

Revista Brasileira de Cartografia (2016) N^o 68/1: 193-210
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ESTUDO DE MAPEAMENTO EM AMBIENTE INTERNO COM IMAGENS TOF OBJETIVANDO A DOCUMENTAÇÃO DE PATRIMÔNIO HISTÓRICO

*A study of Indoor Mapping with TOF Images (Range Images)
Aiming at Historical Heritage Documentation*

**Andrey Augusto Alves de Oliveira¹, Jorge Antonio Silva Centeno¹,
Alex Soria Medina² & Felipe Martins Marques da Silva¹**

¹Universidade Federal do Paraná – UFPR

Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas

Caixa postal 19001 - Centro Politécnico, Jardim das Américas - 81531-990 - Curitiba, Paraná, Brasil
oliveiraa5555@gmail.com; centeno@ufpr.br; felipemarques21@hotmail.com

²Universidade Federal do Paraná – UFPR

Departamento de Geomática

Caixa postal 19001 - Centro Politécnico, Jardim das Américas - 81531-990 - Curitiba, Paraná, Brasil
asmedina@ufpr.br

*Recebido em 15 de Setembro, 2015/ Aceito em 16 de Janeiro, 2016
Received on September 15, 2015/ Accepted on January 16, 2016*

RESUMO

Neste estudo foi avaliada a qualidade geométrica do mapeamento de um painel em relevo denominado “O Tempo e a Vida”, realizado através de imagens TOF tomadas com a câmara CamCube 3, visando a documentação para conservação e restauração de fachadas arquitetônicas e monumentos. Para isto, foi analisado o tempo de integração adequado para a tomada das imagens com distâncias variando de 1 a 6 metros. Realizou-se a filtragem estatística das nuvens de pontos para a remoção de outliers. Foi testado o registro geométrico com o algoritmo ICP utilizando sobreposição de 52 e 84 % entre as nuvens de pontos adjacentes, respectivamente nos Experimentos 1 e 2 realizados. As nuvens de pontos registradas foram transformadas em duas ortoimagens para avaliação da acurácia horizontal, resultando em RMS de 1,5 e 1,2 cm. Estes valores correspondem às escalas de mapeamento 1:100 e 1:50 especificadas pela ASPRS (1989). Verificou-se que as nuvens de pontos podem ser geradas com erro esperado de 1,5 cm. Se for utilizada alta sobreposição entre as imagens TOF para a realização do registro geométrico, conforme o Experimento 2, o erro esperado pode diminuir para 1,0 cm. De acordo com especificações do comitê internacional CIPA (1981), estes valores possibilitam mapeamentos na escala 1:50.

Palavras chaves: Imagem TOF, Registro Geométrico, Documentação de Patrimônio Histórico.

ABSTRACT

This work evaluated the geometric accuracy of 3D mapping of the panel in relief “O Tempo e a Vida” by TOF images taken with the CamCube 3 camera aiming at the documentation for conservation and restoration of architectural facades and monuments. For this, we analyzed the appropriate integration time for taking TOF images with distances ranging from 1 to 6 meters. It was performed statistical filtering of point clouds for the outliers removal. It tested the geomet-

ric registration with the ICP algorithm using overlay with 52 and 84 % among the of adjacent point clouds. The two registered point clouds were transformed into two orthoimages for planimetric evaluation of accuracy, resulting in 1.5 and 1.2 cm. These values correspond to the mapping scales 1: 100 to 1:50 specified by ASPRS (1989). Was verified that the point cloud may be generated with expected error of 1.5 cm. If TOF images are taken with high overlap for the geometric registration, as Experiment 2, the expected error may decrease to 1.0 cm. According to specifications of the International Committee CIPA (1981), these values allow mappings in scale of 1:50.

Keywords: TOF Image, Geometric Registration, Historical Heritage Documentation.

1. INTRODUÇÃO

O decreto-lei nº 25 de 30 de novembro de 1937 dispõe sobre a proteção do patrimônio histórico e artístico nacional. Define-o como conjunto dos bens móveis e imóveis existentes no país, cuja conservação seja de interesse público por sua vinculação a fatos memoráveis da história do Brasil, por seu valor arqueológico ou etnográfico, bibliográfico ou artístico. Para que estes bens sejam considerados como tal, devem estar inscritos em um dos quatro Livros do Tombo do Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional: Tombo Arqueológico, Etnográfico e Paisagístico; Tombo Histórico; Tombo das Belas Artes; Tombo das Artes Aplicadas.

O mapeamento do patrimônio histórico e artístico é realizado com o objetivo de fornecer informações métricas para a documentação no processo de tombamento. O levantamento das medidas pode ser realizado de forma direta e indireta. Diretamente, medidas podem ser realizadas utilizando trenas, fitas de aço e paquímetros. Indiretamente, as medidas podem ser obtidas por diversas técnicas, dentre elas citam-se as topográficas, fotogramétricas e de sensoriamento remoto, utilizando equipamentos como estações totais, câmaras digitais ou sistemas *laser scanner* terrestres.

Observou-se a possibilidade de aplicar imagens tomadas com câmaras TOF no mapeamento de objetos contidos em ambientes internos, tais como feições arquitetônicas e obras de arte, que se tenha interesse histórico e que seja necessária informação métrica para o seu tombamento.

Um parâmetro utilizado para distinguir ambientes internos e externos é a luminosidade. A intensidade produzida por uma fonte natural é maior na faixa do espectro visível do que a emitida artificialmente (ZHOU *et al.*, 2012).

O sistema TOF apresenta fonte de iluminação própria, com isto, a iluminação exterior interfere nas medidas de distância e deve ser considerada no momento do levantamento dos dados. Para isto, existem parâmetros configuráveis como o tempo de integração e a frequência de modulação do sistema no momento de tomada das imagens TOF.

A maioria das câmaras TOF disponíveis no mercado possui alta taxa de tomada de imagens, em média 25 quadros por segundo (FPS - *Frames Per Second*), possibilitando a aquisição superabundante de informação dos objetos imageados, inclusive através de vídeos (PIATTI, 2010).

Visando a extração de informações métricas, os dados das imagens TOF devem ter sua qualidade geométrica avaliada. Conforme estudo realizado por May *et al.* (2008) esta qualidade é afetada por erros sistemáticos e não sistemáticos, tais como a presença de ruído, iluminação ambiente, distâncias envolvidas no levantamento, orientações e refletividade das superfícies dos objetos.

Neste estudo foram utilizados arquivos de distâncias de imagens TOF tomadas com a câmara CamCube 3. A partir destes foram geradas nuvens de pontos objetivando a modelagem tridimensional das superfícies do painel “O Tempo e a Vida” do artista curitibano Poty Lazzarotto. O painel encontra-se no saguão de entrada do edifício do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), localizado no Centro Politécnico, campus da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo descreve-se, brevemente, estudos de mapeamento com imagens TOF, o princípio utilizado para medir as distâncias, as informações contidas nas imagens TOF, além das escalas para a representação gráfica

de levantamento fotogramétrico visando à documentação de patrimônio arquitetônico.

2.1 Mapeamento com imagem TOF

Estudos sobre mapeamentos com imagens TOF foram realizados nas mais diferentes áreas, tais como a Visão Computacional (WIEDEMANN *et al.*, 2008), prevenção de acidentes na indústria automobilística (RINGBECK, 2007), mapeamentos *indoor* para a movimentação robótica (MAY *et al.*, 2008), Computação Gráfica (KOLB *et al.*, 2009; KOCH *et al.*, 2009) e análise de deformações (JAMTSO, 2010).

Rinaudo e Chiabrando (2013) utilizaram imagens TOF tomadas com a câmara SR-4000 para mapear a janela da igreja de San Giorgio, em Valperga na Itália. O estudo foi realizado com o objetivo de documentação do patrimônio histórico e artístico. Para comparação das medidas utilizaram nuvens de pontos provenientes de varreduras com dois sistemas *laser scanner* terrestres. Obtiveram acurácia global de 1,5 cm em suas áreas de teste com superfícies planas.

Em estudo com a câmara CamCube 3, Becker (2014) realizou a comparação entre o registro das nuvens de pontos geradas com imagens TOF e a nuvem de referência levantada com *laser scanner* terrestre. Concluiu que aproximadamente 56 % dos pontos gerados apresentaram erro inferior a 3 cm em relação à nuvem de referência. Observou também que na região central das nuvens de pontos geradas, com maior densidade de pontos e nas superfícies planas das paredes, as diferenças encontradas foram de 1 cm. Também foram avaliados erros entre os pontos da nuvem gerada com superfícies planas de áreas pré-definidas na nuvem de referência. Neste caso, verificou erros de 2 a 3 cm.

Outros estudos de mapeamentos com imagens TOF foram realizados por Kahlmann *et al.* (2006) que obtiveram erros de 1 cm para as superfícies medidas à distância de 2,5 m. Wiedemann *et al.* (2008) obteve erro de 4 cm para a distância de 4 m. Kolb *et al.* (2009) obteve erro de 2 cm para distâncias medidas variando de 1 m à 4,5 m. Oliveira (2011) obteve erro de 2 cm para a superfície medida à 1,3 m.

2.2 Medida de distância TOF

A medida de distância no sensor *Photonic Mixer Device* (PMD) é realizada com o princípio *Time-Of-Flight* (TOF), através do método da diferença de fase de uma onda contínua e uma Função de Correlação (FC) entre o sinal emitido e recebido. A iluminação é feita através de díodos emissores de luz o que possibilita a obtenção da FC a partir da forma senoidal do sinal recebido (RAPP, 2007).

Com a FC é possível extrair a distância entre o objeto e o sensor utilizando quatro amostras (A_1 , A_2 , A_3 , A_4) com defasagem de 90° . A diferença de fase (φ) entre o sinal emitido e recebido é proporcional à distância e calculada através da Equação (1).

$$\varphi = \arctan\left(\frac{A_1 - A_3}{A_2 - A_4}\right) \quad (1)$$

Através das Equações (2) e (3) são calculadas a amplitude (a) e o valor de intensidade (b) do sinal recebido.

$$a = \frac{\sqrt{(A_1 - A_3)^2 + (A_2 - A_4)^2}}{2} \quad (2)$$

$$b = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4} \quad (3)$$

Conhecendo-se a frequência modulada (f_{mod}) do sinal emitido e o valor constante (c) da velocidade da luz, calcula-se a distância (d) entre a câmara e o objeto através da Equação (4).

$$d = \frac{c \cdot \varphi}{4\pi \cdot f_{mod}} \quad (4)$$

A distância máxima que pode ser medida para um determinado comprimento de onda é função da frequência em que o sinal foi emitido. Em um sinal modulado com frequência de e comprimento de onda, conforme a Equação (5) a distância máxima que poderá ser medida será 7 metros (MÖLLER *et al.*, 2005).

$$d = \frac{\lambda_{mod}}{2} = \frac{14}{2} = 7 \text{ m} \quad (5)$$

2.3 Imagem TOF

Neste estudo foram utilizadas imagens TOF tomadas com a câmara PMD CamCube 3. Estas imagens contêm informações de amplitudes, intensidades e distâncias para o sinal emitido. Exemplos dos arquivos de intensidades e distâncias são ilustrados com as figuras 1 e 2.



Fig. 1 - Arquivo de intensidades da imagem TOF.

O arquivo de distâncias é ilustrado com a Figura 2. As cores vermelha e azul representam os *pixels* das superfícies mais próximas (4,71 m) e mais afastadas (5,31 m) da câmara no momento da tomada.

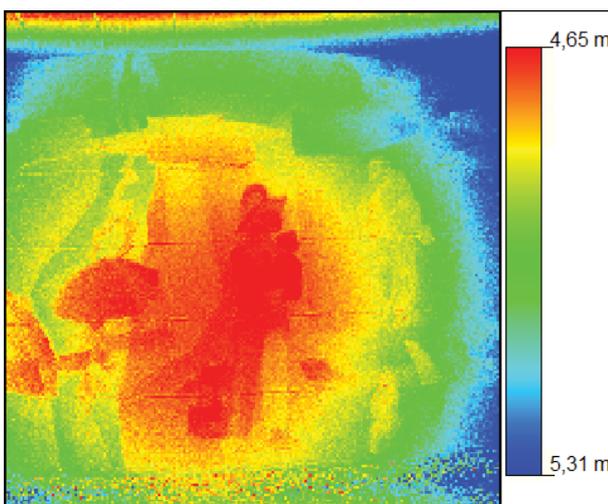


Fig. 2 - Arquivo de distâncias da imagem TOF.

Os arquivos da imagem TOF ilustrados com as Figuras 1 e 2 não foram corrigidos geometricamente. Distorções causadas pelo

sistema de lentes da câmara podem ser observadas nos extremos das imagens.

2.4 Escalas para representação de levantamentos fotogramétrico de patrimônio arquitetônico

A *American Society for Photogrammetry* (ASPRS) padroniza as escalas horizontais de mapas utilizando o *Root Mean Square error* (RMS) de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1: Escalas de mapas classe 1

Classe 1: Acurácia horizontal limitada pelo RMS (m)	Escala do mapa
0,0125	1:50
0,025	1:100
0,050	1:200
0,125	1:500
0,250	1:1.000
0,500	1:2.000
1,000	1:4.000
1,250	1:5.000
2,500	1:10.000
5,000	1:20.000

Fonte: ASPRS (1989).

Os padrões do Quadro 1 determinam a escala de representação de produtos fotogramétricos. Também servem de referência para os novos padrões da ASPRS para dados geoespaciais digitais.

As especificações internacionais para levantamentos fotogramétricos de patrimônio arquitetônico, *Advice and Suggestions for the furtherance of Optimum Practice in Architectural Photogrammetry Surveys*, foram elaboradas pelo *International Committee of Architectural Photogrammetry* (CIPA). Uma parceria da *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS); do *United Nation Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO); e do *International Council of Monuments and Sites* (ICOMOS). Nestas especificações são descritas as escalas para a representação gráfica das feições arquitetônicas de acordo com o erro máximo aceitável nas medidas realizadas, considerando para isso o erro de graficismo igual a 0,2 mm. No Quadro 2 estão descritas as referidas escalas (CIPA, 1981).

Quadro 2: Escalas de representação para levantamentos fotogramétricos do patrimônio arquitetônico

Erro máximo aceitável (cm)	Aplicação	Escala
0,5 – 1,0	Detalhes arquiteturais	1:10 ou 1:20
1,0 – 2,0	Documentação visando à conservação e restauração de fachadas arquitetônicas e monumentos	1:50
3,0 – 5,0	Estudos preliminares das estruturas das edificações e estudos que não requerem alto nível de detalhamento	1:100

Fonte: CIPA (1981).

No Brasil utilizam-se as especificações do Caderno Técnico 1 do Manual de Elaboração de Projetos de Preservação do Patrimônio Cultural (MEPPPC). Estas foram elaboradas para orientar a execução de projetos de restauro direcionados ao Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). Estabelece o uso da escala 1:50 para levantamentos de fachadas arquitetônicas, 1:10 para a aquisição de detalhes arquiteturais e eventualmente 1:100 para aplicações que não requerem alto nível de detalhamento (BRASIL, 2005).

3. MATERIAIS

Foram utilizadas 12 imagens TOF tomadas com a câmara PMD CamCube 3, cujas especificações técnicas estão no Quadro 3.

Uma nuvem de pontos foi utilizada como referência, proveniente de um levantamento topográfico realizado sem prisma refletor com a estação total robotizada Leica Viva TS15, cujas especificações técnicas estão no Quadro 4.

A câmara e a estação total pertencem, respectivamente, aos laboratórios de Sensoriamento Remoto e Topografia do departamento de Geomática da UFPR.

4. MÉTODOS

A metodologia proposta para o mapeamento de patrimônio histórico com imagens TOF consiste nas etapas de planejamento, levantamento, calibração, projeção ortogonal,

Quadro 3: Especificações técnicas da CamCube 3

PARÂMETRO	VALOR	OBSERVAÇÃO
Alcance	0,3 a 7 m	
Precisão na medida de distância (1σ)	< 3 mm	Área central, para superfícies a 4 m, com refletividade de 75 %
Tipo do sensor	PhotonICs®PMD 41k-S2	Com <i>Suppression of Background Illumination</i> (SBI)
Dimensões do sensor	200 x 200 pixels	
Tamanho do elemento sensor	45 μ m	
Frequência de aquisição	40 FPS 80 FPS	200 x 200 pixels 80 x 120 pixels
Campo de visão (FOV)	40° x 40°	
Distância focal	12,8 mm	
Iluminação LED	870 nm	Infravermelho próximo

Fonte: PMD (2010).

Quadro 4: Especificações técnicas da estação total TS15

PARÂMETRO	VALOR	OBSERVAÇÃO
Alcance de medição	1,5 a 1.000 metros	Sem prisma
Precisão angular	1"	
Precisão linear	2 mm + 2 ppm	Sem prisma
Dimensão do ponto laser (<i>footprint</i>) na superfície do objeto	7 x 10 mm	Para distâncias de até 30 m

Fonte: Leica (2010).

filtragem, alinhamento, registro geométrico, geração de ortoimagem e avaliação da qualidade. Estas etapas são ilustradas na Figura 3.

4.1 Planejamento

O painel “O Tempo e a Vida” está em uma parede com superfície plana e paralela à porta de entrada do SIMEPAR a uma distância aproximada de 10 m. Nas laterais do saguão encontram-se a

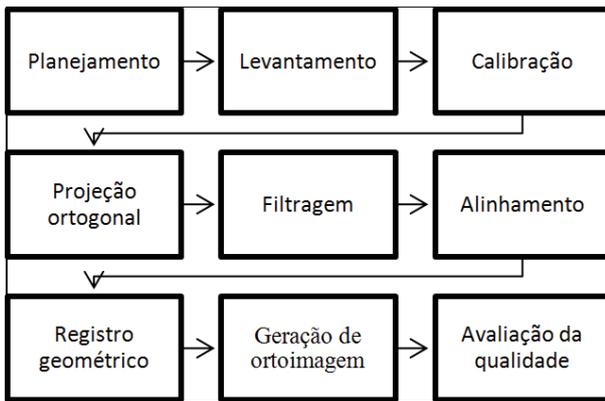


Fig. 3 - Etapas da metodologia.

recepção e no lado oposto uma mureta, ambas as feições estão à aproximadamente 5 m do painel, sendo esta a distância máxima considerada para instalar a câmara.

Estudo para definir o tempo de integração (TI) adequado para a tomada das imagens TOF foi realizado de forma similar ao trabalho de Centeno e Jutzi (2010).

Conforme recomendado por Piatti (2010) instalou-se a câmara CamCube 3 em um tripé deixando-a ligada durante 40 minutos para a estabilização do sistema de medição.

Imagens TOF foram tomadas de uma superfície plana para avaliar a diferença na medida de distância de acordo com o TI. As distâncias utilizadas foram de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 metros com TI variando de 250 a 14.000 μ s conforme Quadro 5.

Quadro 5: Tempos de Integração

TI (1.000 μ s)	0,25	0,5	1	2	3	4	5	6	...	13	14
--------------------------	------	-----	---	---	---	---	---	---	-----	----	----

Calculou-se a média, e o desvio padrão, das distâncias para cinco *pixels* na região central de um conjunto de 10 imagens TOF tomadas em cada disparo da câmara para a tomada automática do conjunto de imagens utilizando todos os TI do Quadro 3.

No estudo do TI não foi realizada a correção geométrica da imagem TOF. Por este motivo, escolheram-se cinco *pixels*, em uma diagonal a partir do centro da imagem TOF. Isto para que fosse possível calcular a média das distâncias registradas nestes *pixels*, tendo em vista que os pontos escolhidos deveriam

caracterizar uma região plana no centro da imagem. O incremento nas coordenadas de linha e coluna foi 10 *pixels*, partindo do *pixel* central da imagem com coordenadas 100 e 100.

Os conjuntos de imagens foram tomados distintamente em 12 disparos, durante o período de aproximadamente 2 minutos para cada posição da estação de tomada e TI. Ao total foram tomadas 11.520 imagens TOF para determinar o TI.

Considerando que foi gasto aproximadamente 2 minutos para tomar cada conjunto de imagem TOF com os diferentes TI, e que foram realizadas 10 tomadas para cada uma das 6 distâncias, levou-se aproximadamente 120 minutos para realizar este estudo.

O gráfico da Figura 4 ilustra o desvio padrão dos valores de distância do *pixel* central da imagem, com coordenada (100, 100).

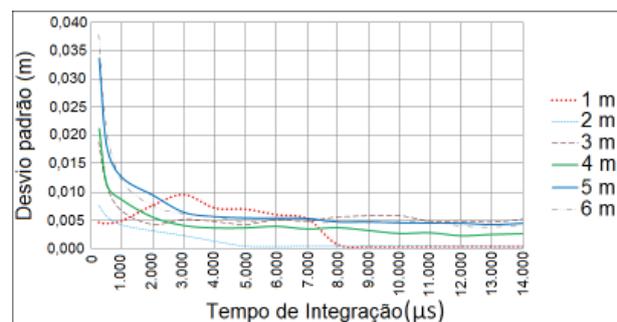


Fig. 4 - Desvio padrão em função do TI.

Para a tomada das imagens do painel, devido às suas dimensões e características do local de levantamento, a câmara deveria ser instalada à distância entre 4 e 5 m. Com o gráfico da Figura 4 observa-se que os desvios padrão para as imagens TOF tomadas à 4 m estabilizaram-se em 3 mm à partir do TI igual à 10.000 μ s. Esta é a precisão na medida de distâncias da câmara, coincide com a especificação técnica.

No gráfico da Figura 4 também é possível observar que para as imagens TOF tomadas a 5 m da superfície, os desvios padrão estabilizaram-se em torno de 5 mm à partir do TI de 8.000 μ s e mesmo com 14.000 μ s não houve diminuição neste valor. Para a distância de 2 m com TI superior a 5.000 μ s o desvio padrão ficou abaixo de 1 mm. Para a distância de 1 m os desvios ficaram abaixo de 1 mm com TI superior à 8.000 μ s.

Centeno e Jutzi (2010) verificaram que imagens TOF tomadas com a câmara CamCube 2

apresentam histograma com distribuição normal apenas para TI baixos. Quanto maior o TI, maior é a presença de ruídos na imagem e também de *pixels* saturados, conseqüentemente aumenta o erro nas medidas de distância.

A Figura 5 ilustra o erro na medida de distância com o aumento do TI para imagens TOF tomadas com distâncias de 1 a 6 m, considerando o *pixel* central da imagem. Calculou-se o erro entre as distâncias registradas e conhecidas, respectivamente obtidas com as imagens TOF e com a estação total.

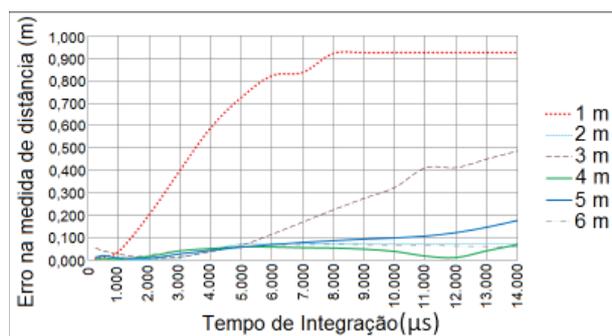


Fig.5 - Influência do TI na medida de distância.

Com a Figura 5 pode-se observar que para a estação de tomada a 1 m, a medida de distância foi severamente degradada para imagens com TI acima de 8.000 μs, sendo o erro superior a 0,9 m. Considerando as imagens TOF tomadas com distâncias de 4 e 5 m e TI igual à 10.000 μs, obtiveram-se respectivamente erros de 4 e 10 cm.

Devido ao exposto, adotou-se TI de 10.000 μs para a tomada das imagens TOF com a câmara instalada a distância de 4,65 m. Com isto, buscou-se a minimização da presença de ruído nos dados e que estes estivessem dentro da precisão nominal do equipamento. Nesta distância cada imagem recobre verticalmente o painel, necessitando apenas de sobreposição lateral para realizar o mapeamento.

4.2 Levantamento

Foram tomadas 12 imagens TOF com a câmara instalada sobre um tripé a distância de 4,65 m do painel. Realizaram-se translações de 0,57 m ao longo do eixo X para as mudanças das estações (E) de levantamento. Procurou-se não realizar rotações em torno dos eixos do sistema referencial da câmara. Com estas translações, a sobreposição entre as imagens tomadas a partir de estações consecutivas foi aproximadamente

de 84 %. A Figura 6 ilustra as dimensões envolvidas no levantamento e a sobreposição das áreas recobertas pelas imagens TOF tomadas nas estações E7 e E8.

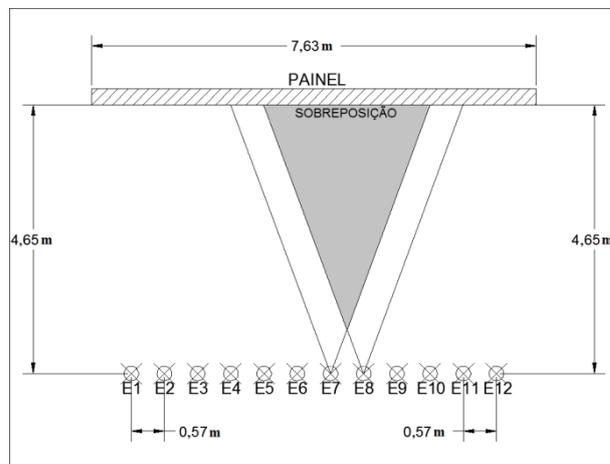


Fig. 6 - Dimensões envolvidas no levantamento.

A partir da distância focal nominal e da distância entre o painel e a câmara, calculou-se a escala (E_{im}) aproximada das imagens TOF com a Equação (6).

$$E_{im} = \frac{d}{D} = \frac{f}{Z} = \frac{0,0128m}{4,65m} = \frac{1}{363,28125} \cong \frac{1}{365} \quad (6)$$

A escala calculada para as imagens foi arredondada para 1:365. A partir da escala e com a dimensão de um elemento no sensor da câmara, calculou-se o espaçamento esperado de pontos para as nuvens geradas. Conforme a Equação (7), o valor encontrado foi de aproximadamente um ponto a cada 1,6 cm.

$$Esp_{pontos} = 365 * 45 \mu m \cong 1,6 \text{ cm} \quad (7)$$

O levantamento topográfico foi realizado com a estação total TS15 centralizada em relação ao painel à distância de 3,53 m. Gerou uma nuvem com 11.146 pontos, com espaçamento de 1 ponto a cada 5 cm. Esta foi utilizada como referência para a comparação com a nuvem de pontos gerada a partir das imagens TOF.

4.3 Calibração

Com a calibração da câmara são determinados os Parâmetros de Orientação Interior (POI): distâncias focais calibradas (F_{xc} , F_{yc}); coordenadas do ponto principal (X_0 , Y_0);

parâmetros de distorção radial simétrica (k_1, k_2, k_3); distorção descentrada (P_1, P_2); e de não afinidade entre os elementos do sensor (A, B).

POI possibilitam a reconstrução do feixe perspectivo que gerou a imagem para o instante em que foi tomada, permitindo a correção de sua geometria. Diferentes métodos de calibração foram desenvolvidos, dentre eles o método fotogramétrico desenvolvido por Brown (1971) é o tradicionalmente utilizado (ANDRADE, 1998).

Um método de calibração de câmaras utilizado em visão computacional é o descrito em Zhang (2000). Neste método não é necessário o levantamento das coordenadas tridimensionais de pontos no espaço objeto, bastando tomar fotografias com diferentes orientações de um gabarito impresso e fixado em uma superfície plana, conhecendo-se apenas as dimensões dos lados dos quadrados contidos no gabarito.

4.4 Projeção ortogonal

A projeção ortogonal é realizada para transformar o arquivo com as distâncias dos *pixels* da imagem TOF em uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais referenciadas a um sistema ortogonal. Para isto, utiliza-se a condição de colinearidade entre o ponto no espaço objeto, o centro perspectivo (CP) do sistema de lentes da câmara e o respectivo ponto no espaço imagem. A Figura 7 ilustra a projeção ortogonal dos pontos através do modelo geométrico das câmaras *pinhole*.

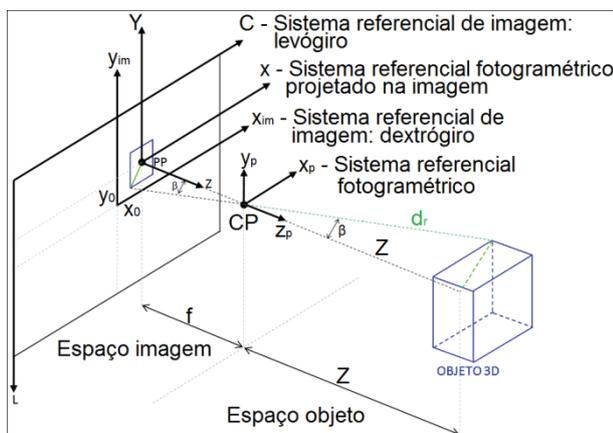


Fig. 7 - Modelo para projeção ortogonal dos pontos. Fonte: Adaptado de RAPP (2007).

A distância ortogonal (Z) do CP ao ponto no espaço objeto é calculada através da Equação

(8), função da distância radial (d_r) do CP ao ponto no sistema de coordenadas da câmara, distância focal calibrada ao longo dos eixos (F_{xc}, F_{yc}) e das coordenadas (x, y) dos pontos no sistema referencial fotogramétrico projetado na imagem.

$$Z = d_r \cdot \cos \left(\arctan \left(\sqrt{\frac{x^2}{f_{xc}^2} + \frac{y^2}{f_{yc}^2}} \right) \right) \quad (8)$$

As coordenadas horizontais (X, Y) dos pontos no sistema referencial ortogonal são calculadas através das Equações (9) e (10).

$$X = x \cdot \frac{Z}{f_{xc}} \quad (9)$$

$$Y = y \cdot \frac{Z}{f_{yc}} \quad (10)$$

4.5 Filtragem

A detecção e remoção de *outliers* em nuvens de pontos é uma etapa essencial antes da modelagem tridimensional. Pode ser realizada através de uma filtragem estatística com objetivo de remover pontos isolados provenientes de ruídos além dos pontos flutuantes (SOTOODEH, 2006).

Nas imagens TOF ruídos são causados por diversas fontes, dentre elas citam-se a iluminação exterior ao sistema, as características de refletividade da superfície imageada e o TI na tomada das imagens. Ruídos geram *pixels* isolados quando são projetados ortogonalmente para a geração da nuvem de pontos.

Pontos flutuantes são provenientes de medidas de distâncias com erro nas bordas das superfícies imageadas. Ocorrem quando parte do sinal emitido é refletido pela superfície do objeto e o restante é refletido por uma superfície ao fundo. Neste caso, o sistema TOF calcula a distância média dos dois retornos do sinal e a registra no valor digital do *pixel*.

O filtro *Statistical Outlier Removal* (SOR) da *Point Cloud Library* (PCL) identifica *outliers* estatisticamente. Para isto, define-se a quantidade de pontos vizinhos ao ponto em questão e assumindo uma distribuição gaussiana dos dados, calcula-se a distância média e o desvio padrão entre o ponto e sua vizinhança. Se o valor calculado para o desvio padrão for maior que o

limiar definido, o ponto em questão é um *outlier* e é eliminado. Caso contrário, é considerado um *inlier* e continua na amostra (RUSU, 2009).

4.6 Alinhamento

As nuvens de pontos geradas com a projeção ortogonal apresentam inclinações em relação aos eixos do sistema referencial de coordenadas tridimensionais adotado, ilustrado com a Figura 8. Estas inclinações correspondem às posições da câmara em relação às superfícies do painel no momento de tomada das imagens TOF.

Com o objetivo de minimizar estas inclinações, realizaram-se rotações nas nuvens de pontos utilizando-se os três autovetores calculados para cada nuvem de pontos. Isto é possível, pois as direções dos eixos XYZ, do sistema de coordenadas adotado para referenciar os pontos, são equivalentes às direções dos autovetores 1, 2 e 3, respectivamente. O tamanho relativo e direção dos autovetores indicam propriedades locais das superfícies representadas pelos pontos (PAULY *et al.*, 2002).

De acordo com Johnson e Wichern (1998) o cálculo de autovalores ($\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$) e autovetores ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) é realizado a partir da Matriz de Variâncias e Covariâncias (MVC). Esta é obtida a partir das coordenadas dos pontos (k) da amostra conforme a Equação (11). É função do vetor (\vec{r}_i) com as coordenadas de cada ponto na amostra, vetor (\vec{r}) com as coordenadas do centroide da superfície, variâncias ($\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$) e covariâncias ($\sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$).

$$MVC_{3 \times 3} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [\vec{r}_i - \vec{r}] \cdot [\vec{r}_i - \vec{r}]^T$$

$$MVC = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 \end{bmatrix}$$

(11)

O vetor (\vec{r}_i) com as coordenadas dos pontos (i) da amostra é denotado com a Equação (12). A posição do centroide é calculada através da Equação (13).

$$\vec{r}_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T$$

(12)

$$\vec{r} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \vec{r}_i$$

(13)

A partir da Equação (14) a pode ser decomposta em autovalores e autovetores (JOHNSON & WICHERN, 1998).

$$MVC = P \cdot \Lambda \cdot P^T$$

$$MVC = [\vec{e}_1 \quad \vec{e}_2 \quad \vec{e}_3] \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{e}_1^T \\ \vec{e}_2^T \\ \vec{e}_3^T \end{bmatrix}$$

(14)

Na Equação (14) é a matriz ortogonal com os autovetores e corresponde à matriz diagonal formada pelos autovalores.

A é simétrica, os autovalores são números reais e os autovetores formam uma base ortogonal e correspondem aos componentes principais do conjunto de dados (BELTON, 2008).

No presente estudo, a rotação das nuvens de pontos geradas foi realizada multiplicando-se as coordenadas dos pontos pelos três autovetores calculados para cada uma delas.

Posteriormente realizou-se a translação das coordenadas das nuvens de pontos. Para isto, fixou-se como referência a nuvem de pontos gerada com a imagem TOF tomada na estação E1. A translação das outras nuvens ocorreu ao longo do eixo X, com os valores conhecidos entre os deslocamentos das estações de tomada, conforme a Figura 6.

Com isto, colocaram-se as coordenadas dos pontos no sistema referencial de coordenadas adotado, com origem no canto inferior esquerdo do painel, considerando quem o observa de frente, eixo X orientado positivamente para a direita na direção horizontal, eixo Y orientado positivamente para cima na direção vertical, eixo Z orientado positivamente saindo da superfície do painel, formando o sistema dextrógiro ilustrado com a Figura 8.

O perfil no plano YZ da nuvem de pontos E1 antes do alinhamento pode ser visualizado na Figura 9.

A Figura 10 ilustra a nuvem de pontos após o alinhamento. Foi rotacionada e teve sua origem transladada para o sistema referencial de coordenadas locais adotado. Também é possível visualizar que foi minimizada a inclinação em relação ao plano YZ.

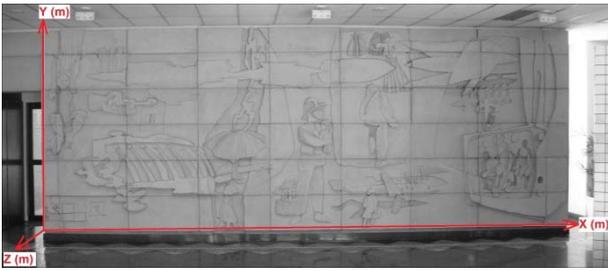


Fig. 8 - Sistema referencial de coordenadas adotado.

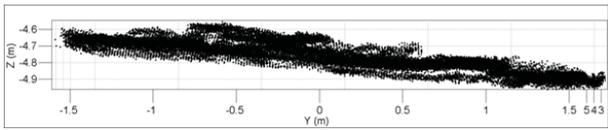


Fig. 9 - Perfil YZ da nuvem de pontos inicial.

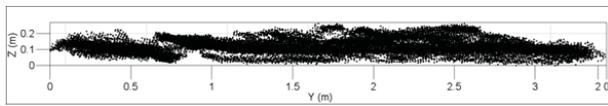


Fig. 10 - Perfil YZ da nuvem de pontos alinhada.

4.7 Registro geométrico

No registro são obtidos parâmetros de rotação e translação (PRT) entre as nuvens de pontos levantadas a partir de diferentes estações, possibilitando que ambas sejam colocadas no mesmo sistema referencial de coordenadas. O registro é uma importante etapa no processo de reconstrução e pode ser realizado através de diferentes métodos que necessitam, ou não, de alinhamento prévio da nuvem de pontos a ser registrada (SALVI *et al.*, 2007).

Mesmo nos métodos que não se utiliza o alinhamento prévio, normalmente pelo menos um alinhamento inicial é realizado. Nos métodos que utilizam o alinhamento prévio iterativamente procuram-se os PRT para a melhor transformação.

De acordo com Salvi *et al.* (2007) os métodos de registro são definidos por grosseiro e fino. Em ambos é necessária a sobreposição entre os pares de nuvens de pontos. Nos métodos de registro grosseiro utilizam-se correspondências geométricas entre as superfícies dos objetos para encontrar a transformação entre as coordenadas dos pontos. Nos métodos de registro fino são realizadas iterativamente transformações entre as coordenadas dos pontos da nuvem a ser registrada, a convergência do processo ocorre

através de um limiar definido através do erro médio na distância entre os pontos das nuvens. Um algoritmo de registro fino bastante difundido no meio científico é o Iterative Closest Point (ICP).

O algoritmo ICP foi proposto por Besl e Mckay (1992) com objetivo de ser independente, computacionalmente eficiente e que possibilitasse um registro refinado de superfícies 3D, sem a necessidade de realizar o pré-processamento dos dados. No entanto, antes de sua aplicação é necessária uma filtragem para a remoção de *outliers*. O ICP pode ser aplicado em nuvens de pontos, segmentos de reta, malhas triangulares, curvas e superfícies paramétricas.

O ICP necessita de alta sobreposição das nuvens de pontos, acima de 50 %, pois para cada ponto de uma nuvem a ser registrada, procura-se o ponto na nuvem de referência de forma que as distâncias entre as correspondências geométricas destes pontos sejam minimizadas. Encontradas as correspondências, os PRT são calculados. Realizada a transformação dos pontos da nuvem a ser registrada com os PRT calculados, inicia-se novamente o processo de busca por correspondências visando à minimização da distância entre as nuvens de pontos e novos PRT são determinados. Este processo iterativo é encerrado quando o valor desta distância é menor que o limiar definido (BESL & MCKAY, 1992).

4.8 Ortoimagem

As ortoimagens foram geradas a partir da nuvem de pontos registrada com resolução espacial de 0,8 cm. Este valor corresponde à metade do espaçamento de 1,6 cm entre os pontos de cada uma das nuvens geradas com as imagens TOF. As nuvens de pontos finais apresentam sobreposições de 52 e 84 % dos pares de nuvens que as geraram. Estas sobreposições foram utilizadas nos experimento 1 e 2, respectivamente. Com isto, mesmo com 52 % de sobreposição, têm-se pontos de duas ou mais nuvens e por este motivo foi utilizado a metade do valor do espaçamento entre os pontos para definir a resolução espacial da imagem. A ortoimagem foi reamostrada utilizando o método do vizinho mais próximo.

Os valores das coordenadas Z dos pontos foram utilizados para a geração dos níveis digitais dos *pixels* da imagem. Para isto, os

valores de 0 a 27,9 cm foram escalonados na faixa de 0 a 255 níveis digitais.

4.9 Avaliação da qualidade geométrica

A avaliação da qualidade geométrica das nuvens de pontos geradas foi realizada através de três comparações.

Primeiramente avaliou-se a acurácia vertical através da comparação das coordenadas Z dos pontos das nuvens gerada e de referência. Realizou-se o registro refinado de ambas utilizando a algoritmo ICP com sobreposição de 100%. A comparação foi realizada utilizando uma função de modelagem local com ajustamento de superfícies por mínimos quadrados, no *software* CloudCompare, com vizinhança de 6 pontos na nuvem de referência.

Posteriormente, avaliou-se a acurácia horizontal (XY) através da comparação entre as medidas calculadas nas imagens ortorretificadas e as medidas de referência ilustradas com a Figura 11 e Tabela 1.

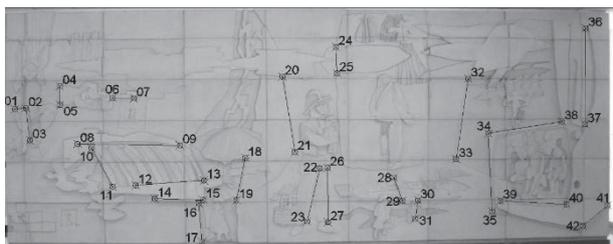


Fig. 11 - Medidas de referência.

Com a Equação (15) calculou-se o RMS entre as medidas (n), através do somatório (D) dos erros (discrepâncias), elevados ao quadrado (ASPRS, 1989).

$$RMS = \sqrt{\frac{D^2}{n}} \quad (15)$$

Por fim, avaliou-se a acurácia final do mapeamento através do RMS calculado na comparação entre as medidas de referência e realizadas com o arquivo vetorial 3D da nuvem de pontos gerada.

5. RESULTADOS

Dois experimentos foram realizados com o objetivo de avaliar a qualidade geométrica das nuvens de pontos registradas através da metodologia proposta.

Tabela 1: Medidas de referência

Pontos		Medidas Referência (m)
Início	Fim	
1	2	0,141
2	3	0,392
4	5	0,260
6	7	0,251
8	9	1,254
10	11	0,571
12	13	0,820
14	15	0,519
16	17	0,501
18	19	0,508
20	21	0,943
22	23	0,631
24	25	0,359
26	27	0,678
28	29	0,331
30	31	0,232
32	33	1,056
34	35	1,003
36	37	1,220
38	34	1,011
39	40	0,982
41	42	0,410

Foram utilizadas sobreposições de 52 e 84 %, respectivamente para o registro fino das nuvens de pontos adjacentes no primeiro e segundo experimentos.

5.1 Calibração

Na calibração foram utilizados os arquivos de intensidades das imagens TOF e o Toolbox Calib do *software* Matlab, com o algoritmo de Zhang (2000).

O gabarito utilizado foi impresso com 8 x 9 quadrados com lado de 8 cm. Foram tomadas 12 imagens que convergiam para o centro do gabarito à distância de 1,9 m, a partir de 3 estações de observação, rotacionando a câmara em seu eixo de colimação 4 vezes, com incrementos de 90°. As imagens foram tomadas desta forma para que houvessem maior sobreposição dos pontos do gabarito sobre a área do sensor. As imagens são ilustradas com a Figura 12.

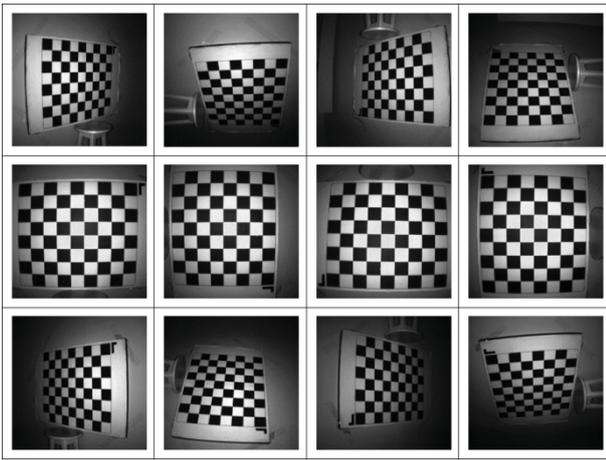


Fig. 12 - Imagens utilizadas na calibração.

No Quadro 6 são apresentados os valores dos POI calculados e os erros em *pixel* (E_x , E_y).

Quadro 6: POI determinados

POI	VALOR		VARIÂNCIA (3σ)	
	(<i>pixels</i>)	(mm)	(<i>pixels</i>)	(mm)
f_{xc}	284,15265	12,78687	6,41113	0,01298
f_{yc}	284,11353	12,78511	6,45033	0,01306
x_{0c}	101,80689	4,58131	11,92031	0,01302
y_{0c}	103,80281	4,67113	11,78460	0,02414
k_1	-0,41603	-0,01872	0,00261	0,00001
k_2	0,19659	0,00885	0,00151	0,00000
E_x	0,18579	0,00836		
E_y	0,15459	0,00696		

A partir das distâncias focais calibradas foram calculados os fatores de escala dos *pixels* (S_x , S_y), conforme as Equações (16) e (17).

$$s_x = \frac{f}{f_{xc}} = \frac{12,8 \text{ mm}}{12,78687 \text{ mm}} = 1,001027 \quad (16)$$

$$s_y = \frac{f}{f_{yc}} = \frac{12,8 \text{ mm}}{12,78511 \text{ mm}} = 1,001165 \quad (17)$$

Com os fatores de escala e a dimensão do *pixel* (P) no sensor, foi calculado o tamanho efetivo dos *pixels* (P_x , P_y) através das Equações (18) e (19).

$$P_x = P \cdot s_x = 45 \mu\text{m} \cdot 1,001027 \cong 45 \mu\text{m} \quad (18)$$

$$P_y = P \cdot s_y = 45 \mu\text{m} \cdot 1,001165 \cong 45 \mu\text{m} \quad (19)$$

Os valores obtidos com as Equações (18) e (19) indicam que os elementos do sensor podem ser considerados quadrados.

5.2 Filtragem

Foi realizada com o filtro SOR da PCL através de um *plugin* no software CloudCompare.

Adotou-se como limiar o desvio padrão de 1 cm. A Figura 13 ilustra um recorte da nuvem de pontos gerada a partir da imagem TOF tomada na estação E6 antes da filtragem.

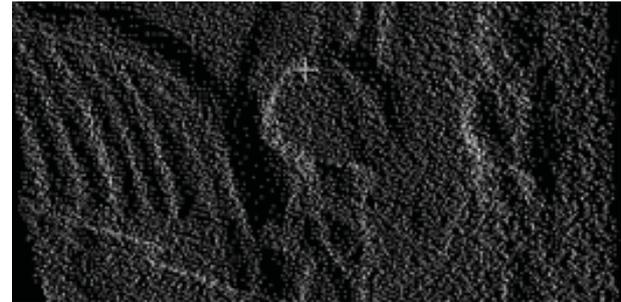


Fig. 13 - Recorte da nuvem de pontos.

Realizando-se a filtragem com vizinhança de 10 pontos foi possível remover *outliers* da nuvem de pontos, principalmente os pontos flutuantes que estavam em áreas de oclusão, conforme ilustra a Figura 14.

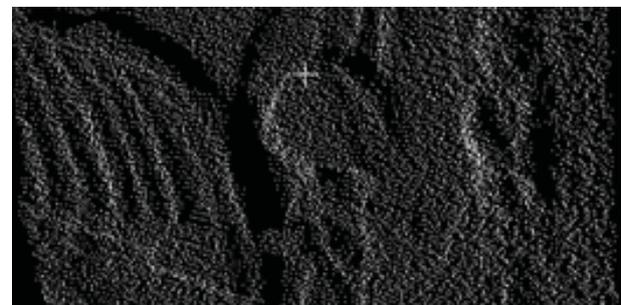


Fig. 14 - Recorte da nuvem de pontos após a filtragem.

A quantidade de pontos não foi severamente diminuída após a filtragem, em média 91% dos pontos contidos nas nuvens foram mantidos. Exceção ocorreu nas nuvens E1, E2, E3, E11 e E12 que tinham pontos medidos em superfícies ao fundo do painel. Estes foram removidos através de uma pré-filtragem utilizando vizinhança de 150 pontos, além do recorte dos pontos fora da área de interesse. A Tabela 2 ilustra a quantidade de pontos antes e após a filtragem.

Tabela 2: Quantitativo de pontos

Nuvem de Pontos	Quantidade inicial de pontos	Quantidade final de pontos	Porcentagem final de pontos
1	40.401	20.677	51 %
2	40.401	25.528	63 %
3	40.401	34.945	86 %
4	40.401	36.579	91 %
5	40.401	36.982	92 %
6	40.401	36.886	91 %
7	40.401	36.660	91 %
8	40.401	36.659	91 %
9	40.401	36.714	91 %
10	40.401	36.690	91 %
11	40.401	29.165	72 %
12	40.401	23.598	58 %

5.3 Experimento 1: Registro 1

Neste experimento foram utilizadas cinco nuvens de pontos, geradas com as imagens TOF tomadas a partir das estações E1, E4, E7, E10 e E12. Isto para que houvesse sobreposição de aproximadamente 52 % entre as nuvens de pontos adjacentes no momento do registro geométrico.

A Tabela 3 apresenta as classes (C) de erro vertical (Z) da nuvem de pontos 1. Este resultado foi obtido utilizando a função de modelagem local de superfícies por mínimos quadrados. O método foi utilizado por minimizar os resíduos e possibilitar a modelagem da superfície a partir da nuvem de pontos que se pretendia comparar com a referência. As duas últimas colunas correspondem às diferenças de coordenadas Z entre a nuvem de pontos gerada e a de referência, são os limites superior e inferior das classes.

Através da Tabela 3 observa-se que dos 81.492 pontos da nuvem 1 gerada, 44.710 pontos (54,86 %) apresentaram diferença de até 1,5 cm, 24.924 pontos (30,58 %) apresentaram diferença de até 3,0 cm, 8.628 pontos (10,59 %) apresentaram diferença de até 4,5 cm.

Aproximadamente 85 % dos pontos apresentaram diferença de até 3,0 cm, e 96 % dos pontos apresentaram diferença de até 4,5 cm, quando comparados com a nuvem de pontos de referência.

Para avaliar a acurácia horizontal (XY) gerou-se a ortoimagem 1, ilustrada com a Figura

Tabela 3: Acurácia vertical da nuvem de pontos 1

C	Frequência Relativa		Frequência Acumulada		Dif. em Z > (cm)	Dif. em Z <= (cm)
	(%)	Nº de Pontos	(%)	Nº de Pontos		
1	54,86	44.710	54,86	44.710	0,0	1,5
2	30,58	24.924	85,45	69.633	1,5	3,0
3	10,59	8.628	96,04	78.262	3,0	4,5
4	2,94	2.394	98,97	80.656	4,5	6,1
5	0,79	640	99,76	81.296	6,1	7,6
6	0,18	145	99,94	81.441	7,6	9,1
7	0,05	37	99,98	81.478	9,1	10,6
8	0,02	14	100	81.492	10,6	

15. Nesta imagem realizaram-se medidas para serem comparadas com as medidas de referência.



Fig. 15 - Ortoimagem 1.

Na Tabela 4 estão os valores das medidas de referência e calculadas com a ortoimagem 1. Além dos módulos dos erros cometidos e o RMS correspondente.

O RMS de 1,5 cm contido na Tabela 3 corresponde à acurácia horizontal das medidas realizadas sobre a ortoimagem 1.

A avaliação da acurácia final foi realizada através da comparação entre as medidas de referência e calculadas através das coordenadas tridimensionais dos pontos da nuvem 1 gerada, ilustrada com a Figura 16. As coordenadas tridimensionais dos pontos foram lidas nas posições dos vértices das medidas de referência.



Fig. 16 - Nuvem de pontos 1.

Tabela 4: Acurácia horizontal da ortomagem

Pontos		Medidas		Módulos dos erros cometidos (m)
Início	Fim	Referência (m)	Calculada (m)	
1	2	0,141	0,151	0,010
2	3	0,392	0,407	0,015
4	5	0,260	0,245	0,015
6	7	0,251	0,264	0,013
8	9	1,254	1,238	0,016
10	11	0,571	0,586	0,015
12	13	0,820	0,834	0,014
14	15	0,519	0,535	0,016
16	17	0,501	0,515	0,014
18	19	0,508	0,527	0,019
20	21	0,943	0,961	0,018
22	23	0,631	0,649	0,018
24	25	0,359	0,370	0,011
26	27	0,678	0,693	0,015
28	29	0,331	0,346	0,015
30	31	0,232	0,248	0,016
32	33	1,056	1,069	0,013
34	35	1,003	1,019	0,016
36	37	1,220	1,237	0,017
38	34	1,011	1,025	0,014
39	40	0,982	0,966	0,016
41	42	0,410	0,422	0,012
RMS (m)				0,015

Tabela 5: Acurácia final da nuvem de pontos 1

Pontos		Distâncias		Módulos dos erros cometidos (m)
Início	Final	Referências (m)	Calculadas (m)	
1	2	0,141	0,136	0,005
2	3	0,392	0,404	0,012
4	5	0,260	0,243	0,017
6	7	0,251	0,233	0,018
8	9	1,254	1,268	0,014
10	11	0,571	0,588	0,017
12	13	0,820	0,805	0,015
14	15	0,519	0,537	0,018
16	17	0,501	0,511	0,010
18	19	0,508	0,524	0,016
20	21	0,943	0,927	0,016
22	23	0,631	0,644	0,013
24	25	0,359	0,339	0,020
26	27	0,678	0,663	0,015
28	29	0,331	0,313	0,018
30	31	0,232	0,248	0,016
32	33	1,056	1,042	0,014
34	35	1,003	1,017	0,014
36	37	1,220	1,239	0,019
38	34	1,011	0,992	0,019
39	40	0,982	0,990	0,008
41	42	0,410	0,394	0,016
RMS (m)				0,015

Na Tabela 5 estão os valores das medidas de referência e calculadas com a nuvem de pontos 1. Além dos módulos dos erros cometidos e o RMS correspondente.

O RMS de 1,5 cm apresentado na Tabela 5 corresponde à acurácia final atingida com as medidas realizadas sobre a nuvem pontos 1.

Com a Figura 17 é ilustrada a superfície gerada através da triangulação de Delaunay 2,5 D para a nuvem de pontos 1.



Fig. 17 - Superfície 2,5 D da nuvem de pontos 1.

5.4 Experimento 2: Registro 2

Neste experimento foram utilizadas as imagens tomadas a partir das 12 estações. Com isto, o registro refinado foi realizado utilizando o algoritmo ICP com sobreposição de 84 % entre as nuvens de pontos adjacentes.

A Tabela 6 apresenta as classes de acurácia vertical (Z) da nuvem de pontos 2. Este resultado foi obtido utilizando a função de modelagem local de superfícies por mínimos quadrados. As últimas duas colunas correspondem às diferenças de coordenadas Z entre a nuvem de pontos gerada e a referência.

Com a Tabela 6 observa-se que dos 214.223 pontos da nuvem 2 gerada, 122.673 pontos (57,26 %) apresentaram diferença de até 1,4 cm, 63.607 pontos (29,69 %) apresentaram diferença de até 2,8 cm e 20.467 pontos (9,55 %) apresentaram diferença de até 4,2 cm.

Tabela 6: Acurácia vertical da nuvem de pontos 2

C	Frequência Relativa		Frequência Acumulada		Dif. em Z (cm) >	Dif. em Z (cm) <=
	(%)	Nº de Pontos	(%)	Nº de Pontos		
1	57,26	122.673	57,26	122.673	0,0	1,4
2	29,69	63.607	86,96	186.280	1,4	2,8
3	9,55	20.467	96,51	206.747	2,8	4,2
4	2,58	5.527	99,09	212.274	4,2	5,6
5	0,71	1.525	99,80	213.799	5,6	6,9
6	0,17	362	99,97	214.161	6,9	8,3
7	0,02	49	99,99	214.210	8,3	9,7
8	0,01	13	100	214.223	9,7	

Aproximadamente 87 % dos pontos apresentaram diferença de até 2,8 cm, 97 % dos pontos apresentaram diferença de até 4,2 cm, quando comparados com a nuvem de pontos de referência.

Para avaliar a acurácia horizontal (XY) gerou-se a ortoimagem 2, ilustrada com a Figura 18. Nesta imagem realizaram-se medidas para serem comparadas com as medidas de referência.



Fig. 18 - Ortoimagem 2.

Na Tabela 7 estão os valores das medidas de referência e calculadas com a ortoimagem 2. Além dos módulos dos erros cometidos e o RMS correspondente.

O RMS de 1,2 cm contido na Tabela 7 corresponde à acurácia horizontal das medidas realizadas sobre a ortoimagem 2.

A avaliação da acurácia final foi realizada através da comparação entre as medidas de referência e calculadas através das coordenadas tridimensionais dos pontos da nuvem 2 gerada. Esta é ilustrada com a Figura 19.

Na Tabela 8 estão os valores das medidas de referência e calculadas com a nuvem de pontos 2. Além dos módulos dos erros cometidos e o RMS correspondente.

Tabela 7: Acurácia horizontal da ortoimagem 2

Pontos		Medidas		Módulos dos erros cometidos (m)
Início	Fim	Referência (m)	Calculada (m)	
1	2	0,141	0,149	0,008
2	3	0,392	0,401	0,009
4	5	0,260	0,270	0,010
6	7	0,251	0,242	0,009
8	9	1,254	1,266	0,012
10	11	0,571	0,581	0,001
12	13	0,820	0,811	0,009
14	15	0,519	0,531	0,012
16	17	0,501	0,514	0,013
18	19	0,508	0,523	0,015
20	21	0,943	0,958	0,015
22	23	0,631	0,644	0,013
24	25	0,359	0,371	0,012
26	27	0,678	0,694	0,016
28	29	0,331	0,341	0,010
30	31	0,232	0,242	0,010
32	33	1,056	1,071	0,015
34	35	1,003	1,022	0,019
36	37	1,220	1,211	0,009
38	34	1,011	1,023	0,012
39	40	0,982	0,991	0,009
41	42	0,41	0,421	0,011
RMS (m)				0,012

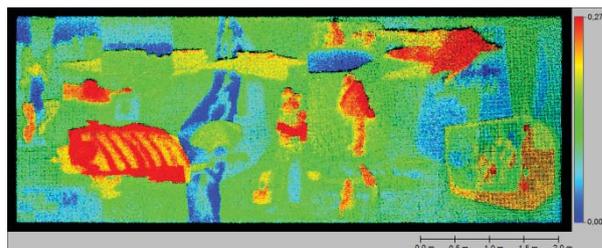


Fig. 19 - Nuvem de pontos 2.

O RMS de 1,0 cm apresentado na Tabela 8 corresponde à acurácia final atingida com as medidas realizadas sobre a nuvem de pontos 2, gerada no registro geométrico com sobreposição de 84 % entre as nuvens de pontos adjacentes.

Com a Figura 20 é ilustrada a superfície gerada com uma triangulação de Delaunay 2,5 D para a nuvem de pontos 2.

Tabela 8: Acurácia final da nuvem de pontos 2

Pontos		Distâncias		Módulos dos erros cometidos (m)
Início	Fim	Referências (m)	Calculadas (m)	
1	2	0,141	0,140	0,001
2	3	0,392	0,397	0,005
4	5	0,260	0,267	0,007
6	7	0,251	0,242	0,009
8	9	1,254	1,271	0,017
10	11	0,571	0,563	0,008
12	13	0,820	0,830	0,010
14	15	0,519	0,511	0,008
16	17	0,501	0,486	0,015
18	19	0,508	0,498	0,010
20	21	0,943	0,961	0,018
22	23	0,631	0,641	0,010
24	25	0,359	0,350	0,009
26	27	0,678	0,684	0,006
28	29	0,331	0,326	0,005
30	31	0,232	0,237	0,005
32	33	1,056	1,068	0,012
34	35	1,003	0,994	0,009
36	37	1,220	1,207	0,013
38	34	1,011	0,993	0,018
39	40	0,982	0,995	0,013
41	42	0,410	0,423	0,013
RMS (m)				0,010

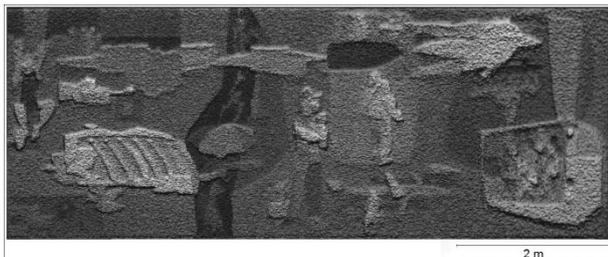


Fig. 20 - Nuvem de pontos 2.

6. CONCLUSÕES

Neste estudo foram determinadas as profundidades das superfícies que formam as feições do painel “O Tempo e a Vida”. Para isto, adotou-se um sistema referencial de coordenadas arbitrário.

Com a análise do TI na tomada das imagens TOF foi possível verificar a precisão nominal de 3 mm para a medida de distâncias de até 6 metros, conforme as especificações

técnicas da câmara CamCube 3. Porém, se o objeto se encontra muito afastado e aumenta-se demasiadamente o TI, a medida relativa de distância entre a câmara e a superfície do objeto é prejudicada devido ao aumento da presença de ruído.

Observou-se que a sobreposição das nuvens de pontos adjacentes utilizadas para a realização do registro influenciou na acurácia vertical. Na avaliação realizada no experimento 1, com sobreposição de 52%, foram obtidos resultados piores do que no experimento 2, realizado com sobreposição de 84 %.

A acurácia vertical de 2,8 cm pode ser esperada com a metodologia proposta neste estudo, conforme demonstrado na Tabela 6 do experimento 2 e com nível de confiança de 87 %. O valor de 2,8 cm corresponde a um erro de 0,6 % da distância de 4,65 m entre a câmara e a superfície do painel. Resultados melhores podem ser obtidos se o registro das nuvens de pontos for realizado com sobreposição superior a 84 % entre as nuvens de pontos adjacentes.

A iluminação exterior ao sistema aumentou o erro no posicionamento vertical das nuvens de pontos geradas devido à presença de ruídos nas imagens TOF. Esta iluminação não pode ser evitada devido às características do saguão, com porta e janelas de vidro.

Na avaliação da acurácia horizontal obtiveram-se valores de RMS de 1,5 e 1,2 cm para as medidas realizadas sobre as ortomagens 1 e 2, respectivamente.

Considerando a acurácia horizontal de mapas classe 1 da ASPRS (1989), conforme o Quadro 4, as ortomagens 1 e 2 permitiriam a realização de mapeamentos nas escalas 1:100 e 1:50 respectivamente.

Foi atingida a acurácia final de 1,5 e 1,0 cm para as medidas realizadas diretamente sobre os arquivos vetoriais das nuvens de pontos 1 e 2, geradas com sobreposição de 52 e 84 % respectivamente.

Considerando as especificações do comitê internacional CIPA (1981) descritas no Quadro 2, a acurácia horizontal atingida com as nuvens de pontos geradas proporciona mapeamentos na escala 1:50. Podem ser aplicadas na documentação visando à conservação e restauração de fachadas arquitetônicas e monumentos.

Através das análises das acurácias, conclui-se que as imagens TOF podem ser utilizadas para a geração de nuvens de pontos visando à documentação de patrimônio histórico e artístico em ambientes internos, considerando distâncias de até 7 metros e com erro horizontal esperado de 1,5 cm e vertical de 2,8 cm. Melhores resultados podem ser obtidos se houverem maiores cuidados na escolha do TI e se as imagens forem tomadas de forma a proporcionar maior sobreposição entre as nuvens de pontos adjacentes, conforme o registro geométrico realizado no Experimento 2.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná (PPGCG/UFPR), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), respectivamente pela infra-estrutura disponibilizada, fomento do estudo e financiamento do projeto para a aquisição da câmara CamCube 3.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. 2. ed. Curitiba: SBEE, 1998. 274p.

ASPRS, The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - 1988. **ASPRS Interim Accuracy Standards For Large-Scale Maps**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1989. 3p.

BELTON, D. Improving and Extending the Information on Principal Component Analysis for Local Neighborhoods in 3D Points Clouds. **The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Vol. XXXVII, B5. Beijing, 2008. 8p.

BECKER, J. H. **Registro de Nuvens de Pontos Provenientes de Câmera de Distância**. 76p. Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba: UFPR, 2014.

BESL, Paul J.; MCKAY, Neil D. A Method for Registration of 3-D Shapes. 18p. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine**

Intelligence. Vol. 14, n. 2, 1992, p. 239-256.

BRASIL. Ministério da Cultura. Instituto do Programa Monumenta. Manual de elaboração de projetos de preservação do patrimônio cultural. **Cadernos técnicos 1**. Elaboração José Hailon Gomide, Patrícia Reis da Silva, Sylvia Maria Nelo Braga. Brasília: Ed. Instituto do Programa Monumenta, 2005. 75p.

BROWN, D. Close Range Camera Calibration. **Photogrammetric Engineering**, Symposium on Close-Range Photogrammetry, Urbana, Illinois, January, 1971, p. 855-866.

CENTENO, J. A. S.; JUTZI, B. Evaluation of range imaging sensor concerning resolution and illumination. **In: Proceedings, The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS**. Calgary, Alberta, 2010. 6p.

CIPA. Advice and Suggestions for the furtherance of Optimum Practice in Architectural Photogrammetry Surveys. 1st ed. **UNESCO**: Paris, France, 1981. 100p.

JAMTSO, S. **Geometric Modeling of 3D Range Cameras and Their Application for Structural Deformation Measurement**. 174p. Master's Thesis, Department of Geomatics Engineering. University of Calgary, Alberta, 2010.

JOHNSON, R. A. & WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007. 773 p.

KAHLMANN, T.; REMONDINO, F. & INGENSAND, H. Calibration for increased accuracy of the range imaging camera SwissrangerTM. **ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'**, Vol. XXXVI, Part 5, 2006. 6p.

KOCH, R.; SCHILLER, I.; BARTCZAK, B.; KELLNER, F.; KÖSER, K. MixIn3D: 3D Mixed Reality with ToF-Camera. **In: Work Programme of the EU's 7th**, Framework program, 2009. 16p.

KOLB, A.; BARTH, E.; KOCH, R.; LARSEN, R. Time-of-Flight Sensors in Computer Graphics. **In: STAR – State of The Art Report**. The Eurographics Association, 2009. 16p.

- LEICA, Geosystems. **Leica Viva TS15 Datasheet**. Suíça, 2010. 4p.
- MAY, S.; DROESCHEL, D.; HOLTZ, D.; WIESEN, C. FUCHS, S. **3D Pose Estimation and Mapping With Time-of-Flight Cameras**. Germany, 2008. 6p.
- MÖLLER, T.; KRAFT, H.; FREY, J.; ALBRECHT, M.; LANGE, R. Robust 3D Measurements with PMD Sensors. **In: Proceedings of the First Range Imaging Research Day**, ETH Zurich, Switzerland, 8-9 September, 2005. 14 p.
- OLIVEIRA, A. A. A. **Modelagem Tridimensional de Superfícies Utilizando Imagem TOF - Estudo com a Câmara PMD CamCube 2.0**. 127 p. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba: UFPR, 2011.
- PAULY, M.; GROSS, M.; KOBELT, L. P. Efficient Simplification of Point-Sampled Surfaces. **In: VIS '02: Proceedings of the Conference on Visualization '02, IEEE Computer Society**. Washington, DC, USA, 2002. 8 p.
- PIATI, D. **Time-of-Flight Cameras: Tests, Calibration and Multi-Frame Registration for Automatic 3D Object Reconstruction**. 160 p. Ph.D. Thesis Doctoral school of Environment and Territory. Politecnico Di Torino, Itália, 2010.
- PMD, Technologies. **PMD [vision]@CamCube 3**. Datasheet V. N° 20100601. Siegen, 2010. 4p.
- RAPP, H. **Experimental and Theoretical Investigation of Correlating TOF-Camera Systems**. 71 p. Diploma Thesis in Physics, Faculty for Physics and Astronomy. University of Heidelberg, Alemanha, 2007.
- RINAUDO, F. & CHIABRANDO, F. Calibrating and Evaluating a Range Camera for Cultural Heritage Metric Survey. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W1, XXIV International CIPA Symposium, 2 – 6 September 2013**, Strasbourg, France, 2013. 6 p.
- RINGBECK, T. A 3D Time of Flight Camera For Object Detection. **In: Optical 3-D Measurement Techniques, Plenary Session 1: Range Imaging I**. Zürich, 2007. 10 p.
- RUSU, R.B. **Semantic 3D Object Maps for Everyday Manipulation in Human Living Environments**. 260 p. Dissertation for the degree of Doctor of Natural Sciences, Department of Computer Science at the Technical University of München. Alemanha, 2009.
- SALVI, J.; MATABOSCH, C.; FOFI, D.; FOREST, J. A Review of Recent Range Image Registration Methods With Accuracy Evaluation. 19 p. **Image and Vision Computing**, vol. 25, n. 5, 2007, p. 578-596.
- SOTOODEH, S. Outlier Detection in Laser Scanner Points Clouds. **IAPRS, Volume XXXVI, Part 5**. Dresden, 25-27 September, 2006. 6 p.
- WIEDEMANN, M.; SAUER, M.; DRIEWER, F.; SCHILLING, K. Analysis and Characterization of the PMD Camera for Application in Mobile Robotics. **In: Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control**. Seoul, Korea, July 6-11, 2008. 6p.
- ZHANG, Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. **In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. November, 2000. 5p.
- ZHOU, P.; ZHENG, Y.; LI, Z.; LI, M.; SHEN, G. IODetector: A Generic Service for Indoor Outdoor Detection. **In: SENSYS'12**. Toronto, ON, Canada, November 6–9, 2012. 14 p.