas incógnitas que são as distâncias inclinadas d'_{AP} e d'_{BP} . A solução pode ser obtida pelo método dos mínimos quadrados. Os resíduos são dados pelas equações (19) a (21):

$$v_1 = (d'_{AP} * k_A) - (d'_{BP} * k_B) - (X_B - X_A) \quad (19)$$

$$v_2 = (d'_{AP} * m_A) - (d'_{BP} * m_B) - (Y_B - Y_A) \quad (20)$$

$$v_3 = (d'_{AP} * n_A) - (d'_{BP} * n_B) - (H_B - H_A) \quad (21)$$

Na forma matricial expressa pela Equação (22):

$$V = AX - L = \begin{bmatrix} k_A & -k_B \\ m_A & -m_B \\ n_A & -n_B \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} d'_{AP} \\ d'_{BP} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ H_B - H_A \end{bmatrix} \quad (22)$$

Considerando o método de ajustamento paramétrico de observações, a solução do sistema é obtida conforme Equação 23.

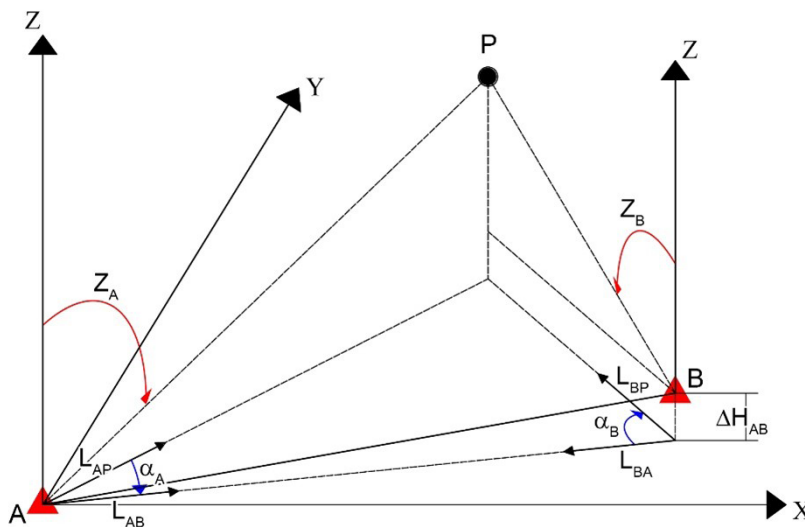


Figura 2 Método interseção espacial analítico. Fonte: Silva & Segantine, 2015.

$$X = (A^T A)^{-1} (A^T L) \tag{23}$$

De onde se obtém os valores das incógnitas d'_{AP} e d'_{BP} , as quais são substituídas nas Equações 13 a 18 para calcular as coordenadas do ponto P.

1.3 Área de Estudo

O local da pesquisa é na Rua Francisco Lacerda no Bairro Várzea, situado na Cidade de Recife em Pernambuco.

O trecho fica na Praça do Rosário entre as igrejas Nossa Senhora do Rosário e Nossa Senhora do Livramento, conforme descrito na Figura 3.

A Igreja Nossa Senhora do Livramento, segundo informação do vigário, pertencera a uma irmandade de homens escravos. Apesar do belo frontispício, que conserva suas características primitivas, não está em perfeitas condições, mas internamente já foi restaurada. O conjunto todo agrega um prédio de dois pavimentos, local do antigo seminário da Várzea, atualmente um alojamento.

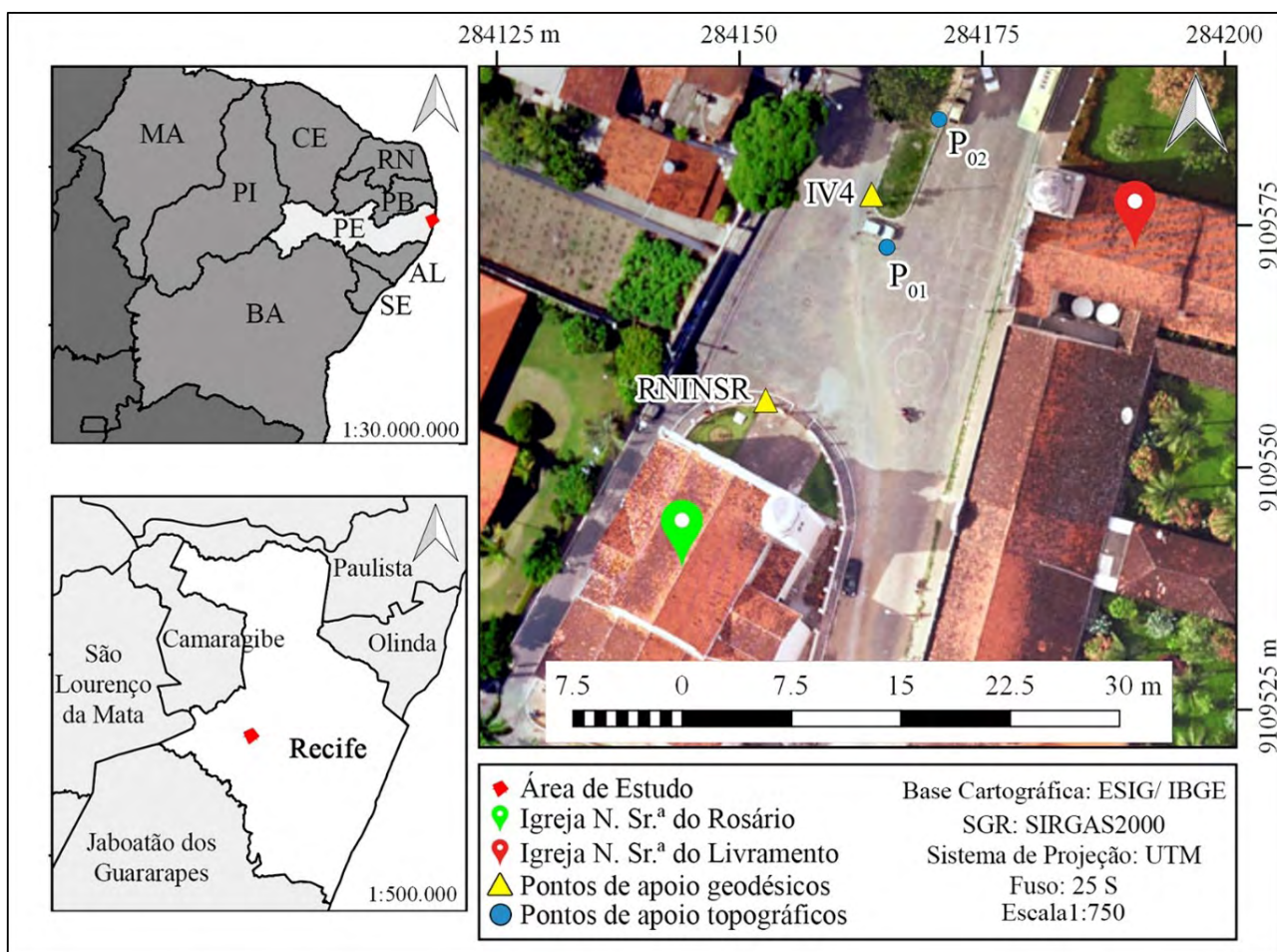


Figura 3 Mapa de localização da área de estudo.
 Fonte: Os Autores, 2020.

2 Metodologia e resultados

Descreve-se no fluxograma, Figura 4, as etapas do processo para obter pontos de controle para apoiar um levantamento fotogramétrico digital e avaliar a sua precisão, são elas: o uso de receptores GNSS; o nivelamento geométrico; o transporte das coordenadas

dos pontos da base para local próximo a fachada da igreja; levantamento considerando o método da interseção espacial analítico; as fotografias da fachada da igreja Nossa Senhora do Livramento utilizando uma ARP multirrotor, do tipo quadricoptero e o processamento das imagens no programa de fotogrametria digital *ContextCapture*, da Bentley, que considerou a calibração da câmara, o

cálculo da aerotriangulação e concluiu com o modelo tridimensional fotorrealístico da fachada da igreja Nossa Senhora do Livramento.

Detalhes do procedimento metodológico desenvolvido e descrito a seguir podem ser visualizados em Gomes (2020).

2.1 Pontos de Apoio Geodésico Tridimensionais

Materializou-se dois pontos, o IV4 e o RNINSR, conforme a Figura 3, que foram rastreados com receptores GNSS considerando o método relativo estático (Monico,

2008), para serem utilizados como apoio geodésico tridimensional. Para garantir a precisão utilizou-se dois pontos como referência conhecida: a estação PERC da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) (IBGE, 2018), e o marco geodésico EPS04 (Mendonça et al., 2010) da Rede de Referência Cadastral do Campus Recife da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Na Tabela 1, tem-se o resultado do processamento no *Topcon Tools*. As coordenadas geodésicas elipsoidais dos pontos de apoio geodésico RNINSR e IV4 em SIRGAS2000. Na Tabela 2 tem-se as coordenadas planas UTM em SIRGAS2000 dos pontos RNINSR e IV4.

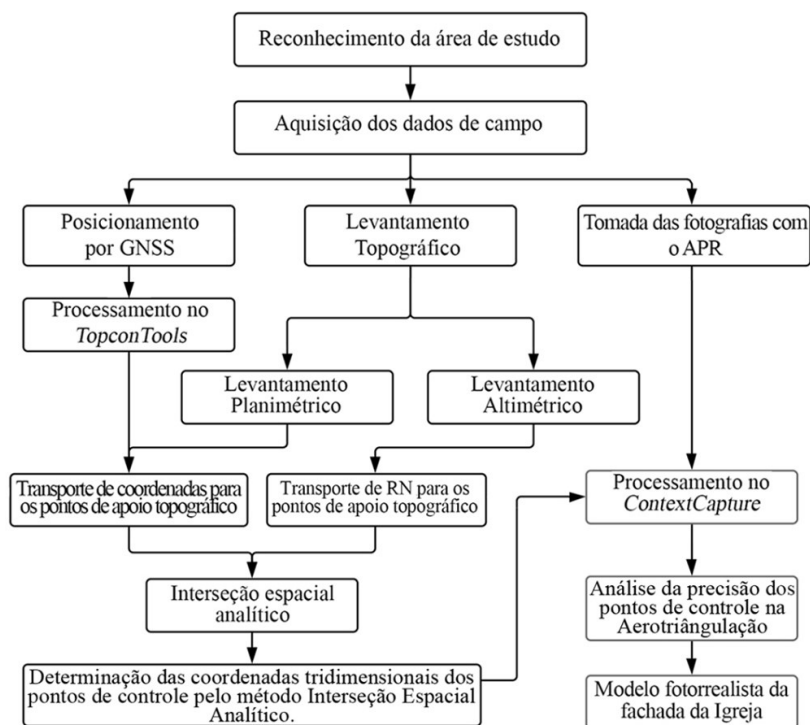


Figura 4 Fluxograma das etapas metodológicas do procedimento.

Fonte: Os autores, 2020.

Tabela 1 Coordenadas Geodésicas Elipsoidais em SIRGAS2000 dos pontos RNINSR e IV4.

ID	Lat.	σ (m)	Long.	σ (m)	Alt. Elip. (m)	σ (m)
RNINSR	8°03'03,28960"S	±0,008	34°57'30,86861"W	±0,006	5,452	±0,023
IV4	8°03'02,59823"S	±0,003	34°57'30,51187"W	±0,003	5,501	±0,009

Fonte: Os autores, 2020.

Tabela 2 Coordenadas UTM em SIRGAS2000 dos pontos RNINSR e IV4.

ID	E(m)	σ (m)	N(m)	σ (m)	Fuso	Hemisfério
RNINSR	284.152,868	±0,008	9.109.556,708	±0,006	25	Sul
IV4	284.163,691	±0,003	9.109.578,004	±0,003		

Fonte: Os autores, 2020.

2.2 Nivelamento Geométrico

Determinou-se as diferenças de nível entre o ponto RNINSR (Referência de Nível Igreja Nossa Senhora do Rosário) e os vértices IV4, P_{01} e P_{02} utilizando um Nível Digital EL302 FOIF. A referência de nível RNINSR foi determinada em Silva *et al.* (2016). De posse dos desníveis corrigidos e da altitude ortométrica da RNINSR foram calculadas as altitudes ortométricas dos pontos de apoio topográficos P_{01} e P_{02} , cujos resultados estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 Altitudes ortométricas.

ID	Altitude ortométrica (m)	σ (mm)
P_{01}	10,786	$\pm 0,007$
P_{02}	10,926	$\pm 0,002$

Fonte: Os autores, 2020.

Ressalta-se que foi realizado o Teste Kukkamäki (Kahmen & Faig, 1988) para a verificação do erro de colimação do Nível Digital EL302 FOIF. O Teste foi realizado na base de verificação de níveis do *Campus Joaquim Amazonas* da UFPE, localizada em frente ao prédio do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis – LITPEG/CTG/UFC (Seixas & Seixas, 2015).

2.3 Transporte de Coordenadas dos Pontos da Base Geodésica para os Pontos Topográficos P_{01} e P_{02} Posicionados na Frente da Fachada da Igreja

Os pontos P_{01} e P_{02} , da Figura 3, são os locais determinados para o levantamento dos pontos de controle para o levantamento fotogramétrico. Sendo necessário transportar as coordenadas dos pontos de controle geodésico IV4 e RNINSR para esses pontos. Para esse transporte, optou-se por um levantamento planimétrico considerando no levantamento o método da centragem forçada (Kahmen & Faig, 1988). Foram utilizados três tripés formando um

triângulo, com dois prismas centrados nos pontos de controle geodésico e o terceiro no ponto topográfico a determinar. Foram medidas cinco observações, sendo os três ângulos internos do triângulo e as duas distâncias planas entre os pontos de controle geodésico e o ponto topográfico a determinar.

A solução foi obtida considerando o método dos mínimos quadrados com três graus de liberdade, de acordo com Gemael (1994) e Ghilani & Wolf (2006). Foram consideradas fixas as coordenadas Planas UTM dos pontos de controle geodésicos. Na Tabela 4, tem-se as coordenadas dos pontos P_{01} e P_{02} . A distância máxima de 34m, entre os pontos de controle geodésico e os pontos de controle para o levantamento fotogramétrico possibilitou o cálculo, destes últimos, utilizando-se as coordenadas UTM.

2.4 Levantamento Tridimensional: O Método da Interseção Espacial Analítico

No levantamento considerou-se os seguintes procedimentos: as estações totais foram centradas e niveladas nos pontos P_{01} e P_{02} . Da estação centrada em P_{01} visou-se como referência o pino de ferro do ponto P_{02} , e em seguida o primeiro ponto da fachada, com medições em duas séries dos ângulos horizontais e verticais zenitais em PD e PI. Para evitar um erro de identificação dos locais dos pontos não sinalizados, a visualização de cada ponto foi sequencial das duas estações totais. Concluídas as medições do ponto F_{01} na estação da esquerda, passa-se para a estação da direita e mede-se o mesmo ponto F_{01} . Na mesma estação, mede-se o ponto F_{02} e retorna para a estação da esquerda para medir o ponto F_{02} e segue-se o procedimento. Esse cuidado permitiu que pontos de controle não sinalizados, indicados na Figura 5 fossem determinados com precisão milimétrica.

As coordenadas tridimensionais foram calculadas considerando o modelo matemático do método da interseção espacial analítico, item 1.2. Na Tabela 5, tem-se as coordenadas dos 12 pontos de controle naturais na fachada da Igreja no Sistema UTM em SIRGAS2000, obtidas das duas estações, com as altitudes ortométricas. Na Tabela 6, estão dispostos os valores médios das coordenadas, com seus respectivos desvios.

Tabela 4 Coordenadas planas UTM em SIRGAS2000 dos pontos P01 e P02.

ID	E(m)	σ (m)	N(m)	σ (m)	Fuso	Hemisfério
P01	284.165,288	$\pm 0,001$	9.109.572,568	$\pm 0,003$	25	Sul
P02	284.170,583	$\pm 0,003$	9.109.585,806	$\pm 0,004$		

Fonte: Os autores, 2020.

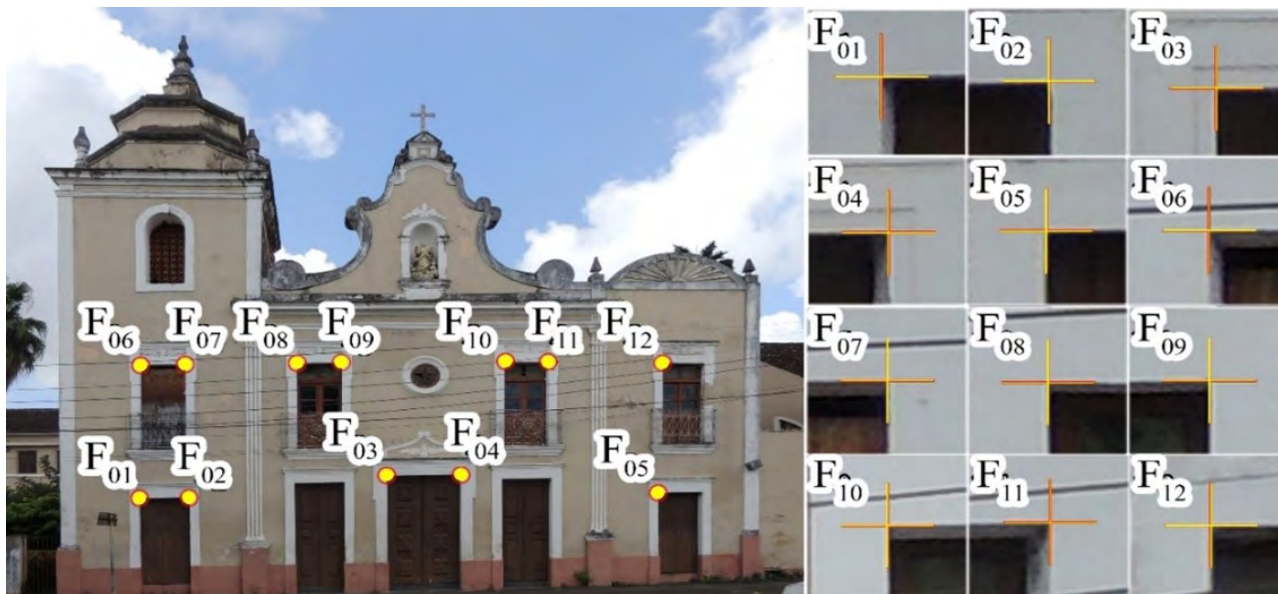


Figura 5 Pontos de controle naturais levantados na fachada da Igreja Nossa Senhora do Livramento.

Fonte: Os autores, 2020.

Tabela 5 Coordenadas UTM em SIRGAS2000/ Fuso 25S, obtidas de cada estação, dos pontos de controle da fachada determinadas pelo método interseção espacial analítico.

ID	Da estação de P ₀₁			Da estação de P ₀₂		
	E (m)	N (m)	H (m)	E (m)	N (m)	H (m)
F ₀₁	284.183,594	9.109.580,729	13,395	284.183,597	9.109.580,728	13,394
F ₀₂	284.183,325	9.109.579,634	13,405	284.183,329	9.109.579,633	13,402
F ₀₃	284.182,179	9.109.575,381	13,899	284.182,184	9.109.575,380	13,896
F ₀₄	284.181,772	9.109.573,756	13,898	284.181,777	9.109.573,754	13,894
F ₀₅	284.180,705	9.109.569,301	13,288	284.180,708	9.109.569,301	13,285
F ₀₆	284.183,573	9.109.580,679	16,936	284.183,587	9.109.580,674	16,939
F ₀₇	284.183,332	9.109.579,705	16,941	284.183,347	9.109.579,699	16,941
F ₀₈	284.182,704	9.109.577,326	16,953	284.182,719	9.109.577,320	16,952
F ₀₉	284.182,454	9.109.576,341	16,892	284.182,452	9.109.576,342	16,950
F ₁₀	284.181,550	9.109.572,784	16,933	284.181,564	9.109.572,779	16,934
F ₁₁	284.181,299	9.109.571,803	16,930	284.181,312	9.109.571,798	16,931
F ₁₂	284.180,671	9.109.569,200	16,865	284.180,684	9.109.569,196	16,868

Fonte: Os autores, 2020.

A análise dos desvios da média das coordenadas E, N e H, na Tabela 6, é um indicativo de precisão do método interseção espacial analítico. As coordenadas determinadas das duas estações são independentes: as fórmulas (13) a (15) para uma estação e as de (16) a (18) para a outra.

Observa-se que no conjunto das 36 coordenadas somente a coordenada H do ponto F₀₉ apresenta o valor do desvio da média centimétrico, de ±0,029m, indicando um possível erro de medição. As 33 coordenadas dos 11 pontos de controle tridimensionais, após a retirada do ponto F₀₉,

apresentam o desvio da média milimétrico, com o maior valor de $\pm 0,007\text{m}$.

2.5 Fotografias da Fachada da Igreja Nossa Senhora do Livramento Utilizando uma ARP Multirotor, do Tipo Quadricoptero

Para a realização desta etapa, foi utilizado um ARP modelo DJI *Phanton 4 Advanced* pertencente ao Laboratório de Cartografia Costeira (LACCOST) da Universidade Federal de Pernambuco.

As imagens foram obtidas com faixas na horizontal e vertical com a câmera do ARP nas posições ortogonal e oblíqua em relação a fachada. As Figuras 6A e 6B apresentam os detalhes do levantamento fotográfico da fachada da igreja. O levantamento foi realizado com céu nublado, para minimizar os efeitos de sombras na fachada da Igreja.

2.6 Cálculo da Aerotriangulação das Imagens no Programa de Fotogrametria Digital ContextCapture, da Bentley

Optou-se por utilizar o programa de fotogrametria digital *ContextCapture* da Bentley para obter o modelo fotorrealístico tridimensional, além de avaliar o seu uso, identificar suas potencialidades e divulgar a metodologia. A Universidade Federal de Pernambuco tem um contrato do Programa Bentley *SELECT* com a Bentley: *Advancing Infrastructure*.

2.6.1 ContextCapture

O programa é apresentado como sendo uma ferramenta acessível a qualquer profissional, que gera modelos detalhados em 3D a partir de fotografias. Na Figura 7 apresenta-se o fluxo de dados que orienta o processo.

Iniciou-se informando o nome do projeto que, em seguida, abriu a primeira “aba” que permite entrar com as 173 fotos da fachada. Após introduzidas as imagens das fotos, o programa indica a continuidade do processamento ativando a ação “*submit aerotriangulation*”. Acionado esse procedimento são abertas três “abas” sequenciais até que o programa conclua o cálculo do processo, denominado “*aerotriangulation*”. A primeira “aba” aberta “*Output block name*” aguarda o nome para o bloco formado pelo conjunto de fotos. No presente trabalho só existe um único grupo de fotos, mas o programa pode trabalhar com vários blocos, com câmaras diferentes e até mesmo com nuvens de pontos.

Na segunda “aba” “*Positioning/Georeferencing*” foram medidos os locais dos 12 pontos de controle medidos na fachada. A Figura 8 permite a visualização do procedimento com o uso do *zoom* e informa que os pontos estão no sistema de referência SIRGAS2000 / UTM zone 25S, *European Petroleum Survey Group* (EPSG): 31985.

Caso não sejam utilizados pontos de controle, a aerotriangulação irá georreferenciar as imagens e utilizará um sistema arbitrário e a aerotriangulação fará somente a calibração da câmara e determinará uma orientação relativa entre as fotos do bloco que permite uma visão 3D de todo o conjunto das fotos, mas sem escala e orientação.

Tabela 6 Valores médios das coordenadas UTM em SIRGAS2000/ Fuso 25S, com os desvios, dos pontos de controle da fachada, determinadas pelo método interseção espacial analítico.

ID	E (m)	σ (m)	N (m)	σ (m)	H (m)	σ (m)
F ₀₁	284.183,595	$\pm 0,002$	9.109.580,729	$\pm 0,002$	13,395	$\pm 0,001$
F ₀₂	284.183,327	$\pm 0,002$	9.109.579,634	$\pm 0,002$	13,404	$\pm 0,001$
F ₀₃	284.182,182	$\pm 0,003$	9.109.575,380	$\pm 0,001$	13,897	$\pm 0,001$
F ₀₄	284.181,774	$\pm 0,003$	9.109.573,755	$\pm 0,001$	13,896	$\pm 0,002$
F ₀₅	284.180,706	$\pm 0,002$	9.109.569,301	$\pm 0,000$	13,286	$\pm 0,001$
F ₀₆	284.183,580	$\pm 0,007$	9.109.580,676	$\pm 0,002$	16,937	$\pm 0,001$
F ₀₇	284.183,339	$\pm 0,007$	9.109.579,702	$\pm 0,003$	16,941	$\pm 0,000$
F ₀₈	284.182,711	$\pm 0,007$	9.109.577,323	$\pm 0,003$	16,953	$\pm 0,001$
F ₀₉	284.182,453	$\pm 0,001$	9.109.576,342	$\pm 0,000$	16,921	$\pm 0,029$
F ₁₀	284.181,557	$\pm 0,007$	9.109.572,781	$\pm 0,002$	16,934	$\pm 0,001$
F ₁₁	284.181,306	$\pm 0,007$	9.109.571,800	$\pm 0,002$	16,930	$\pm 0,001$
F ₁₂	284.180,678	$\pm 0,006$	9.109.569,198	$\pm 0,002$	16,867	$\pm 0,002$

Fonte: Os autores, 2020.

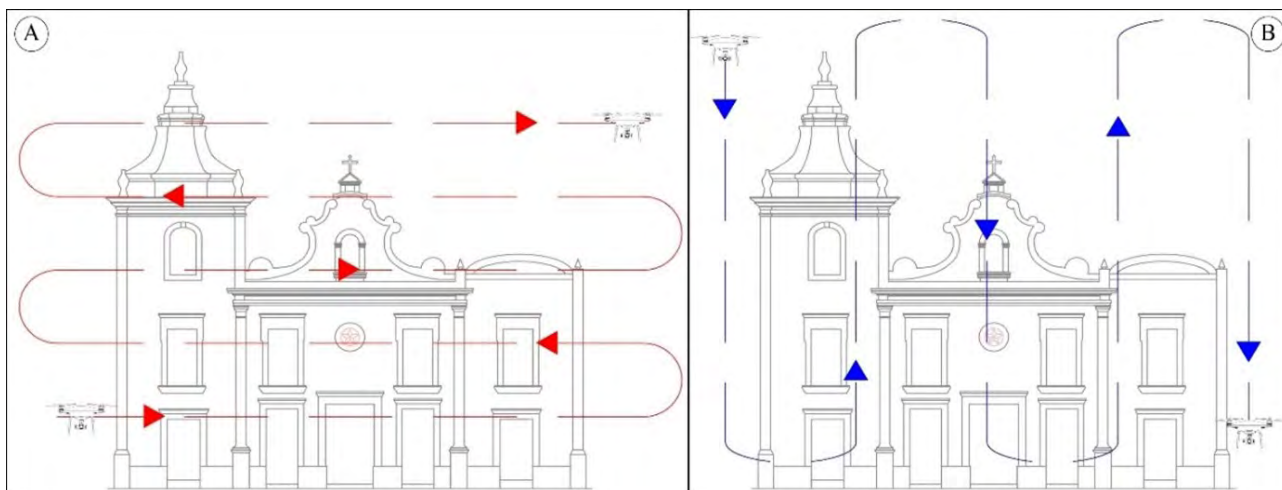


Figura 6 Detalhes do levantamento da fachada; A. voo na horizontal; B. voo na vertical.

Fonte: Os autores, 2020.



Figura 7 Etapas para a produção de modelo tridimensional no ContextCapture.

Fonte: ContextCapture, 2020.

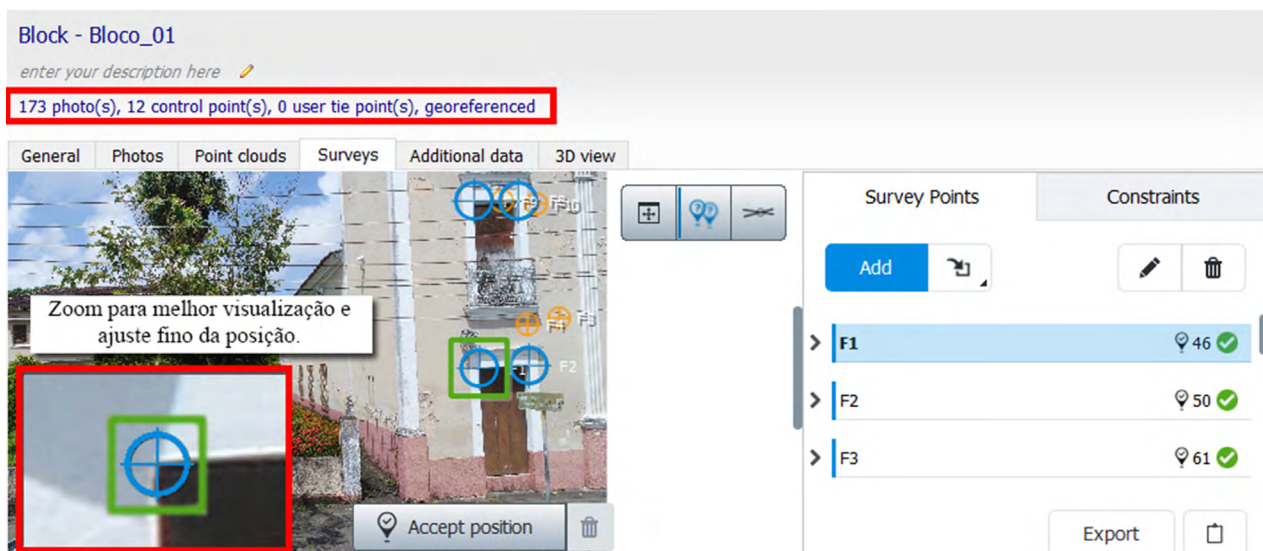


Figura 8 Inserção dos pontos de controle nas imagens.

Fonte: ContextCapture, 2020.

Concluída a aerotriangulação é disponibilizado o relatório “Quality Report”, com os detalhes do resultado. O relatório é dividido em três partes: “Project Summary”, “Camera Calibration”, e “Control Points Error”. No Project

Summary são apresentadas as informações básicas como: o número de fotos utilizadas, no caso 173 fotos, a área levantada, que foi de 2.499,77 m² A quarta informação é importante “Average ground resolution” (Resolução Média

no Solo), equivalente ao *Ground Sample Distance (GSD)*, ou seja, o valor que representa o tamanho de 1 pixel em metros, no presente trabalho o valor determinado foi de 2,72011mm/pixel. Além disso, relaciona dados importantes referentes com a qualidade da fotogrametria digital: os “*Keypoints*”, que são os pontos comuns detectados automaticamente por correlação durante a aerotriangulação, que no projeto foi de uma média de 19.796 por fotos; o número de “*Tiepoints*”, pontos de ligação detectados automaticamente pelo *ContextCapture*, sendo um ponto de ligação o ponto 3D identificado em mais de duas imagens, que no projeto foi de 50.040 pontos, com uma média de

1778 pontos por fotos e a informação do “*Reprojection error*”, ou seja o Erro de Reprojeção em pixels, que foi de 0,62 pixel, ver na Figura 9.

Na parte “*Camera Calibration*” encontram-se os resultados da calibração da câmara, dados do sensor. A Figura 10 traz os dados calibrados do sensor: a distância focal calibrada (c), da posição do ponto principal (x0, y0) em pixels, os coeficientes k1, k2 e k3 da distorção radial simétrica, causada no processo de fabricação da lente e os coeficientes p1 e p2 da distorção descentrada motivada pelo não alinhamento dos eixos óticos das lentes que formam a objetiva (Galo, 1993).

Project Summary	
Project:	Artigo_context
Number of photos:	173
Ground coverage:	2499.77 square meters
Average ground resolution: ⓘ	2.72011 mm/pixel
Scale: ⓘ	1 : 8
Camera mode(s):	DJI FC6310
Processing date:	21/03/2020 14:22
Processing time:	47min 26s
Quality Overview	
Dataset: ⓘ	173 of 173 photos calibrated (100%)
Keypoints: ⓘ	Median of 19796 keypoints per image
Tie points:	50040 points, with a median of 1778 points per photo.
Reprojection error (RMS):	0.62 pixels
Positioning / scaling:	Georeferenced using control points

Figura 9 Resumo do projeto.

Fonte: ContextCapture, 2020.

Camera Calibration					
DJI FC6310 8.8mm 5472x3078					
Name:	DJI FC6310				
Model type: ⓘ	Perspective				
Image dimensions:	5472x3078 pixels				
Sensor size:	13.2 mm				
Number of photos:	173				
Calibration Results					
	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm] ⓘ	Principal Point X [pixels] ⓘ	Principal Point Y [pixels]	
Previous Values	8.8	24			
Optimized Values	8.80584	24.0159	2718.42	1552.34	
Difference Previous / Optimized	0.00584	0.0159			
	K1 ⓘ	K2	K3	P1	P2
Previous Values					
Optimized Values	0.000930995	-0.0143304	0.0147465	-4.88357e-05	-0.000171637
Difference Previous / Optimized					

Figura 10 Resultados da calibração da câmera DJI FC6310.

Fonte: ContextCapture, 2020.

3 Discussão

O modelo matemático da aerotriangulação no “ContextCapture” utiliza o ajuste de feixe, “bundle adjustment”, que considera a equação de colinearidade que relaciona um ponto no espaço objeto tridimensional a um ponto no espaço imagem bidimensional. São três, o número mínimo de pontos de controle com coordenadas tridimensionais conhecidas para o georreferenciamento (Mikhail et al., 2001).

A partir do quarto ponto de controle tridimensional o relatório da aerotriangulação passa a divulgar a precisão dos pontos de controle com o cálculo do erro médio quadrático: “Horizontal Error (meters)”, “Vertical Error (metres)”, “3D Error (metres)”, para cada ponto e o “Global RMS” para o conjunto dos pontos.

3.1 A precisão dos Pontos de Controle na Aerotriangulação

O erro médio quadrático é uma medida das diferenças entre os valores das coordenadas inseridas na aerotriangulação obtidas no método da interseção espacial analítico e as calculadas na aerotriangulação. O erro médio quadrático é calculado pela formulação da Equação 24.

Na Figura 11, encontram-se os resultados do relatório da aerotriangulação, no item “Control points errors”, do conjunto dos pontos de controle determinados na fachada da igreja. Inicialmente doze pontos foram medidos. Entretanto, o ponto identificado como F₀₉ foi retirado da medição na aerotriangulação no ContextCapture depois da análise na Tabela 6, por indicar conter erro de medição, e número total de pontos de controle ficou em onze pontos.

$$RMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Coordenada de referência} - \text{Coordenada calculada})^2} \tag{24}$$

Control Points Errors									
Name	Category	Accuracy [meters]	Number of Calibrated Photos	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]	3D Error [meters]	Horizontal Error [meters] ⓘ	Vertical Error [meters]	Ⓢ
F1	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	46 (46 marked photos)	1.94	0.0032	0.0046	X: 0.00015; Y: -0.00432	-0.00157	Ⓢ
F2	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	50 (50 marked photos)	1.52	0.00399	0.00524	X: 0.0033; Y: -0.00134	-0.00385	Ⓢ
F3	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	61 (61 marked photos)	1.68	0.00343	0.00407	X: -0.00141; Y: -0.00035	-0.00154	Ⓢ
F4	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	67 (67 marked photos)	2.56	0.00666	0.00666	X: -0.00197; Y: 0.00093	-0.00629	Ⓢ
F5	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	50 (50 marked photos)	2.22	0.00576	0.00621	X: -0.00279; Y: 0.00081	-0.00549	Ⓢ
F6	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	62 (62 marked photos)	1.21	0.00512	0.00411	X: -0.00363; Y: 0.00057	0.00184	Ⓢ
F7	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	65 (65 marked photos)	1.12	0.00509	0.00229	X: -0.00024; Y: 0.00041	0.00225	Ⓢ
F8	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	71 (71 marked photos)	1.51	0.00621	0.0038	X: 0.00179; Y: 0.00023	0.00335	Ⓢ
F10	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	73 (73 marked photos)	0.9	0.00552	0.00216	X: 0.00028; Y: 0.00157	0.00146	Ⓢ
F11	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	76 (76 marked photos)	1.6	0.00685	0.00446	X: 0.00238; Y: 0.00126	0.00355	Ⓢ
F12	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	67 (67 marked photos)	1.78	0.00751	0.00514	X: 0.00409; Y: 0.00282	0.00134	Ⓢ
Global RMS				1.7	0.00556	0.00463	X: 0.0024; Y: 0.00206	0.00338	
Median				1.6	0.00552	0.00446	X: 0.00015; Y: 0.00057	0.00134	

Figura 11 Resultados dos erros dos 11 pontos de controle.

Fonte: ContextCapture, 2020.

O resultado apresenta, na Figura 11, que a precisão 3D do conjunto de pontos determinados pelo método da interseção espacial analítico é milimétrica, de $\pm 0,00463\text{m}$. O maior valor do desvio está no ponto F_4 de $\pm 0,00666\text{m}$ e o menor $\pm 0,002163\text{m}$ no ponto F_{10} .

3.2 Modelo Fotorrealista

Segundo Amorim (2007), a documentação arquitetônica é compreendida como o processo sistemático de aquisição, tratamento, indexação, armazenamento, recuperação, disponibilização e divulgação de dados e informações, gráficas e não gráficas, sobre as edificações e os sítios, onde estão inseridas, para os mais variados usos.

A geração de um modelo fotorrealista para a documentação gráfica de uma edificação tem grandes vantagens. Este pode servir de apoio para reformas ou até mesmo reconstrução, como é o caso da Catedral de Notre Damme, na França, que foi destruída por um incêndio em abril de 2019, na qual modelos tridimensionais fotorrealistas estão sendo empregados como auxiliares na reconstrução da mesma.

Concluída a etapa da aerotriangulação no *Context-Capture* seguiu o processamento para “*New Reconstruction*”, na opção “*3D Mesh*”, que é a opção para obter o modelo fotorrealista da fachada da Igreja Nossa Senhora do Livramento criado no *ContextCapture*.

A Figura 12 traz uma vista em perspectiva da fachada da Igreja Nossa Senhora do Livramento, extraída do software *ContextCapture Editor*.



Figura 12 Perspectiva da fachada da Igreja N.S.^a do Livramento.

Fonte: *ContextCapture Editor*, 2020.

4 Conclusões

O conjunto dos pontos tridimensionais determinados pelo método da interseção espacial analítico, quando testados na aerotriangulação do programa de fotogrametria digital “*ContextCapture*”, apresentaram uma precisão tridimensional de $\pm 0,0046\text{m}$.

A precisão milimétrica é compatível com os avanços da fotogrametria digital, que na presente pesquisa tem uma

“*Average ground resolution*” (Resolução Média no Solo), o valor que representa o tamanho de 1 pixel em metros de $2,72011\text{mm/pixel}$.

A utilização do método interseção espacial analítico, com estações simultâneas, com alternância do mesmo operador, permitiu a identificação de pontos não sinalizados, imposição de imóveis tombados do patrimônio cultural edificado.

O modelo tridimensional fotorrealístico da fachada da Igreja da Nossa Senhora do Livramento permite uma análise detalhada para fins de documentação do monumento.

Deve-se sempre considerar que as observações contêm inevitáveis erros. Portanto, as medições que compõem a metodologia precisam considerar um critério de rejeição e os equipamentos utilizados devem ser devidamente checados e, se necessário, calibrados.

5 Agradecimentos

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), por meio do Departamento de Engenharia Cartográfica (DECart) e através do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (PPGCGTG), que disponibilizaram suas instalações e aplicativos computacionais, como o Laboratório de Geodésia (LAGEO), Laboratório de Cartografia Costeira (LACCOST) e o Laboratório de Topografia (LATOP), assim como a concessão dos equipamentos e acessórios.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo apoio financeiro.

6 Referências

- Altrock, P.V. 2004. *Aplicações da fotogrametria arquitetural digital na documentação de edificações históricas: estudo das obras do Brigadeiro Joseph da Silva Paes, Séc. XVIII*. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação de Mestrado, 181p.
- Amorim, A.L. 2007. Documenting Architectural Heritage in Bahia–Brazil, Using Digital Technologies. *In: INTERNATIONAL CIPA SYMPOSIUM*, 21, Atenas, Artigo Completo.
- Galo, M. 1993. *Calibração e aplicação de câmaras digitais*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado, 143p.
- Gemael, C. 1994. Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas. Curitiba, Editora da UFPR, 319p.
- Ghilani, C.D. & Wolf, P.R. 2006. *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*. New Jersey, John Wiley & Sons, 611p.
- Gomes, D.S. 2020. *Metodologia para Georreferenciamento 3D com Fotogrametria Digital nos levantamentos do Patrimônio Cultural Edificado*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação de Mestrado, 189p.
- Groetelaars, N.J. & Amorim, A.L. 2008. A Fotogrametria Digital na Documentação do Patrimônio Arquitetônico. *Revista Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável*, 2, p. 40-47.
- IBGE. 2018. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. RBMC - Rede brasileira de monitoramento contínuo dos sistemas GNSS: Relatório de Informação de Estação PERC – Recife.
- Kahmen, H. & Faig, W. 1988. *Surveying*. Berlin, Walter Gruyter e Co, 578p.
- Martins, D.O. 2013. *Determinação de coordenadas espaciais a partir do método das distâncias mínimas*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 256p.
- Mendonça, F.J.B.; Garnés, S.J.; Pereira, C.M.; Neto, J.A.B. & Melo, W.D.A. 2010. Análise do ajustamento por mínimos quadrados de uma trilateração topográfica com injunções nos Planos UTM e Topocêntrico. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO*, 3, Recife. 2010, Artigo Completo, Recife, EdUFPE, p. 001-009.
- Mikhail, E.M.; Bethel, J.S. & McGlone, J.C. 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry*. Wiley: New York, NY, USA, p. 496.
- Monico, J.F.G. 2008. *Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo, Editora Unesp, 476 p.
- Moreira, A.P. 1998. *Métodos de cálculo de coordenadas tridimensionais para o controle de obras de engenharia*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 307p.
- Seixas, A. & Seixas, J.R. 2015. Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis - LITPEG CTG/UFPE. Projeto de Pesquisa nº 3076.040512/2015-15 Propesq/UFPE.
- Silva, I. & Segantine, P.C.L. 2015. *Topografia para engenharia: teoria e prática de Geomática*. Rio de Janeiro, Elsevier Editora Ltda, 412p.
- Silva, T.R.F.; Nascimento, C.R. & Seixas, A. 2016. Levantamento topográfico planialtimétrico da Igreja Nossa Senhora do Rosário, Bairro da Várzea, Recife – Pernambuco e seu entorno. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO*, 6, Recife, 2016. Artigo completo, Recife, EdUFPE, p. 01-10.
- Westphal, F.S. 1999. *A fotogrametria arquitetural digital como ferramenta ao planejamento urbano*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação de Mestrado, 116p.

Recebido em: 06/08/2020

Aprovado em: 30/11/2020

How to cite:

Gomes, D.S.; Mendonça, F.J.B.; & Seixas, A. 2021. Determinação de Coordenadas Tridimensionais para os Levantamentos do Patrimônio Cultural Edificado com Fotogrametria Digital. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44: 37203. DOI 1982-3908_2021_44_37203