

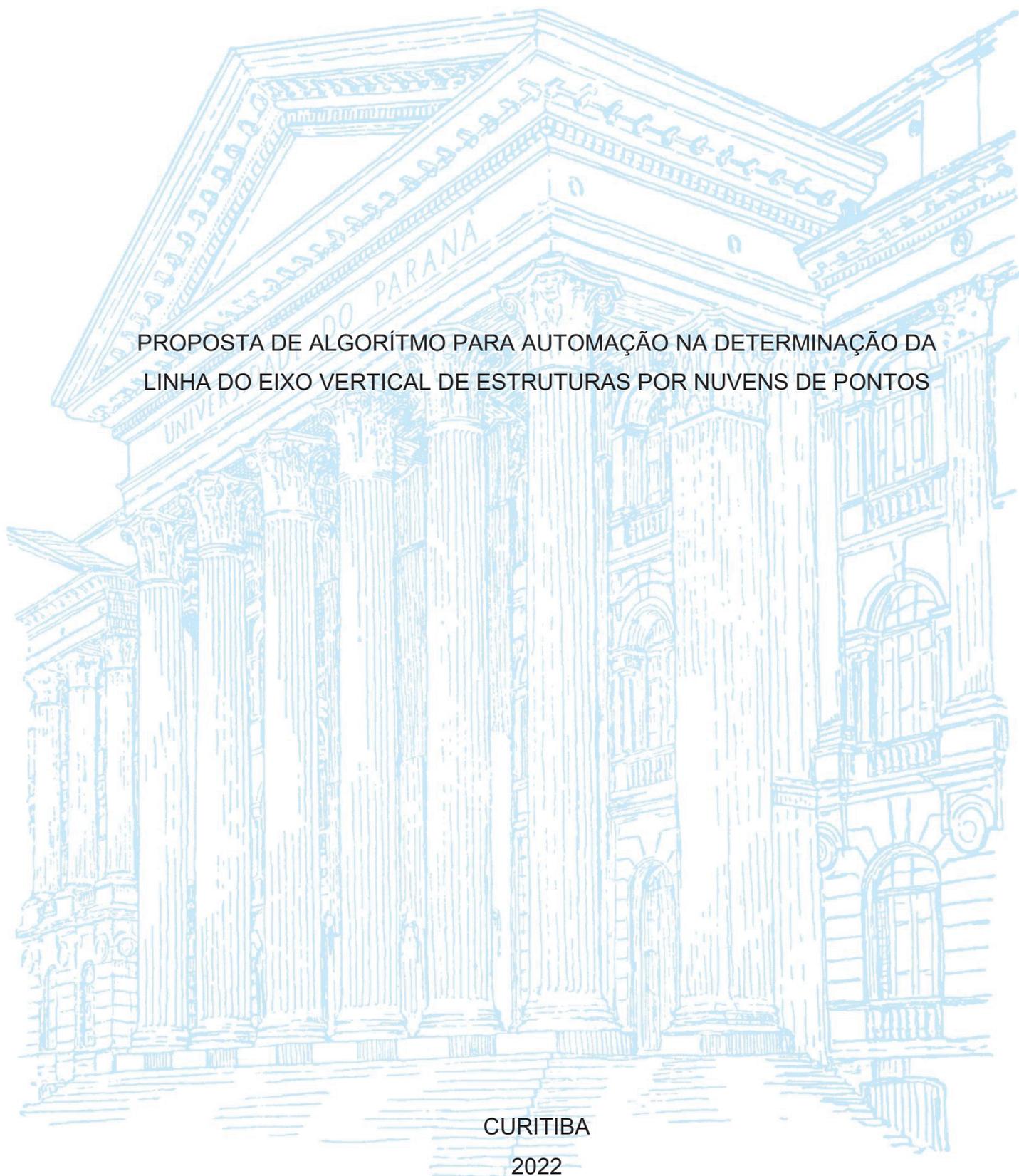
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SAMIR DE SOUZA OLIVEIRA ALVES

PROPOSTA DE ALGORÍTMO PARA AUTOMAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DA
LINHA DO EIXO VERTICAL DE ESTRUTURAS POR NUVENS DE PONTOS

CURITIBA

2022



SAMIR DE SOUZA OLIVEIRA ALVES

PROPOSTA DE ALGORÍTMO PARA AUTOMAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DA
LINHA DO EIXO VERTICAL DE ESTRUTURAS POR NUVENS DE PONTOS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga

Coorientador: Prof. Dr. Alex Soria Medina

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Alves, Samir de Souza Oliveira

Proposta de algoritmo para automação na determinação da linha do eixo vertical de estruturas por nuvens de pontos / Samir de Souza Oliveira Alves. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga.

Coorientador: Prof. Dr. Alex Soria Medina.

1. Monitoramento Geodésico. I. Veiga, Luís Augusto Koenig. II. Medina, Alex Soria. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **SAMIR DE SOUZA OLIVEIRA ALVES** intitulada: **PROPOSTA DE ALGORITMO PARA AUTOMAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DA LINHA DO EIXO VERTICAL DE ESTRUTURA POR NUVENS DE PONTOS**, sob orientação do Prof. Dr. LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Novembro de 2022.

Assinatura Eletrônica

14/11/2022 18:22:57.0

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

16/11/2022 16:56:39.0

ANDRÉA DE SEIXAS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO)

Assinatura Eletrônica

15/11/2022 12:13:20.0

PEDRO LUIS FAGGION

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

15/11/2022 08:00:22.0

LUIZ GUIMARÃES BARBOSA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE
JANEIRO)

Assinatura Eletrônica

15/11/2022 18:03:49.0

WANDER DA CRUZ

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à minha família, mãe, irmãos, avós, tias, tios e primas por todo apoio nessa caminhada. Vocês me ensinaram que mesmo na diferença, o amor e pensar bem no próximo é o que move a gente e nos une. Eu tive a sorte de nascer no meio de pessoas que acertaram e erraram, falaram e demonstraram, vibraram de felicidade e secaram minhas lágrimas.

Ao Professor Luís Augusto Koenig Veiga que fez um papel além de orientador, me guiou como um filho com conselhos, apoio, orientações não acadêmicas para que eu fosse não só seu doutorando, mas um excelente profissional. Espero que um dia consiga mudar a vida dos meus futuros alunos assim como você mudou a minha.

Ao Professor Alex Soria Medina que nunca deixou de acreditar no meu potencial, comprou minhas ideias e sempre tentou me mostrar o melhor caminho.

Aos colegas do GEENG por sempre me socorrerem no desespero e torcerem por mim, em especial Livia, Leandro, Felipe, Day e Alan com uma amizade nascida em Curitiba e que levarei para todo lugar em que eu estiver.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, os excelentes professores e aos colegas, em especial Elias, Andréa, Túlio, Sérgio, Kauê, Kaliama, Samuel e Bruna pessoas incríveis que tive a honra de conviver.

Aos professores da UFRRJ sempre empenhados em dar o melhor de si e acreditarem em seus alunos, em especial aos amigos Alessandra Baptista, Alessandra Palmeiro, Cláudia e Ricardo que me orgulham muito.

Aos amigos do RJ que sempre acreditaram em mim e nunca deixaram de demonstrar o amor e a torcida mesmo de longe, em especial Marina, Mayra, Jorge, Érica, Letícia, Mirelle, Caroline, Manuela, Rayna, Mariane, Ana Paula, Yuri e Thomaz.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa desenvolvida.

*“Tenho sangrado demais
Tenho chorado pra cachorro
Ano passado eu morri
Mas esse ano eu não morro.”*

(Emicida, Majur, Belchior e Pablllo Vittar, Amarelo, 2019)

RESUMO

Atualmente as nuvens de pontos vêm sendo exploradas por diversos campos das engenharias, considerando que das quais pode-se extrair informações quantitativas e qualitativas de espaços e objetos de estudos. Neste quesito, o Laser Scanner Terrestre (LST) possibilita a obtenção das nuvens de pontos com taxas de aquisição que podem chegar à um milhão de pontos por segundo. Considerando a superabundância e, conseqüentemente, a alta redundância de pontos sobre as superfícies de interesse, é possível o desenvolvimento de metodologias para tratamento e extração de informação das nuvens. No âmbito do monitoramento geodésico, a utilização de varreduras por LST podem ser utilizadas para a determinação da variação posicional de pontos ou estruturas. Neste sentido, o presente trabalho visou a elaboração de uma metodologia inovadora para verificação da verticalidade de estruturas a partir do eixo da construção. Inicialmente, propôs-se uma avaliação laboratorial quanto a precisão dos dados obtidos por meio de alvos. Em seguida, tendo como objeto de estudo um reservatório de água vertical e cilíndrico, foi desenvolvido um algoritmo iterativo para segmentação das nuvens de pontos levantadas a partir do LST BLK360 e a Estação Total Robótica (ETR) TS15, ambos da Leica Geosystems. A parametrização dos dados, com base na figura geométrica de uma circunferência, foi aplicada a cada segmento extraído. Para viabilizar a análise, desenvolveu-se um algoritmo para que o alinhamento de maior inclinação da estrutura fosse direcionado ao eixo Y do sistema de referência local dos dados, no qual a matriz de rotação aplicada foi calculada a partir a Decomposição por Valores Singulares (*Singular Value Decomposition* – SVD). Com base nas coordenadas dos centros derivados da parametrização, foram calculados os ângulos de inclinação da estrutura e o deslocamento horizontal no topo do reservatório em relação a base. A metodologia desenvolvida foi aplicada a uma estrutura vertical de uma caixa d'água de forma cilíndrica com 25 metros de altura. A análise da verticalidade a partir dos dados da varredura pelo LST forneceu uma inclinação e deslocamento horizontal do eixo no topo da estrutura de 9,35' e 6,15 cm, respectivamente. Paralelamente, com a varredura pela ETR calculou-se uma inclinação de 6,94' e deslocamento horizontal de 4,56 cm. Sendo assim, constatou-se que a partir das nuvens de pontos e com base na metodologia proposta, foi possível verificar a inclinação do reservatório. Complementarmente, o LST possibilitou maior detalhamento da inclinação ao longo de toda a estrutura.

Palavras-chave: Nuvem de Pontos 1. Parametrização 2. Monitoramento Geodésico 3. Segmentação 4. Decomposição por Valores Singulares 5.

ABSTRACT

Nowadays, point clouds have been explored by several engineering fields, considering the possibility of extracting quantitative and qualitative information from spaces and objects of study. In this point, the Terrestrial Laser Scanner (LST) enables to obtain of point clouds with acquisition rates of around one million points per second. Considering the fact of superabundance and the high redundancy of points onto surfaces of interest, it is possible to develop methodologies for processing and information extraction from clouds. Within the geodetic monitoring, LST scans allow for surveying the positional variation of points or structures. In this sense, the present work aimed to elaborate an innovative methodology to verify the structural verticality by the construction's axis. Initially, the data accuracy was evaluated through a laboratory approach using targets. Then, having as an object of study a vertical and cylindrical water reservoir, an iterative algorithm was developed to segment the point clouds raised from the LST BLK360 and the Robotic Total Station (RTS) TS15, both from Leica Geosystems. Based on a circle geometry, data parametrization was applied to each extracted segment. To enable the analysis, an algorithm was developed to align the highest structure inclination to the Y axis of the local reference system. The rotation matrix applied was calculated from the Singular Value Decomposition (SVD). Considering the circle center coordinates by parameterization, it was calculated the structure inclination angles and the horizontal displacement at the top of the reservoir to the base. The methodology developed was applied to a vertical structure of a cylindrical water tank 25 meters high. The verticality analysis from the LST scan data provided an inclination angle and horizontal displacement at the top of the structure of 9.35' and 6.15 cm, respectively. At the same time, the RTS scans show an inclination of 6.94' and a horizontal displacement of 4.56 cm. Therefore, it was found that from the point clouds and based on the proposed methodology, it was possible to verify the reservoir inclination. In addition, the LST enabled greater detailing of the slope along the entire structure.

Keywords: Point Cloud 1. Parametrization 2. Geodetic Monitoring 3. Segmentation 4. Singular Value Decomposition 5.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2.1 - Fluxograma das etapas para avaliação da acurácia do LST	22
Figura 2.2.2 - Campo de varredura vertical (a) e horizontal (b) do LST BLK360.....	23
Figura 2.2.3 - Alvo preto e branco circular utilizado para o georreferenciamento e avaliação posicional	24
Figura 2.2.4 - Esquema em planta da distribuição espacial dos pontos de controle .	25
Figura 2.2.5 - Esquema em planta da distribuição espacial dos pontos de verificação	25
Figura 2.2.6 - Fluxograma do pós-processamento da nuvem de pontos LST	26
Figura 2.2.7 - Parcela da nuvem de pontos levantada sobre o ponto de controle PV1 com alta densidade (a) e baixa densidade (b)	27
Figura 2.2.8 - Elaboração as amostras elaboradas para avaliação da qualidade posicional	28
Figura 2.2.9 - Coleta das coordenadas do ponto próximo ao centro do alvo	29
Figura 2.2.10 - Segmentação dos pontos contidos no alvo.....	29
Figura 2.3.1 - Gráfico das discrepâncias 2D para a nuvem com alta densidade (levantamento 1)	36
Figura 2.3.2 - Gráfico das discrepâncias 3D para a nuvem com alta densidade (levantamento 1)	36
Figura 2.3.3 - Gráfico das discrepâncias 2D para a nuvem com baixa densidade (levantamento 2)	37
Figura 2.3.4 - Gráfico das discrepâncias 3D para a nuvem com baixa densidade (levantamento 2)	37
Figura 3.2.1 - Sistema de varredura laser terrestre	47
Figura 3.2.2 – Principais componentes de um tanque de armazenamento.....	49
Figura 3.3.1 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento da metodologia proposta Sistema de varredura laser terrestre	51
Figura 3.3.2 – Caixa d’água cilíndrica do campus Jardim Botânico	52
Figura 3.3.3 - Croquis da disposição das estações de varredura laser no Levantamento 1 e no Levantamento 2	53
Figura 3.3.4 – Composição de dados avaliados.....	54
Figura 3.3.5 – Etapas de processamento das nuvens de pontos.....	55

Figura 3.3.6 – Filtragem manual de pontos errôneo de elementos sobre a superfície (a) e em bordas (b)	56
Figura 3.3.7 – Efeito de borda no feixe laser.....	56
Figura 3.3.8 – Segmentação da estrutura ao longo do eixo vertical.....	58
Figura 3.3.9 – Etapas de funcionamento do algoritmo de segmentação da nuvem de pontos	59
Figura 3.3.10 – Processo iterativo de estabelecimento dos limites inferior e superior	60
Figura 3.3.11 – Etapas de determinação e avaliação da linha do eixo vertical	61
Figura 3.3.12 – Ajustamento das coordenadas dos pontos observados x_i, y_i e dos parâmetros definidores da circunferência x_c, y_c, r_{ic}	62
Figura 3.3.13 – Traçado da linha do eixo vertical.....	65
Figura 3.3.14 – Coeficiente angular total dos pontos normalizados em cinza e coeficiente angular pontual entre o ponto médio (x_{no}, y_{no}) e o ponto i (x_i, y_i)	66
Figura 3.4.1 – Pontos removidos pela filtragem automática (vermelho) e pontos mantidos (cinza) na nuvem de pontos 1 (a), nuvem de pontos 2 (b) e nuvem de pontos 3 (c)	68
Figura 3.4.2 – Variação na quantidade de pontos por segmento circular na nuvem de pontos 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	70
Figura 3.4.3 – Valores das coordenadas x e y ajustadas e normalizadas respectivas a nuvem de pontos 1 (a) (b), nuvem de pontos 2 (c) (d) e nuvem de pontos 3 (e) (f).....	71
Figura 3.4.4 – Variação do coeficiente angular local em minutos na nuvem de pontos 1 (a), nuvem de pontos 2 (b) e nuvem de pontos 3 (c)	73
Figura 3.4.5 – Deslocamento horizontal dos segmentos circulares	74
Figura 4.2.1 – Localização de uma diagonal principal de uma matriz arbitrária (8 x 3)	85
Figura 4.2.2 – Interpretação geométrica da diagonalização da matriz A.....	86
Figura 4.3.1 – Etapas de desenvolvimento metodológico	87
Figura 4.3.2 – Localização das posições de varredura com LST e a estação total...	88
Figura 4.3.3 – Varredura laser ou irradiação 3D do reservatório cilíndrico por estação total robótica.....	90

Figura 4.3.4 – Filtragem estatística para remoção (a) ou manutenção (b) de pontos a partir do cálculo de um raio R de abrangência.....	91
Figura 4.3.5 – Etapas para análise da verticalidade por nuvens de pontos	95
Figura 4.3.6 – Ângulo de rotação θ entre os eixos do sistema de referência original (X, Y) e os eixos de maior variação dos dados na nuvem de pontos 2D (X', Y')	96
Figura 4.3.7 – Segmentação da nuvem de pontos cilíndrica a partir da coordenada Z de menor valor	99
Figura 4.3.8 – Cálculo do centro da circunferência (XC, YC) do intervalo n	100
Figura 4.3.9 – Ângulo de Inclinação do reservatório baseado no coeficiente angular (a) e o deslocamento horizontal no topo da estrutura (b).....	102
Figura 4.4.1 – Poligonal ajustada e campos de varredura por estação.....	104
Figura 4.4.2 – Filtragem automática da nuvem de pontos com remoção de outliers (pontos vermelhos)	105
Figura 4.4.3 – Nuvens de ponto levantadas a partir da varredura pelo LST (a) e ETR (b) originais (vermelho) e rotacionadas (azul).....	107
Figura 4.4.4 – Variação da quantidade de pontos por segmento circular extraído da varredura por LST (a) e pela estação total (b)	108
Figura 4.4.5 – Variações das coordenadas dos centros das circunferências calculadas pela varredura por LST (a)(c) e pela ETR (b)(d)	109
Figura 4.4.6 – Variação do deslocamento resultante 2D do reservatório pela varredura por LST (a) e pela ETR (b)	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2-1 - Modos de varredura do BLK360	22
Tabela 2.3-1 - Amostra 1 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação por leitura direta (Levantamento 1)	33
Tabela 2.3-2 - Amostra 2 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação por leitura direta (Levantamento 2)	33
Tabela 2.3-3 - Amostra 3 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela média dos pontos nos alvos (Levantamento 1).....	33
Tabela 2.3-4 - Amostra 4 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela média dos pontos nos alvos (Levantamento 2).....	34
Tabela 2.3-5 - Amostra 5 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela mediana dos pontos nos alvos (Levantamento 1).....	34
Tabela 2.3-6 - Amostra 6 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela mediana dos pontos nos alvos (Levantamento 2).....	34
Tabela 2.3-7 - Resultados dos parâmetros dos testes estatísticos aplicados às amostras de verificação	38
Tabela 3.4-1 – Número de pontos por nuvem de pontos antes e posteriormente à filtragem	68
Tabela 3.4-2 – Coeficiente angular total por nuvem de pontos	72
Tabela 4.4-1 – Erro angular, erro linear e estatísticas de teste do ajustamento da.	103
Tabela 4.4-2 – Semi-eixo maior e semi-eixo menor das elipses de erro	104
Tabela 4.4-3 – Ângulos calculados para rotação entre os sistemas de referência..	106
Tabela 4.4-4 – Ângulos de inclinação do eixo da estrutura e deslocamentos horizontais no topo do reservatório	112

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	11
1.1 INTRODUÇÃO	11
1.2 HIPÓTESE	14
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Objetivo geral	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
CAPÍTULO 2	17
2.1 INTRODUÇÃO	17
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS	21
2.2.1 Instrumento	21
2.2.2 Obtenção da Nuvem de Pontos e dos Alvos	23
2.2.3 Pós-Processamento da Nuvem de Pontos.....	26
2.2.4 Determinação da Qualidade Posicional.....	27
2.2.5 Testes estatísticos.....	28
2.2.6 Teste t Student	29
2.2.7 Teste Qui-Quadrado.....	31
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
2.4 CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	41
CAPÍTULO 3	44
3.1 INTRODUÇÃO	44
3.2 REVISÃO DE LITERATURA	46
3.2.1 LASER SCANNER TERRESTRE	46
3.2.2 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS VERTICAIS	48
3.2.3 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS POR VARREDURA LASER	50
3.3 MATERIAL E MÉTODOS	51
3.3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS SOBRE A ESTRUTURA MONITORADA.....	52
3.3.2 PROCESSAMENTO DAS NUVENS DE PONTOS	54
3.3.3 SEGMENTAÇÃO TRANSVERSAL DA NUVEM DE PONTOS	58
3.3.4 PARAMETRIZAÇÃO DOS SEGMENTOS CIRCULARES E DETERMINAÇÃO DA LINHA DO EIXO VERTICAL DA ESTRUTURA.....	60

3.4 RESULTADOS	67
3.5 CONCLUSÃO	76
REFERÊNCIAS	77
CAPÍTULO 4	80
4.1 INTRODUÇÃO	80
4.2 DECOMPOSIÇÃO POR VALORES SINGULARES	83
4.3 METODOLOGIA	86
4.3.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS.....	88
4.3.2 PROCESSAMENTO DAS NUVENS DE PONTOS DO LST	90
4.3.3 AJUSTAMENTO DA POLIGONAL FECHADA E VARREDURA LASER POR ESTAÇÃO TOTAL.....	92
4.3.4 ANÁLISE DA VERTICALIDADE.....	94
4.3.4.1 Cálculo e Aplicação da Matriz de Rotação 2D.....	95
4.3.4.2 Segmentação pelo Eixo Vertical.....	98
4.3.4.3 Deslocamento Horizontal.....	99
4.4 RESULTADOS	102
4.5 CONCLUSÃO	113
REFERÊNCIAS	114
CAPÍTULO 5	117
5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	118
CAPÍTULO 6	119
REFERÊNCIAS	119
APÊNDICE A – ALGORITMO DE FILTRAGEM AUTOMÁTICA	121
APÊNDICE B – ALGORITMO DE SEGMENTAÇÃO VERTICAL	122
APÊNDICE C – ALGORITMO DE DETERMINAÇÃO DOS CENTROS DAS CIRCUNFERÊNCIAS	124

Capítulo 1

1.1 INTRODUÇÃO

As estruturas de engenharia de grande porte, como tanques, pontes e barragens desempenham papel importante na sociedade, porém falhas e colapsos nas mesmas podem ser responsáveis por impactos significativos nos âmbitos sociais, econômicos e ambientais. Dentro deste contexto, uma das fases de operação destes elementos envolve o monitoramento contínuo das mesmas. Este monitoramento pode ser apenas visual ou empregando-se técnicas físicas e geodésicas. Neste último caso, busca-se determinar variações da geometria destas estruturas. De acordo com Lovas et al., (2008), a Geodésia viabiliza a detecção de deslocamentos e deformações por meio de métodos de levantamentos, nos quais empregam-se equipamentos como estações totais, níveis e Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System – GNSS*).

Nos últimos anos, o desenvolvimento tecnológico vem permitindo a elaboração de novos métodos de avaliação estrutural. Os sistemas terrestres de varredura a laser, conhecidos também como Laser Scanner Terrestre (LST) corresponde a uma das recentes tecnologias cujas aplicações ao monitoramento vêm sendo investigadas, explorando-se as vantagens e buscando-se a minimização das desvantagens que impactam na extração de informação dos dados (SCAIONI; WANG, 2016).

US DEPARTMENT OF THE ARMY (2018) ressalta que o LST permite a avaliação estrutural como um todo, viabilizando a identificação de deslocamentos e rotações do objeto levantado. O mesmo indica que o instrumento é aceito para estudos de monitoramento apenas no modo terrestre, enquanto lasers aerotransportados ainda não são capazes de fornecer o detalhamento e a precisão requerida. De acordo com US DEPARTMENT OF THE ARMY (2018), a precisão para pontos alvo para se calcular a verticalidade uma estrutura de concreto seria de ± 2 mm, com nível de confiança de 95%.

O levantamento por varredura laser permite a aquisição de nuvens de pontos tridimensionais (3D) por meio de observações indiretas de distâncias, ângulos verticais e direções horizontais (GONÇALVES, 2018). Nas últimas décadas, ampliaram-se as investigações destas nuvens de pontos no monitoramento de túneis,

pontes, barragens, torres de concreto, entre outros (LOVAS et al. 2008; SCHNEIDER, 2006; LENARTOVICZ, 2013; WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014; MUKUPA et al. 2017).

Atualmente, a diversidade de LST no mercado apresenta variadas formas de operação destes sistemas, inviabilizando a classificação geral destes equipamentos (FRÖHLICH; METTENLEITER, 2004). Este fato fomenta a necessidade de investigação dos dados provenientes da varredura laser terrestre, a fim de delinear o desempenho destes instrumentos a partir do processamento e ajustamento dos dados. Adicionalmente, de acordo com a ISO 17123-6 (2012), avaliar a precisão dos dados obtidos pelos levantamentos com LST é fundamental e deve ser investigado antes da realização da medição pretendida.

Além do impacto dos erros instrumentais na qualidade das observações, fatores ambientais e características da superfície levantada também podem resultar no aumento das incertezas. Estudos apontam a influência de fatores ambientais sobre as observações a longas distâncias, tanto com LST, quanto em outros equipamentos de mensuração laser, como as estações totais (FRIEDLI; PRESL; WIESER, 2019). Adicionalmente, o tamanho e curvatura do objeto levantado, ângulos e distâncias de varredura e o método da aquisição de dados, como a densidade de pontos pretendida, são parâmetros que também influenciam na qualidade dos dados a serem extraídos das nuvens de pontos (STAIGER, 2005).

US DEPARTMENT OF THE ARMY (2018) considera os *hardwares* do instrumento e o *software* de processamento dos pontos como fatores que também interferem na acurácia dos dados. De acordo com Rusu et al. (2008), erros nos pontos podem resultar em distorções nas informações extraídas dos dados ou em etapas do processamento da nuvem de pontos, como a obtenção dos vetores normais de superfície ou falhas no registro entre nuvens de pontos.

As dimensões das superfícies a serem monitoradas implicam no estabelecimento de mais de uma estação do LST, permitindo que o levantamento contemple a região de interesse. Conforme o objetivo final de utilização dos dados, a união de um par ou mais de nuvens representaria uma etapa prévia de tratamento. Pavan e Santos (2015) definem esta atividade como registro, ou transformação do corpo rígido de nuvens de pontos 3D, na qual pretende-se minimizar os desalinhamentos angulares e deslocamentos lineares entre pares de nuvens. Bolkas e Martinez (2018) indicam as especificações dos instrumentos, espaçamento entre os

pontos, a cor do alvo utilizado no registro, entre outros, devem ser fatores considerados para realização do registro.

Estes fatores fomentam a necessidade de contínuas investigações e o desenvolvimento de abordagens que proporcionem o aumento da confiabilidade dos dados adquiridos, minimizando-se os erros. Conforme Lindenbergh e Pietrzyk (2015), os desafios do monitoramento de estruturas estão vinculados às grandezas relativas ao deslocamento que se deseja investigar, as quais podem ter dimensões próximas às precisões alcançáveis pelos levantamentos com LST.

Outro fator característico dos levantamentos com este instrumento é a realização de varreduras de pontos de forma aleatória. De acordo Vosselman e Maas (2010), o método de levantamento por varredura laser terrestre inviabiliza a obtenção de amostras de coordenadas 3D sobre os mesmos pontos de interesse, em épocas diferentes, distinguindo-se dos métodos tradicionais de monitoramento.

Na busca pelo aperfeiçoamento dos métodos de avaliação utilizando nuvens de pontos, a parametrização dos dados é uma das abordagens exploradas. Este método consiste no ajustamento das observações por meio de funções de formas geométricas, como planos, esferas e cilindros, são alternativas de tratamentos dos dados. Estas abordagens vêm apresentando resultados satisfatórios, como o aumento das precisões dos parâmetros calculados frente as próprias precisões das coordenadas tridimensionais.

A parametrização acarreta em alguns desafios, como na definição das estações de varredura, a densidade de pontos obtidas e, principalmente, no modelo de parametrização eficiente para a detecção de deslocamentos desconhecidas (HOLST; KUHLMANN, 2016).

No caso das estruturas verticais, como torres, chaminés, mastros e caixas d'água, o monitoramento por varredura laser deve ponderar alguns desafios inerentes ao trabalho realizado. Estas construções são caracterizadas pelas suas alturas apresentarem dimensões maiores que suas larguras. Tal fato aumenta a amostragem de dados no plano horizontal e reduz a amostragem de pontos ao longo do eixo vertical. Irughe-Ehigiator e Ehiorobo (2021) destacam o LST como uma ferramenta que possibilita observar alterações de forma contínua ou com uma densificação de pontos sobre a superfície de interesse superior ao obtido por outros métodos de levantamento topográfico.

Conforme o contexto apresentado, considerando os aprimoramentos tecnológicos dos LST e as investigações de técnicas de utilização de dados de varredura laser, a elaboração de um método que viabilize a parametrização contínua da nuvem de pontos possibilitaria a avaliação ininterrupta ao longo das estruturas verticais. Este trabalho visou o desenvolvimento de uma metodologia para o monitoramento destas estruturas verticais a partir de nuvens de pontos. Para tal, foram desenvolvidos algoritmos inéditos para a segmentação ao longo do eixo da estrutura e a parametrização dos dados baseada em elemento geométrico evidenciado nos segmentos obtidos. Paralelamente, elaborou-se uma abordagem inédita para a compatibilização das nuvens aplicando-se uma matriz de rotação calculada a partir da Decomposição por Valores Singular (*Singular Value Decomposition* - SVD). A partir disso, calcularam-se os parâmetros que descreveriam o centro de cada circunferência segmentada da nuvem de pontos, avaliando-se a verticalidade da estrutura pela variação dos centros.

1.2 HIPÓTESE

Se a verificação prévia do LST, a aplicação de filtragem para redução dos erros e a parametrização da nuvem de pontos permitem a extração de informações precisas, então sugere-se que a segmentação da nuvem ao longo do eixo vertical e o ajustamento dos segmentos circulares possibilitam o traçado de uma linha do eixo vertical para verificação da verticalidade de estruturas.

1.3 OBJETIVOS

Nos itens a seguir serão abordados os objetivos geral e específico propostos para o desenvolvimento deste trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver uma abordagem para a automação no monitoramento de estruturas verticais pela determinação da linha do eixo vertical e sua variação horizontal a partir de nuvens de pontos.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Verificar a precisão do equipamento;
- b) Desenvolver um algoritmo de segmentação vertical;
- c) Calcular os parâmetros dos segmentos circulares;
- d) Avaliar os efeitos da distância entre o laser scanner terrestre e a superfície monitorada;
- e) Compatibilizar a orientação dos sistemas de referência das nuvens de pontos;
- f) Calcular os deslocamentos horizontais da estrutura.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em três capítulos, os quais contemplam a pesquisa por meio do desenvolvimento de três artigos que permeiam a proposta indicada. Preliminarmente, considerando o funcionamento do LST e os erros derivados, sobretudo, do modo de realização da varredura, no Capítulo 2 foi apresentado o artigo publicado **Avaliação da qualidade posicional de varreduras laser terrestre para aplicações em arquitetura**, na revista PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção em 2022. Neste artigo, realizou-se a verificação da qualidade posicional das coordenadas obtidas pela varredura laser com LST BLK360 da Leica Geosystems. A partir dele, constatou-se que as precisões das coordenadas atenderam a precisão nominal indicada pelo fabricante de 6 mm dependendo da estratégia de extração de informação. Adicionalmente, demonstrou-se a viabilidade da estimativa do centro de um alvo circular pela média das coordenadas dos pontos contidos no círculo.

O Capítulo 3 corresponde ao 2º artigo, denominado **Desenvolvimento metodológico para verificação da verticalidade de estruturas por nuvem de pontos**, com sua versão em inglês em processo de revisão pela revista *Applied Geomatics*. Com base na prévia verificação do instrumento, realizada no 1º artigo, pode-se inferir que as varreduras realizadas estão isentas de erros sistemáticos, visto que as precisões dos pontos avaliados atenderam a precisão nominal do LST. Assim, elaborou-se a estratégia da segmentação da nuvem de pontos ao longo do eixo vertical da estrutura. Com isso, pode-se determinar o centro de circunferências contidas em cada segmento por meio do ajustamento das observações, utilizando o

método combinado do Método dos Mínimos Quadrados. Uma das etapas cruciais da realização do ajustamento, presente no 2º artigo, consistiu na estimativa do vetor dos parâmetros iniciais, visto que a estimativa distante dos parâmetros reais pode inviabilizar a determinação dos parâmetros ajustados. Considerando a estratégia da estimativa do centro da circunferência pela média no artigo 1, os parâmetros iniciais foram definidos com o cálculo da média das coordenadas x e y contidas em cada segmento.

Considerando a verificação do LST, bem como a consolidação da estratégia de segmentação e de determinação da linha do eixo vertical propostas, no Capítulo 4 foi apresentado o 3º artigo, intitulado **Análise da verticalidade de estruturas cilíndricas por varredura laser terrestre**. Com base no desenvolvimento dos algoritmos para filtragem e segmentação presente no 2º artigo e apoiado na análise da qualidade posicional do LST no 1º artigo, no último capítulo comparou-se a análise da verticalidade a partir de nuvens de pontos geradas pela varredura por LST e por uma estação total robótica. Com a finalidade de viabilizar a análise dos dois conjuntos de dados, foram aplicadas rotações nos sistemas de referência dos dados a partir da matriz de rotação dada pela decomposição por valores singulares.

Capítulo 2

AValiação DA QUALIDADE POSICIONAL DE VARREDURAS LASER TERRESTRE PARA APLICAÇÕES EM ARQUITETURA

Um tema de destaque atual na arquitetura e construção é a captura da realidade, um processo de digitalização do mundo real usando diferentes tecnologias de medição 3D, permitindo a expressão da realidade em diferentes etapas de um projeto e consistindo em uma ferramenta importante na construção de sistemas BIM (Building Information Modeling). Um dos principais equipamentos na obtenção destes dados 3D são os Lasers Scanners Terrestres (LST) que permitem a geração das nuvens de pontos. Entretanto, como todo instrumento de mensuração, os LST e a prática de varredura laser apresentam limitações. Sendo assim, as observações coletadas contêm incertezas que devem ser avaliadas para utilização como dados na modelagem digital do objeto de interesse. Desta forma é preciso avaliar a qualidade posicional das coordenadas obtidas em um levantamento laser para que seja possível entender como se propagarão no produto final. Neste trabalho é apresentada uma metodologia de verificação da qualidade das coordenadas de uma varredura laser terrestre, utilizando o LST BLK360 Leica. Foram empregados pontos de controle para o registro e determinação do sistema de referência dos dados. Posteriormente, as coordenadas dos pontos de verificação, registradas nas nuvens de pontos, foram comparadas com os dados obtidos por um levantamento topográfico com a estação total Leica TS15 de alta precisão, e avaliados estatisticamente. A estimativa da qualidade da nuvem registrada passa pela interpolação das coordenadas dos centros dos alvos de controle, pois estas são comparadas com as coordenadas obtidas através de posicionamento por irradiação tridimensional, empregando-se a estação total. O método de interpolação e a densidade da nuvem tiveram influência na avaliação da qualidade posicional na nuvem registrada, sendo que se utilizando alta densidade de amostragem com o LST e interpolação, através dos valores médios para as coordenadas dos alvos, a qualidade do posicionamento foi melhor que 6mm para o presente estudo de caso.

2.1 INTRODUÇÃO

Algumas perguntas são frequentes na área de Arquitetura e Construção: quais as dimensões de um ambiente, como são os detalhes de uma fachada histórica, como está o andamento de um determinado projeto? Respostas para estas e outras questões podem ser obtidas com o auxílio da captura da realidade, um termo até recente, que busca expressar a possibilidade de realização de um levantamento tridimensional de um objeto ou área, sem a necessidade de tocá-los, trazendo mais segurança e criando melhores condições para a preservação, gerando informações digitais sobre os itens levantados (CINTRA; GONÇALVES, 2019). E, de acordo com Dinis et al. (2020), a captura da realidade também fornece dados para elaboração de

produtos relacionados à realidade virtual, ambientes considerados mais intuitivos, interativos e compreensíveis para atender ao perfil de uma gama mais ampla de usuários.

O conceito de captura da realidade não é recente, sobretudo quando ponderamos a realização de técnicas de levantamentos topográficos tridimensionais e fotogramétricas, usadas há décadas, como a modelagem e construção de réplicas de peças e objetos de museus, explorados desde os anos 1960 (CINTRA; GONÇALVES, 2019).

A diferença está na forma como isto é executado, com a coleta de milhares de pontos por segundo, empregando-se equipamentos como lasers scanner terrestre (LST), por técnica conhecida como varredura a laser, e na forma de tratamento e obtenção de informações a partir deste volume de dados. Conforme indicado por Dinis et al. (2020), as varreduras por laser scanner e realidade virtual estão mutuamente conectadas, principalmente consideradas no desenvolvimento de projetos em ambientes BIM (Building Information Modeling).

São descritas em Leica Geosystems (2020), algumas razões para o uso da tecnologia de captura da realidade em atividades de Arquitetura:

- Obter dimensões precisas onde pode haver falta de planos as-built;
- Gerar visualizações precisas de um projeto com base na realidade do ambiente existente para ajudar a atender às aspirações arquitetônicas do cliente;
- Gerar, simular e testar modelos 3D para garantir que o projeto corresponda à realidade;
- Garantir a colaboração completa de design e progresso com todas as partes interessadas ao longo do projeto.

O LST vem se destacando quanto a estes múltiplos usos, com destaque à indústria da arquitetura, engenharia e construção, desde a reconstrução tridimensional de patrimônios históricos até as aplicações em aperfeiçoamento de atividades agrícolas (DINIS et al., 2020; ARYAN; BOSCHÉ; TANG, 2021). O desenvolvimento e ampliação do uso da tecnologia Laser Scanner, em diversos campos da ciência, fomentam, entre outras atividades, a necessidade de estudos voltados às investigações das limitações e aplicabilidade de tais sistemas. A qualidade e precisão das informações obtidas passam necessariamente pela avaliação da precisão dos equipamentos utilizados no processo de captura.

Os levantamentos por LST tratam-se de uma técnica que visa a mensuração por método ativo e a determinação de pontos amostrais, que podem ser adquiridos atualmente a uma taxa superior a um milhão de pontos por segundo, graças aos avanços tecnológicos (WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014).

A varredura é realizada entorno da posição em que o instrumento foi instalado, com medidas de distâncias a partir do sensor laser, habitualmente denominado por Light Detection And Ranging (LIDAR) (WUTKE, 2006). Estas medidas são feitas sob intervalos regulares de ângulos verticais e horizontais. Dessa forma, são obtidas informações tridimensionais de objetos e/ou superfícies de interesse em um curto espaço de tempo (FUENTES SANTIBAÑEZ, 2010; SHAN; TOTH, 2018).

Para Canuto e Salgado (2020), esta técnica de levantamento, junto ao levantamento fotogramétrico, representam o estado da arte das técnicas que contribui na geração de modelos geométricos precisos, rápidos e realistas, auxiliando na preservação e resgate das informações do patrimônio.

Canuto, Moura e Salgado (2016), apontam como uma das vantagens da utilização dos dados de varreduras lasers na manutenção e preservação dos patrimônios históricos e culturais, a possibilidade de modelagem da informação em plataformas de Modelagem da Informação da Construção BIM, e a experimentação em realidade aumentada e realidade virtual, podendo auxiliar em futuros resgates das informações projetuais perdidas. Cogima et al. (2020) destacam ainda que as varreduras laser como primeiro passo para a criação dos modelos inteligentes para as edificações históricas, seguido do processamento dos dados e finalizando com a modelagem BIM.

Em seu trabalho sobre o panorama atual da abordagem BIM, Checcucci (2019) indica que este processo de modelagem está presente em diversas fases do ciclo de vida da edificação, mas que a maioria está concentrada na etapa de projeto. De acordo com Grosskopf et al. (2019), os avanços tecnológicos no desenvolvimento dos LST e sensores imageadores contribuíram no aprimoramento da coleta de dados em campo de forma ampla, minimizando os riscos das informações das construções investigadas deixem de ser capturadas e modeladas.

Entretanto, apesar da qualidade geométrica oferecida pelo LST e a possibilidade de modelagem BIM dos elementos em diferentes níveis de detalhe (LoD – Level of Detail) (COGIMA et al., 2020), os avanços tecnológicos não são capazes de evitar as imperfeições presentes nas montagens e construções destes

instrumentos. Vosselman e Maas (2010), denominam como erros sistemáticos os efeitos destes fatores sobre os dados de varredura laser. Portanto, faz-se necessária a aplicação de métodos investigativos a fim de determinar as limitações impostas nestes sistemas.

Além dos possíveis erros decorrentes do próprio funcionamento do LST, como a incerteza no alcance do laser (Range uncertainty), influenciado pelo princípio de funcionamento para medição de distância e incerteza angular (Angular uncertainty), ocasionado pelas imperfeições dos mecanismos dos espelhos e dos medidores angulares, Walton, Delaloye e Diederichs (2014); Jaafar, Meng e Sowter (2017) e Staiger (2005) ressaltam outras fontes na qualidade posicional das nuvens de pontos. Os autores Walton, Delaloye e Diederichs (2014) apontam influências que vão desde as características das superfícies levantadas como: curvatura, orientação e superfície dos objetos mapeados, aos fatores ambientais, como: a refração e vibrações. Outros erros estão associados a pós-processamento dos dados de varredura, como o registro e/ou georreferenciamento das nuvens (WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014).

Conforme apontado por Schulz (2007), trabalhos geodésicos aplicados à engenharia requerem, na maioria dos casos, precisão dos dados mensurados na ordem de milímetros. Portanto, os instrumentos usados devem ser calibrados para atender aos requisitos de precisão. Neste processo é determinada a viabilidade de aplicação da nuvem de pontos em demais projetos (VOSELMAN; MAAS, 2010).

Embora o termo calibração seja empregado comumente em trabalhos que buscam avaliar a precisão de coordenadas obtidas com LST, o mais apropriado seria empregar o termo verificação. De acordo com INMETRO (2012), a prática de verificação dos instrumentos fornece a evidência objetiva de que uma dada característica satisfaz os requisitos especificados. Neste trabalho o instrumento foi testado para verificar se as medidas efetuadas atenderiam a determinado critério, sendo, neste caso, a precisão nominal do instrumento. Já a calibração estabelece, sob condições específicas, a correspondência entre o estímulo e a resposta de um instrumento de medir, sistema de medir ou mostrador de medição, resultando na determinação de modelos de correção a serem aplicados sobre as medidas efetuadas ou no próprio equipamento (FAGGION, 2001; INMETRO, 2012).

Em trabalhos voltados para plataformas BIM, as nuvens de pontos são os dados básicos para diversas atividades posteriores, como a extração de feições arquitetônicas de interesse, geração de ortoimagens, entre outros. Conhecer a

qualidade posicional dos dados obtidos permite realizar uma avaliação da qualidade dos subprodutos, gerados a partir destes dados.

Desta forma, torna-se importante a avaliação do LST para atestar a qualidade posicional alcançável com o instrumento. Neste trabalho, foi realizada uma avaliação da qualidade posicional de um LST, modelo Leica BLK360, para obtenção de coordenadas bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), em alvos pré-definidos, obtidos a partir da nuvem de pontos. Para tal, foram confrontadas as coordenadas de pontos de verificação obtidas pelo LST, e as homólogas determinadas a partir de uma rede de pontos materializados em laboratório, que tiveram suas coordenadas definidas por meio de técnicas de irradiação topográfica tridimensional, empregando-se uma estação total robótica Leica TS15, com precisão superior ao LST. As discrepâncias calculadas foram avaliadas quanto a existência de tendências e a precisão com base na precisão nominal do instrumento.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item são abordadas as características dos instrumentos utilizados na pesquisa, bem como a metodologia empregada na verificação dos resultados obtidos. A Figura 1 apresenta um fluxograma das etapas adotadas na análise da acurácia das coordenadas tridimensionais, e distâncias obtidas a partir do LST. A primeira etapa está relacionada com a coleta de dados em laboratório, tanto das nuvens de pontos pelas varreduras com LST, como dos pontos de controle e de verificação por um levantamento topográfico, com uma estação total. Na segunda etapa foram realizados os processamentos e a extração das coordenadas dos pontos de verificação das nuvens, homólogos aos mensurados na primeira etapa com a estação total. Na terceira etapa foram feitos os testes de qualidade.

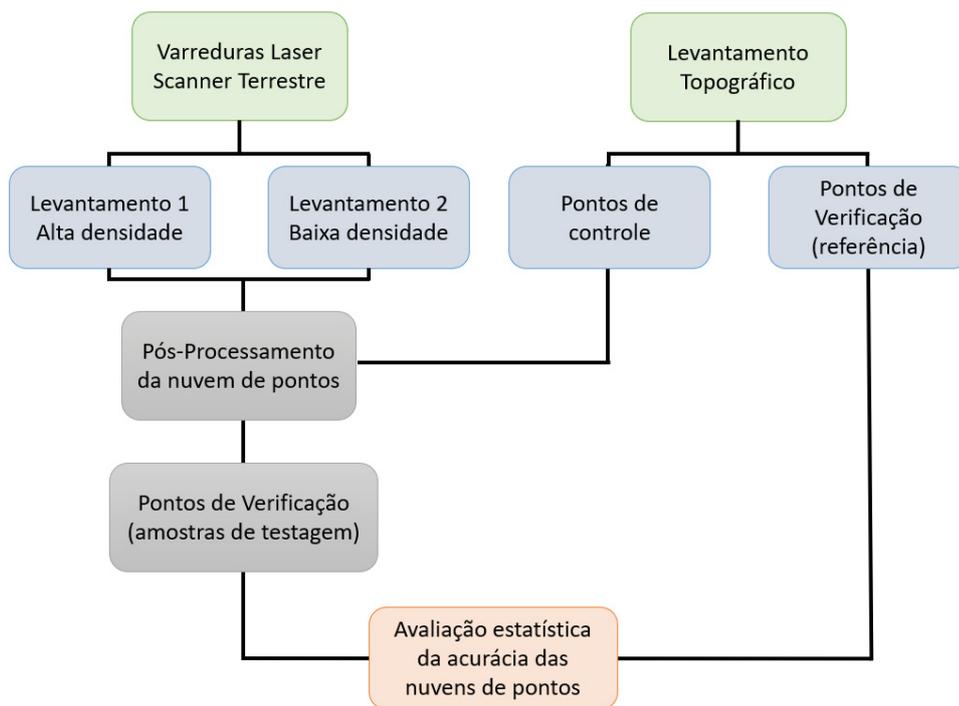
2.2.1 Instrumento

O LST empregado nos testes foi o LST BLK360, da Leica Geosystems, que possui uma unidade laser Classe 1, com comprimento da onda 830 nm e um prisma rotativo vertical em base rotativa horizontal. Além destes, o instrumento é composto

por três câmeras HDR com 150 megapixels e uma câmera termográfica (LEICA GEOSYSTEMS, 2018).

Ao longo de cada varredura laser, a taxa de aquisição pode chegar a 360 mil pontos por segundo e, com alcance mínimo de superfícies de 60 cm e máximo de 60 m (LEICA GEOSYSTEMS, 2018). O sistema possibilita a realização da varredura em três modos, que influenciam tanto no tempo da aquisição dos dados, quanto na precisão dos pontos obtidos (Tabela 1).

Figura 2.2.1 - Fluxograma das etapas para avaliação da acurácia do LST



Fonte: O autor (2022).

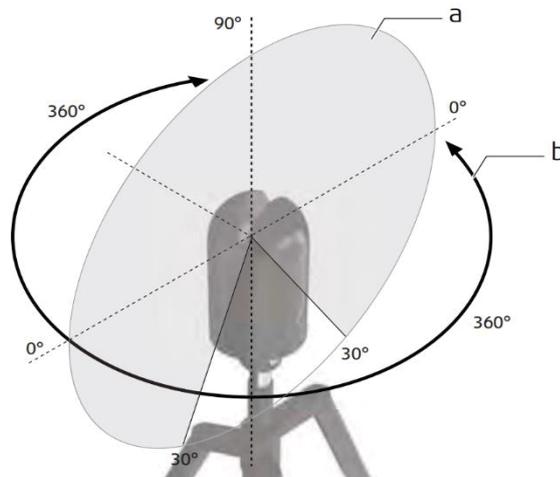
Tabela 2.2-1 - Modos de varredura do BLK360

Modo de escaneamento	Precisão (mm/10 m)	Duração do escaneamento (min)
Rápido	20	0,67
Padrão	10	1,38
Alta densidade	5	3,67

Fonte: Adaptado de LEICA GEOSYSTEMS (2018).

Os campos de visão vertical (a) e horizontal (b) de registro dos pontos, com varredura do laser de 300° e 360°, respectivamente, são representados na Figura 2.2.2.

Figura 2.2.2 - Campo de varredura vertical (a) e horizontal (b) do LST BLK360



Fonte: Leica Geosystems (2018).

Na determinação das coordenadas dos pontos de controle, foi empregada uma estação total robótica de alta precisão, modelo TS15 da Leica Geosystems, que tem como características técnicas a precisão nominal de 1" para medidas angulares e de $\pm (1 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm})$ para medidas de distâncias com prismas, com comprimento de onda de 658 nm. No caso de outras superfícies (sem prisma), tal como utilizada neste trabalho, a precisão na mensuração de distâncias é de $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$ (LEICA GEOSYSTEMS, 2015).

2.2.2 Obtenção da Nuvem de Pontos e dos Alvos

As varreduras com o LST foram realizadas no Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia (GEENG), do Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Visando avaliar os impactos dos modos de escaneamento, conforme indicado pelo fabricante, realizou-se o primeiro levantamento com LST no modo alta densidade. O segundo levantamento se deu com varreduras no modo rápido, ou seja, baixa densidade.

Para o pós-processamento e análise estatística métrica, a partir da nuvem de pontos, distribuíram-se alvos no interior do laboratório. Sendo assim, o LST foi estacionado em 3 posições, definidas de modo que garantissem o recobrimento de todas as superfícies contendo os alvos e a sobreposição entre as nuvens de pontos. A presença de mais de uma estação implicou na necessidade de realização da união

entre as nuvens, prática denominada por registro ou alinhamento de nuvens de pontos, comum a levantamentos de ambientes internos ou externos (VOSELMAN; MAAS, 2010).

Ao todo, 10 pontos de controle e 11 pontos de verificação foram dispostos pelo laboratório, e mensurados empregando-se uma estação total, em um sistema de referência local estabelecido. Segundo Schulz (2007), para registro entre nuvens de pontos é recomendado serem utilizados entre 4 e 6 alvos. O número de alvos destinados à avaliação da acurácia foi estipulado conforme outros estudos relacionados também à análise de qualidade de dados *laser*, como: Wutke e Centeno (2007), que utilizaram 6 alvos para avaliar a resolução de um LST; Borges *et al.* (2018) que utilizaram 9 alvos esféricos para investigar a precisão posicional do LST e Silva e Schulet (2015) que utilizaram 20 alvos ao todo, mas para avaliação de dados *laser* aerotransportado do bairro Macaxeira em Recife-PE, área muito superior ao investigado neste estudo.

A Figura 2.2.3 ilustra o alvo utilizado, impressos usando-se modelos fornecidos pelo fabricante do LST BLK360. Tratam-se de alvos circulares, impressos em papel fosco, com 15cm de diâmetro.

Figura 2.2.3 - Alvo preto e branco circular utilizado para o georreferenciamento e avaliação posicional



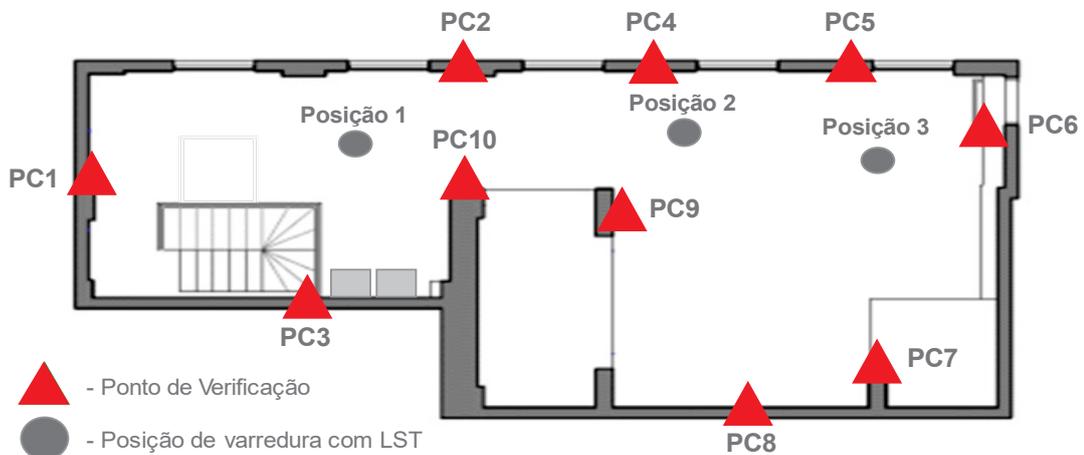
Fonte: Os autores (2022).

Cabe ressaltar que, para o posterior processo de avaliação da acurácia, os pontos derivados das varreduras com LST deveriam estar no mesmo sistema de referência que a amostra de verificação (levantada com a estação total). Logo, para a compatibilização dos referenciais, foi necessária a realização dos georreferenciamentos das nuvens. Além do registro, o georreferenciamento de

nuvens de pontos também é apontado como fonte de erro para as nuvens de pontos (WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014).

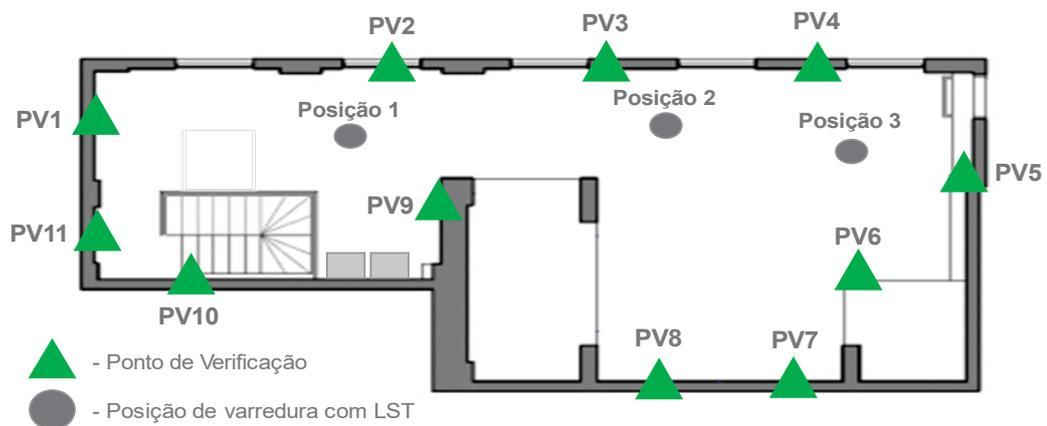
A Figura 2.2.4 ilustra a posição do LST em vista superior no momento da varredura e dos alvos, contendo os pontos de controle (PC1 ao PC10) e, a Figura 2.2.5, com os pontos de verificação (PV1 ao PV11). Na distribuição dos pontos, buscou-se cobrir o volume total do local levantado e posicionar os alvos em locais sem obstrução, uma vez que ambos influenciam significativamente a precisão no pós-processamento (SCHULZ, 2007).

Figura 2.2.4 - Esquema em planta da distribuição espacial dos pontos de controle



Fonte: Os autores (2022).

Figura 2.2.5 - Esquema em planta da distribuição espacial dos pontos de verificação

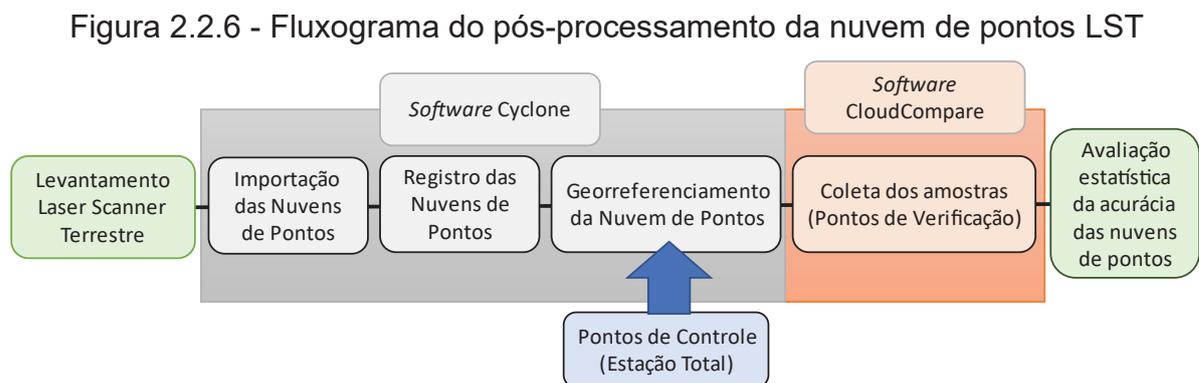


Fonte: Os autores (2022).

Conforme ilustrado nas figuras acima, os pontos foram distribuídos em toda a área de levantamento. Os pontos de verificação foram distribuídos com diferentes distâncias em relação às posições de varredura do LST.

2.2.3 Pós-Processamento da Nuvem de Pontos

Neste trabalho, considerou-se pós-processamento todas as etapas em que os dados são manipulados e tratados por meio de técnicas automáticas ou manuais, como decorrente na atividade de registro. A Figura 2.2.6 apresenta o fluxo de trabalho realizado entre a aquisição das nuvens de pontos e a avaliação da qualidade posicional. Foram efetuadas varreduras com LST em dois modos de configuração, o primeiro com alta densidade (Levantamento 1) e o segundo com baixa densidade (Levantamento 2). Logo, as etapas desenvolvidas e apresentadas a seguir foram executadas igualmente para os dois conjuntos de dados



Fonte: Os autores (2022).

O conjunto de nuvens de pontos, respectivo a cada levantamento, foi importado no software Cyclone. Posteriormente, realizou-se o registro das nuvens de cada posição de varredura LST (Posição 1, Posição 2 e Posição 3). A união das nuvens se deu pela compatibilidade de feições e ajuste manual pelo operador, bem como a otimização do registro pelo software.

O georreferenciamento pode ser realizado pontualmente através de alvos, ou por primitivas geométricas, como os planos, cilindros ou esferas (VOSSelman; MAAS, 2010). Neste trabalho, executou-se o georreferenciamento por meio de pontos de controle levantados pela estação total. Tais pontos foram importados e assinalados nos respectivos alvos amostrados nas nuvens pós-registradas, resultando no georreferenciamento da nuvem de pontos.

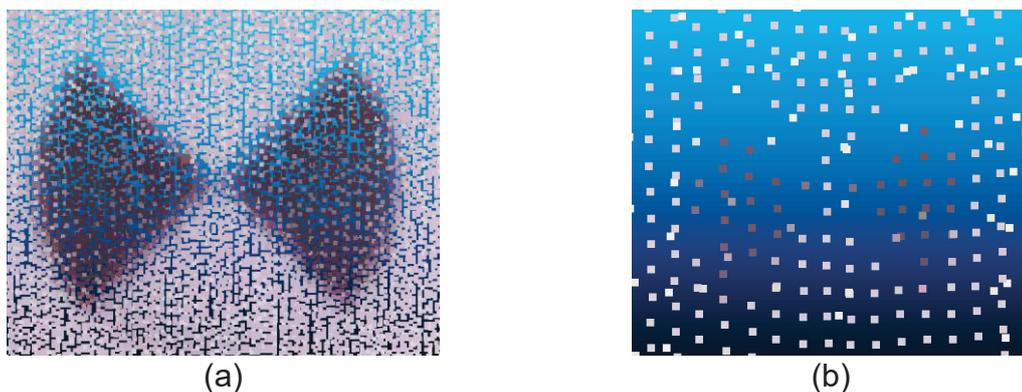
O Cyclone possibilita ainda a exportação das nuvens em outros formatos, compatíveis com outras plataformas de processamento de nuvem de pontos. Assim, os dados foram exportados no formato *.PTS para serem trabalhados no software livre CloudCompare.

2.2.4 Determinação da Qualidade Posicional

Para a avaliação da qualidade posicional 2D e 3D, alcançável com as varreduras laser terrestre, distribuíram-se os pontos de verificação mencionados anteriormente, conforme a Figura 2.2.5. Tais pontos foram mensurados e suas respectivas coordenadas tridimensionais determinadas por irradiação com a estação total TS15, no mesmo sistema local dos pontos de controle.

Assim, a avaliação visou comparar as coordenadas dos alvos obtidas nas nuvens de pontos com as coordenadas precisas, levantadas com a estação total. Entretanto, conforme apresentado na Figura 7, coletar as coordenadas no centro do alvo, direto na nuvem de pontos, acarreta em imprecisões, uma vez que a varredura com LST fornece pontos distribuídos sobre a superfície levantada, ou seja, torna-se improvável que um destes pontos coincida exatamente com o centro geométrico do alvo. A condição para leitura das coordenadas do centro pode ser prejudicada conforme explicitado também pela Figura 2.2.7, onde o alvo referente ao ponto PV1 apresenta maior densidade para o levantamento 1 (Figura 2.2.7 - a), ou seja, mais pontos obtidos pelo LST quando comparado ao levantamento 2 (Figura 2.2.7 - b), realizado no modo baixa densidade do equipamento.

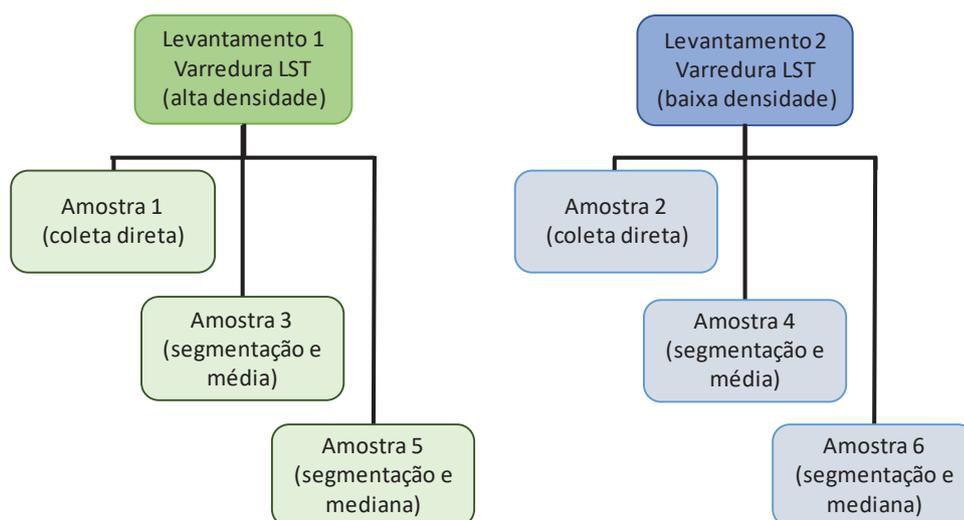
Figura 2.2.7 - Parcela da nuvem de pontos levantada sobre o ponto de controle PV1 com alta densidade (a) e baixa densidade (b)



Fonte: Os autores (2022).

Para seguir a avaliação, três estratégias foram adotadas para coleta no CloudCompare das coordenadas em cada levantamento. A Figura 2.2.8 esquematiza as diferentes amostragens realizadas. A amostra 1 e 2 representam as coordenadas dos pontos mais próximos ao centro geométrico dos alvos para os levantamentos 1 e 2, respectivamente (Figura 2.2.9). A segunda estratégia consistiu na estimação das coordenadas segmentando-se todos os pontos contidos no alvo e calculando-se as médias, formando-se as amostras 3 e 4 (Figura 2.2.10). As amostras 5 e 6 na terceira estratégia foram similares à segunda estratégia, porém com o centro determinado a partir da mediana dos dados segmentados.

Figura 2.2.8 - Elaboração as amostras elaboradas para avaliação da qualidade posicional



Fonte: Os autores (2022).

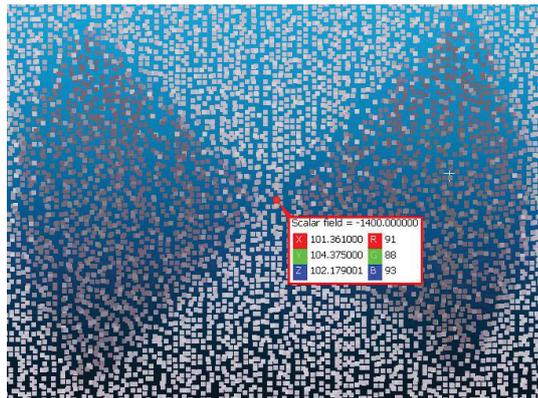
2.2.5 Testes estatísticos

Os testes seguiram os procedimentos convencionais de teste de hipóteses, sendo utilizada a metodologia apresentada em Merchant (1982). Foram realizados usando as discrepâncias, os dados do laser scanner e os pontos de controle correspondentes, determinados a partir do levantamento topográfico, empregando-se irradiação 3D com estação total. Assim, foram avaliadas a existência ou não de erros sistemáticos (tendência) a partir do teste t Student, uma vez que a amostra avaliada

é menor do que 30 pontos. Posteriormente, a precisão dos pontos foi analisada por meio do teste Qui-Quadrado.

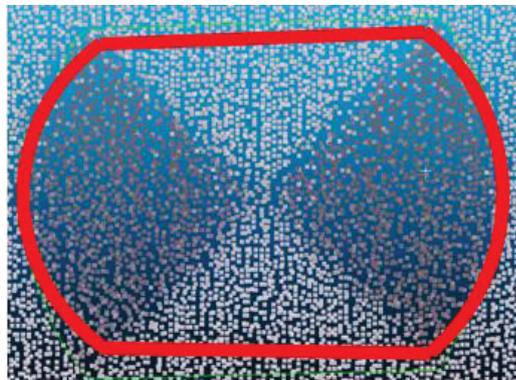
Neste trabalho, avaliaram-se as discrepâncias planimétricas ou 2D (resultante das coordenadas X e Y) e as discrepâncias 3D. Todos os testes foram bilaterais, baseados em um nível de confiança de 95%.

Figura 2.2.9 - Coleta das coordenadas do ponto próximo ao centro do alvo



Fonte: Os autores (2022).

Figura 2.2.10 - Segmentação dos pontos contidos no alvo



Fonte: Os autores (2022).

2.2.6 Teste t Student

Considera-se que a amostra está livre de tendências quando a média das discrepâncias (μ_{Δ_x}) podem ser consideradas iguais a zero. Sendo assim, as hipóteses a serem avaliadas, segundo Galo e Camargo (1994) e Silva e Schuler (2015), são apresentadas nas Equações (2.1) e (2.2).

$$H_0: \mu_{\Delta_x} = 0 \quad (2.1)$$

$$H_1: \mu_{\Delta_x} \neq 0 \quad (2.2)$$

A média das discrepâncias 2D e 3D, entre as grandezas obtidas a partir do Laser e as dos pontos de controle, podem ser estimadas conforme as Equações 3, 4 e 5 (MERCHANT, 1982).

$$\Delta X_i = X_i^L - X_i^C, \Delta Y_i = Y_i^L - Y_i^C, \Delta Z_i = Z_i^L - Z_i^C \quad (2.3)$$

$$\Delta 2D_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2}, \Delta 3D_i = \sqrt{\Delta 2D_i^2 + \Delta Z_i^2} \quad (2.4)$$

$$\mu_{\Delta_{2D}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta 2D_i, \mu_{\Delta_{3D}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta 3D_i \quad (2.5)$$

onde X_i^C, Y_i^C e Z_i^C são as coordenadas X, Y e Z dos pontos de controle e X_i^L, Y_i^L e Z_i^L são as coordenadas X, Y e Z obtidas através do *Laser Scanner*; $\Delta 2D_i$ e $\Delta 3D_i$ são as resultantes 2D e 3D das discrepâncias, respectivamente; $\mu_{\Delta_{2D}}$ e $\mu_{\Delta_{3D}}$ são as médias das discrepâncias 2D e 3D, respectivamente.

Os desvios-padrão das amostras de discrepâncias dos pontos testados (S_X) é calculada pelas Equações (2.6) e (2.7) (MERCHANT, 1982).

$$S_{2D} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta 2D_i - \mu_{\Delta_{2D}})^2 \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

$$S_{3D} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta 3D_i - \mu_{\Delta_{3D}})^2 \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

Admitindo-se a normalidade da amostra, o teste para a verificação da existência de tendências, para o nível de significância de 5% é feito comparando-se a estatística teórica tabelada ($t_{n-1, \alpha/2}$) com a estatística calculada (MERCHANT, 1982), conforme a o valor t dado pela Equações 8 e 9.

$$t_{2D} = \frac{1}{S_{2D}} (\mu_{\Delta_{2D}}) \sqrt{n}, \quad t_{3D} = \frac{1}{S_{3D}} (\mu_{\Delta_{3D}}) \sqrt{n} \quad (2.8)$$

Se $|t_{2D}| \leq t_{n-1,\alpha/2}$ ou $|t_{3D}| \leq t_{n-1,\alpha/2}$, logo aceita-se a hipótese nula, sendo as discrepâncias determinadas consideradas estatisticamente iguais a zero e isentas de tendência.

2.2.7 Teste Qui-Quadrado

Aplica-se o teste Qui-Quadrado para a avaliação das precisões de coordenadas, de acordo com os valores de tolerância estipulados pelo avaliador (SANTOS, 2010). Para Galo e Camargo (1994), esta análise pode ser feita pela comparação entre o desvio-padrão das discrepâncias encontradas (σ_{2D} e σ_{3D}) e o erro-padrão esperado. Neste trabalho o erro-padrão definido corresponde ao desvio-padrão nominal do equipamento (σ_n). Assim, as hipóteses de teste foram elaboradas conforme o explicitado pelas Equações 9 e 10, onde as amostras foram consideradas precisas se as variâncias das discrepâncias (σ_{2D}^2 e σ_{3D}^2) fossem estatisticamente iguais à tolerância estabelecida (σ_n^2).

$$\begin{cases} H_0: \sigma_{2D}^2 = \sigma_n^2 \\ H_1: \sigma_{2D}^2 > \sigma_n^2 \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} H_0: \sigma_{3D}^2 = \sigma_n^2 \\ H_1: \sigma_{3D}^2 > \sigma_n^2 \end{cases} \quad (2.10)$$

O teste de precisão para os dados levantados é feito comparando-se a estatística teórica ($\chi^2_{n-1,\alpha}$) com a estatística da amostra (Equação (2.11) e (2.12)).

$$\chi^2_{2D} = \left(\frac{n-1}{\sigma_n^2} \right) \sigma_{2D}^2 \quad (2.11)$$

$$\chi^2_{3D} = \left(\frac{n-1}{\sigma_n^2} \right) \sigma_{3D}^2 \quad (2.12)$$

Merchant (1982) buscou analisar a precisão da componente 2D por meio das coordenadas X e Y. Adaptando-se à abordagem de Merchant (1982), neste trabalho a investigação visou também a componente 3D, adicionando-se a coordenada Z na avaliação. Assim, se as relações $\chi^2_{2D} \leq \chi^2_{n-1,\alpha}$ ou $\chi^2_{3D} \leq \chi^2_{n-1,\alpha}$ fossem atendidas, as

amostras testadas obedeceriam ao padrão especificado de precisão, ou seja, aceita-se a hipótese nula a um nível de significância de 5%.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As varreduras *laser* resultaram em seis nuvens primárias, três referentes ao levantamento 1 com alta densidade, totalizando 210 milhões de pontos, e outras três para o levantamento 2 com baixa densidade, contendo 80 milhões de pontos com coordenadas tridimensionais.

Os registros manuais entre as nuvens de pontos foram realizados no *Cyclone*. No levantamento 1, a sobreposição média entre as nuvens foi de 65%, com erro médio de 0,005 m. Para o levantamento 2, a sobreposição média foi de 50% e o erro médio de 0,006 m. Ainda na mesma plataforma, efetuou-se o georreferenciamento das nuvens por meio da detecção visual dos 10 alvos (pontos de controle). Para os levantamentos 1 e 2 os erros médios resultantes foram de 0,002 m e 0,005 m, respectivamente. Diante destes resultados prévios, observou-se que o modo de levantamento, ou seja, a densidade das nuvens de pontos definida para o levantamento, impacta nos resultados das atividades de pós-processamento.

Após o registro e o georreferenciamento, as nuvens foram exportadas em formato *.PTS. Em seguida, cada levantamento foi importado no *software CloudCompare*, onde foram realizadas as segmentações dos alvos e as leituras, a fim de serem determinadas as coordenadas respectivas aos centros, comparando-as aos valores mensurados dos pontos de verificação coletados com a estação total.

Nas Tabela 2.3-1 e Tabela 2.3-2 são apresentadas as discrepâncias encontradas nas Amostras 1 e 2 dos levantamentos 1 e 2, respectivamente. Estas discrepâncias estão relacionadas às diferenças entre as leituras diretas (do ponto mais próximo) dos centros dos alvos na nuvem de pontos e os valores dos pontos de verificação, mensurados pela estação total. Nas Tabela 2.3-3 e Tabela 2.3-4 são indicados os resultados das comparações entre coordenadas referentes às médias dos pontos contidos nos alvos (Amostras 3 e 4). Por fim, nas Tabela 2.3-5 e Tabela 2.3-6 são demonstradas as discrepâncias determinadas pelas medianas das amostras contidas nos alvos (Amostras 5 e 6).

Tabela 2.3-1 - Amostra 1 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação por leitura direta (Levantamento 1)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0025	0,0026
2	0,0042	0,0054
3	0,0042	0,0047
4	0,0076	0,0079
5	0,0047	0,0048
6	0,0065	0,0065
7	0,0044	0,0044
8	0,0011	0,0018
9	0,0031	0,0031
10	0,0021	0,0026
11	0,0014	0,0014

Fonte: Os autores (2022).

Tabela 2.3-2 - Amostra 2 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação por leitura direta (Levantamento 2)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0075	0,0077
2	0,0034	0,0034
3	0,0082	0,0087
4	0,0055	0,0142
5	0,0054	0,0058
6	0,0048	0,0067
7	0,0142	0,0155
8	0,0108	0,0259
9	0,0035	0,0181
10	0,0081	0,0126
11	0,0072	0,0079

Fonte: Os autores (2022).

Tabela 2.3-3 - Amostra 3 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela média dos pontos nos alvos (Levantamento 1)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0025	0,0031
2	0,0050	0,0070
3	0,0048	0,0048
4	0,0032	0,0034
5	0,0047	0,0050
6	0,0045	0,0048
7	0,0023	0,0028
8	0,0014	0,0015
9	0,0028	0,0037

10	0,0016	0,0021
11	0,0033	0,0040

Fonte: Os autores (2022).

Tabela 2.3-4 - Amostra 4 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela média dos pontos nos alvos (Levantamento 2)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0043	0,0046
2	0,0046	0,0046
3	0,0049	0,0133
4	0,0040	0,0113
5	0,0031	0,0111
6	0,0015	0,0015
7	0,0030	0,0142
8	0,0013	0,0022
9	0,0030	0,0058
10	0,0032	0,0125
11	0,0061	0,0113

Fonte: Os autores (2022).

Tabela 2.3-5 - Amostra 5 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela mediana dos pontos nos alvos (Levantamento 1)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0026	0,0030
2	0,0061	0,0088
3	0,0051	0,0054
4	0,0036	0,0038
5	0,0053	0,0057
6	0,0043	0,0046
7	0,0041	0,0043
8	0,0022	0,0023
9	0,0045	0,0051
10	0,0027	0,0030
11	0,0016	0,0021

Fonte: Os autores (2022).

Tabela 2.3-6 - Amostra 6 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela mediana dos pontos nos alvos (Levantamento 2)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0067	0,0133
2	0,0065	0,0066
3	0,0033	0,0222
4	0,0042	0,0118

5	0,0039	0,0113
6	0,0033	0,0033
7	0,0037	0,0090
8	0,0081	0,0083
9	0,0040	0,0055
10	0,0040	0,0093
11	0,0066	0,0099

Fonte: Os autores (2022).

Conforme observado nas discrepâncias acima, as amostras referentes ao levantamento 1 apresentaram valores de discrepância inferiores em relação ao levantamento 2. Isso indica que a maior densidade relacionada ao modo de levantamento 1, possibilitou um produto final com melhor qualidade posicional, de acordo com as amostras escolhidas, comparando às coordenadas homólogas mensuradas por um instrumento de melhor precisão nominal.

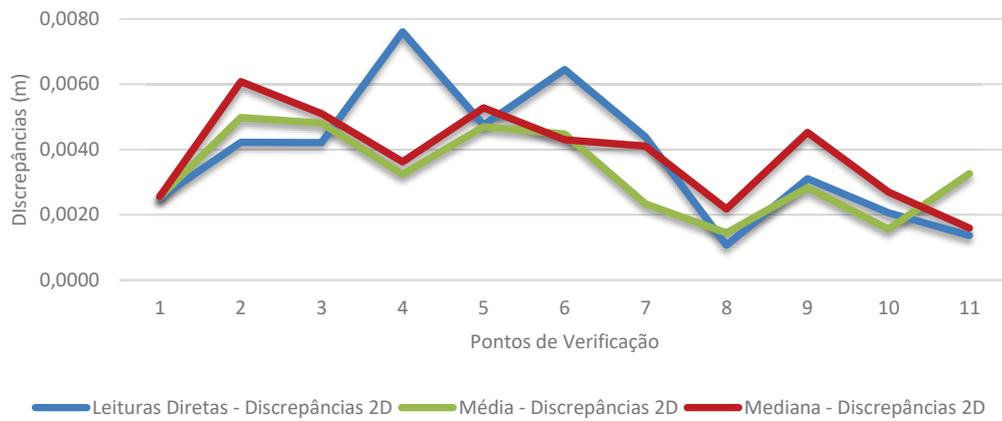
Para o levantamento 1, a maior discrepância para as avaliações 2D e 3D foram de 0,0076 m para leitura direta das coordenadas e 0,0088 m na estimativa das coordenadas por mediana, respectivamente. O levantamento 2 apresentou o valor de 0,0142 m para discrepância 2D e 0,0259 m no caso 3D, ambas nas análises de leituras diretas.

Sendo as discrepâncias para o levantamento 1 menores que 1 cm (entre 0,11 cm e 0,76 cm para o caso 2D ou 0,14 cm e 0,88 cm para o caso 3D), atenderiam ao valor estabelecido pelo Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (*International Council on Munuments and Sites* - ICOMOS) para os levantamentos rápidos e precisos. No caso dos levantamentos precisos, a escala de levantamento é de 1:50, sendo de 1 a 2 cm o intervalo de erro máximo permitido no posicionamento dos pontos, em consonância com o preconizado pelo ICOMOS.

Todavia, o levantamento 2 apresentou discrepância máxima de 1,42 cm para a avaliação 2D e de 2,59 cm para 3D, que seriam quase imperceptíveis nas escalas arquitetônicas de 1:100 e 1:50, onde o erro de grafismo estaria no intervalo de 1 a 3 cm (DOCCI; MAESTRI, 2008).

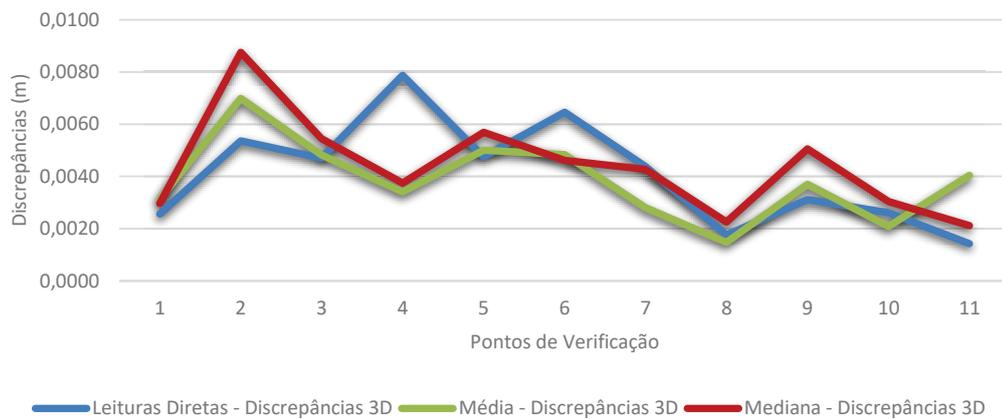
Para avaliar o comportamento das discrepâncias, de acordo com as abordagens adotadas para a determinação das coordenadas dos centros dos alvos, os gráficos nas Figura 2.3.1 e Figura 2.3.2 indicam os valores referentes ao levantamento 1 para os valores 2D e 3D. As Figura 2.3.3 e Figura 2.3.4 apresentam as discrepâncias 2D e 3D, respectivamente, referentes ao levantamento 2.

Figura 2.3.1 - Gráfico das discrepâncias 2D para a nuvem com alta densidade (levantamento 1)



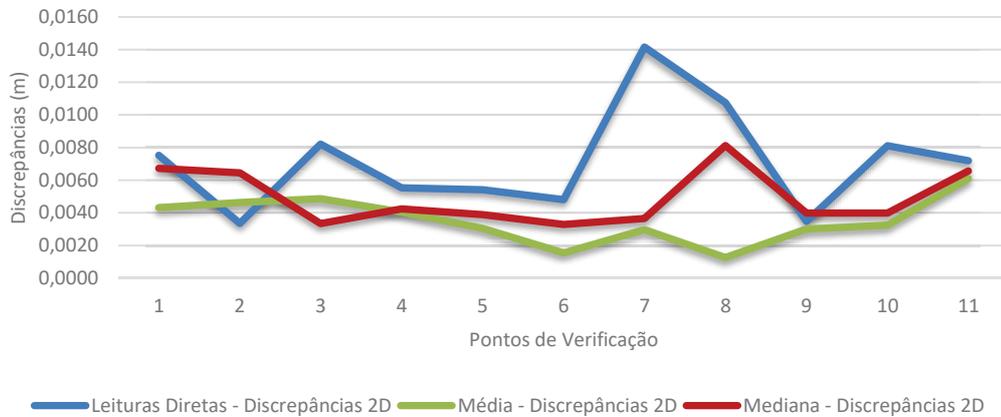
Fonte: Os autores (2022).

Figura 2.3.2 - Gráfico das discrepâncias 3D para a nuvem com alta densidade (levantamento 1)



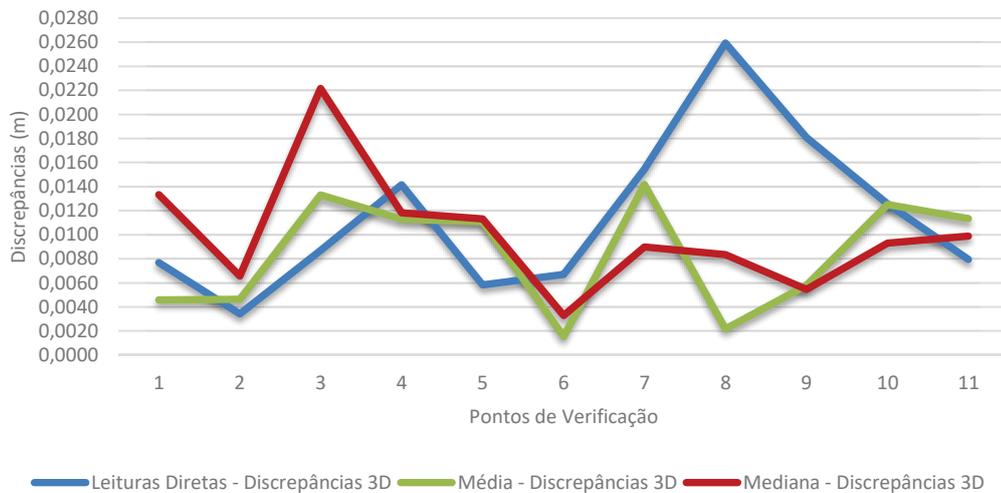
Fonte: Os autores (2022).

Figura 2.3.3 - Gráfico das discrepâncias 2D para a nuvem com baixa densidade (levantamento 2)



Fonte: Os autores (2022).

Figura 2.3.4 - Gráfico das discrepâncias 3D para a nuvem com baixa densidade (levantamento 2)



Fonte: Os autores (2022).

Conforme a figuras anteriores, observaram-se discrepâncias maiores nos gráficos referentes aos valores 3D, o que era esperado, uma vez que a resultante 3D é a soma vetorial da discrepância 2D mais a discrepância relacionada ao componente vertical. Entretanto, estas grandezas foram maiores para o levantamento 2, evidenciando que o modo de varredura, em baixa densidade, pode influenciar na degradação da qualidade posicional em relação às coordenadas verticais das nuvens de pontos.

Em relação aos procedimentos para a determinação das coordenadas, as leituras diretas, estimativas por médias e estimativas por medianas apresentaram valores próximos entre si para diversos pontos. Contudo, constatou-se que as leituras diretas apresentaram discrepâncias maiores em alguns pontos, como indicado na Figura 2.3.3 com 9 pontos, e Figura 2.3.4 com 6 pontos, ambos para o levantamento 2. Além disso, a determinação das coordenadas pela média apresentou menores discrepâncias na maioria dos pontos.

Em seguida, os testes estatísticos *t Student* e Qui-quadrado foram aplicados às amostras acima para análise de tendências e precisões. Na Tabela 2.3-7 são apresentadas as médias, desvios-padrão e as estatísticas utilizadas para testar as hipóteses elaboradas. O valor tabelado para a estatística de teste com 10 graus de liberdade e nível de significância de 5% foram de 2,2281 para $t_{n-1,\alpha/2}$ e de 18,307 para $\chi_{n-1,\alpha}^2$.

Conforme a Tabela 2.3-7, todas as estatísticas calculadas para a avaliação de tendência apresentaram valores superiores ao limite estabelecido pela estatística tabelada. Sendo assim, a hipótese nula de não tendenciosidade das amostras foi rejeitada a um nível de significância 5% e 10 graus de liberdade.

A tendência detectada nas amostras testadas aponta para a possível existência de erros sistemáticos nos levantamentos realizados. Tais erros podem ter como origem tanto os parâmetros ambientais, o método do levantamento ou imperfeições instrumentais. Considerando o panorama de realização dos levantamentos, os resultados apreciados apontam para a existência de erros de fontes instrumentais. Neste caso, reforça-se a necessidade da execução dos processos de verificação e calibração do LST, visando detecção e eliminação dos erros sistemáticos. Outra opção para o caso de dados já levantados seria a modelagem e consecutiva correção dos erros sistemáticos nas amostras.

Tabela 2.3-7 - Resultados dos parâmetros dos testes estatísticos aplicados às amostras de verificação

Amostras	Parâmetros Estatísticos	2D	Tendencioso	Preciso	3D	Tendencioso	Preciso
Amostra 1	μ_{Δ} (m)	0,0038	SIM	SIM	0,0041	SIM	SIM
	S_{Δ} (m)	0,0020			0,0020		
	$t_{n-1,\alpha/2}$	6,1717			6,7539		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	1,6643			1,6160		
Amostra 2	μ_{Δ} (m)	0,0071	SIM	SIM	0,0115	SIM	SIM

	S_{Δ} (m)	0,0032			0,0066		
	$t_{n-1,\alpha/2}$	7,3666			5,8094		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	0,2582			1,0770		
Amostra 3	μ_{Δ} (m)	0,0033			0,0038		
	S_{Δ} (m)	0,0013	SIM	SIM	0,0015	SIM	SIM
	$t_{n-1,\alpha/2}$	8,4714			8,2871		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	0,6643			0,9481		
Amostra 4	μ_{Δ} (m)	0,0035			0,0084		
	S_{Δ} (m)	0,0014	SIM	SIM	0,0047	SIM	SIM
	$t_{n-1,\alpha/2}$	8,2168			5,9477		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	0,0513			0,5486		
Amostra 5	μ_{Δ} (m)	0,0038			0,0044		
	S_{Δ} (m)	0,0014	SIM	SIM	0,0019	SIM	SIM
	$t_{n-1,\alpha/2}$	8,9126			7,5898		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	0,8087			1,4519		
Amostra 6	μ_{Δ} (m)	0,0049			0,0100		
	S_{Δ} (m)	0,0017	SIM	SIM	0,0050	SIM	SIM
	$t_{n-1,\alpha/2}$	9,6645			6,7221		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	0,0716			0,6136		

Fonte: Os autores (2022).

De acordo com a Tabela 2.3-7, todos os valores calculados para $\chi_{n-1,\alpha}^2$ foram inferiores à estatística tabelada. Desta forma, os pontos coletados nas nuvens podem ser considerados estatisticamente precisos, ou seja, as coordenadas determinadas para os centros dos alvos apresentaram dispersões dentro do limite esperado, estabelecido pela precisão nominal do equipamento, independente da técnica de estimação da posição central do alvo pela nuvem de pontos.

Portanto, no panorama observado, cabe ressaltar que os dados adquiridos por varreduras com LST, assim como em outros métodos de levantamentos topográficos e geodésicos, os produtos derivados de tais práticas possuirão erros inevitavelmente. Este fato é reforçado por Gemael, Machado e Wandresen (2015), que definem estes erros como propriedades dos dados. Entretanto, destaca-se que a tolerância dos erros pode ser delimitada mutuamente com a finalidade do produto, ou seja, o produto elaborado em um levantamento será aceitável ou não conforme a qualidade posicional esperada para as atividades-fim.

2.4 CONCLUSÃO

A avaliação dos produtos derivado da varredura laser terrestre demonstrou resultados satisfatórios ao se considerar as precisões nominais indicadas. Trabalhando-se à curtas distâncias, os resultados quanto às precisões das amostras testadas apresentaram valor máximo de 2 mm para o levantamento de nuvens de pontos em alta densidade e de 6,6 mm para baixa densidade, indicando que os produtos obtidos atenderam às precisões nominais do LST BLK360, determinadas pelo fabricante em 5 mm para o primeiro caso, e 20 mm para o segundo caso.

Considerando a incerteza na extração das coordenadas extraídas dos alvos diretamente nas nuvens de pontos, observou-se que a estratégia do ajustamento dos dados contidos, para definir o ponto central, se apresentou como uma alternativa viável quanto à qualidade posicional. Neste quesito, destacou-se a proposta de obtenção das coordenadas dos centros dos alvos pela média, que forneceu discrepâncias 3D máximas de 7,0 mm para a nuvem de pontos com alta densidade, e 14,2 mm para a nuvem em baixa densidade. Tais valores são menores que os obtidos nas demais abordagens, sendo de 7,9 mm para leitura direta e 8,8 mm para mediana no primeiro levantamento, e 25,9 mm para leitura direta e 22,2 mm para mediana no segundo levantamento.

De acordo com o avaliado, ainda que a varredura com LST estivesse configurada no modo alta densidade e, com isso, a amostragem de pontos sobre o alvo favorecesse a determinação das coordenadas do centro, por um ponto direto da nuvem, ainda assim a qualidade posicional dos dados testados aumentaria ao se realizar o ajustamento do conjunto de pontos contido no alvo, para a determinação do ponto central (média e mediana).

Estes resultados fomentam a viabilidade da utilização do equipamento testado tanto para levantamento topográficos, quanto para trabalhos arquitetônicos, como reconstruções bidimensionais ou tridimensionais de prédios históricos, entre outras atividades em que se faz necessária a aquisição de dados com alta qualidade posicional, dentro da precisão obtida. A metodologia utilizada também se mostrou adequada para os propósitos estabelecidos.

REFERÊNCIAS

- ARYAN, A.; BOSCHÉ, F.; TANG, P. Planning for terrestrial laser scanning in construction: a review. **Automation in Construction**, v. 125, p. 103551, May 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103551>
- BORGES, P. A. F.; FONSECA JUNIOR, E. S.; CINTRA, J. P.; TAVARES JUNIOR, J. B. Avaliação da precisão posicional de um Sistema Laser Scanner Terrestre AM-CW a partir de uma placa de esferas 3D. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 70, n. 3. p. 906-931, jul./ set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv70n3-45706>
- CANUTO, C. L.; MOURA, L. R.; SALGADO, M. S. Tecnologias digitais e preservação do patrimônio arquitetônico: explorando alternativas. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 7, n. 4, p. 252-264, 31 dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v7i4.8647456>.
- CANUTO, C. L.; SALGADO, M. S. Modelo BIM do Palácio Gustavo Capanema 1937-1945. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 15, n. 1, p. 101-116, 17 jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.11606/gtp.v15i1.152823>.
- CHECCUCCI, E. S. Teses e dissertações brasileiras sobre BIM: uma análise do período de 2013 a 2018. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. 1-17, 26 fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8653708>.
- CINTRA, J. P.; GONÇALVES, R. Aplicações das tecnologias Laser Scan e aerofotogrametria por drone para museus. **Anais do Museu Paulista**, São Paulo, v. 27, p. 1-28. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1982-02672019v27e25d1>.
- COGIMA, C. K.; NASCIMENTO, R. V.C.; PAIVA, P. V.V.; CARVALHO, M. A.G.; DEZEN-KEMPTER, E. Scan-to-HBIM aplicado à igreja da Pampulha de Oscar Niemeyer. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 15, n. 1, p. 117-134, 17 jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.11606/gtp.v15i1.152828>.
- DINIS, F. M.; SANHUDO, L.; MARTINS, J. P.; RAMOS, N. M. M. Improving project communication in the architecture, engineering and construction industry: coupling virtual reality and laser scanning. **Journal of Building Engineering**, v. 30, July. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101287>.
- DOCCI, M.; MAESTRI, D. **Manuale di Rivelamento architettonico e Urbano**. 10. ed. Bari: Giuseppe Laterza, 2008. 364 p.
- FAGGION, P. L. **Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório**. 2001. 134 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- FUENTES SANTIBAÑEZ, S. A. **Avaliação da influência do modelo de ajustamento de observações e da densidade de pontos laser scanner terrestre para a representação paramétrica de superfícies planas**. 2010, 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em:

https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/25575/Dissert.%20Sebastian_.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 20 jan. 2020.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de carta. *In.*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO - COBRAC, 1., Florianópolis, 1994. **Anais** [...]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações**: aplicações geodésicas. 2. ed. Curitiba: Ed. UFPR. 2015. 428 p. (Série Pesquisa, n. 281).

GROSSKOPF, G. G.; HERDEN, Y. S.; SILVA, R. F. T.; MARCHIORI, F. F. A fotografia 360 graus como ferramenta de suporte à modelagem de *as built*. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019021, 28 maio 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8653839>.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias, 2012. 94 p. Disponível em: https://metrologia.org.br/wpsite/wp-content/uploads/2021/02/vim_2012.pdf. Acesso em: 20 jan. 2020.

JAAFAR, H. A.; MENG, X.; SOWTER, A. Terrestrial laser scanner error quantification for the purpose of monitoring. **Survey Review**, v. 50, n. 360, p. 232-248, 7 Mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00396265.2016.1259721>

LEICA GEOSYSTEMS (Brasil). **Captura de realidade na construção e engenharia**. Curitiba: Leica Geosystems, 2020. Disponível em: https://leica-geosystems.com/pt-br/about-us/content-features/reality-capture-for-construction-and-engineering?&utm_medium=marketingemail&utm_source=google&utm_campaign=&utm_content=Email2. Acesso em: 20 maio 2020.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica BLK360**: Manual do Usuário. 2. ed. Curitiba: Leica Geosystems, 2018.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica TS15 user manual**. Heerbrugg: Leica Geosystems, 2015.

MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. *In.*: AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING, 42., 1982, Falls Church. **Proceedings** [...]. Gaithersburg: ACSM, 1982. v. 1, p. 222-231.

SANTOS, A. P. **Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais com o uso da estatística espacial**. 2010, 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Viçosa, Viçosa, 2010. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3733/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2020.

SCHULZ, T. **Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy**. 2007. 172 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Technical University of Berlin, Berlin, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005368245>.

SHAN, J.; TOTH, C. K. (ed.). **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2018. 654 p.

SILVA, M. V.; SCHULER, C. A. B. Avaliação de dados planimétricos LIDAR para áreas urbanas: Recife/PE. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 67, n. 6, p. 1103-1117, set./out. 2015. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44631/23647>. Acesso em: 20 jan. 2020.

STAIGER, Rudolf. The geometrical quality of terrestrial laser scanner (TLS). *In*: FIG WORKING WEEK, 8., 2005, Cairo. **Proceedings [...]**. 2005. Reston: Global Spatial Data Infrastructure, 2005.

VOSSelman, G.; MAAS, H. **Airborne and Terrestrial Laser Scanning**. Dunbeath: Whittles Publishing, 2010. 337 p.

WALTON, Gabriel; DELALOYE, Danielle; DIEDERICHS, Mark S. Development of an elliptical fitting algorithm to improve change detection capabilities with applications for deformation monitoring in circular tunnels and shafts. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 43, p.336-349, July. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.014>

WUTKE, J. D. **Métodos para avaliação de um Sistema Laser Scanner Terrestre**. 2006. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/5958/disserta%C3%A7%C3%A3o_JulianaWutke.pdf?sequence=1. Acesso em: 20 jan. 2020.

WUTKE, J. D.; CENTENO, J. A. S. Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a laser terrestres. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 13, n. 1, p.151-164, jan./jun. 2007.

Capítulo 3

DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO PARA VERIFICAÇÃO DA VERTICALIDADE DE ESTRUTURAS POR NUVEM DE PONTOS

A construção de estruturas verticais como caixas d'água e torre, por exemplo, é comum na sociedade atual. Paralelamente, novos equipamentos e metodologias para a realização de as built e monitoramento destas construções vêm sendo investigados, visando a obtenção de informações como possíveis deslocamentos horizontais e verticais. Tais informações viabilizam a determinação de elementos que permitam aferir sua forma e checar a verticalidade caixas d'água. Dentro desse contexto, destaca-se o uso de varreduras por Laser Scanner Terrestre (LST) como método de levantamento que proporciona determinação superabundante de pontos (nuvem de pontos) sobre o objeto monitorado. Esta pesquisa investigou o uso das nuvens de pontos para determinação da verticalidade de uma caixa d'água de 25 m. Realizando-se a filtragem das nuvens de pontos e adotando-se a segmentação transversal, as observações foram ajustadas pelo modelo combinado do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Como resultado, foram determinadas as coordenadas dos centros das circunferências pertencentes a cada segmento. Com base nesses parâmetros, constatou-se a não verticalidade da estrutura, porém, com deslocamentos horizontais inferiores à 0,02 m.

3.1 INTRODUÇÃO

Estruturas verticais como torres, chaminés, mastros e reservatórios d'água são caracterizadas pelas suas alturas excederem em múltiplas vezes a sua largura máxima. De acordo com Widerski e Kurałowicz (2009), nos últimos anos, observou-se o crescimento de projetos que visam a construção desse conjunto de estruturas. Segundo os autores, um exemplo disso é a ampliação de usinas eólicas terrestres (*onshore*) e aquáticas (*offshore*) em todo o mundo.

O aumento de empreendimentos residências em condomínios vem tornando cada vez mais comum a presença de reservatórios d'água nos centros urbanos. Corroborando a isso, as crises hídricas frequentes vêm impulsionando a busca pelo armazenamento de água potável e não potável. De acordo com Kotari et al., (2019), estima-se que o consumo de água amente em 40% até o ano de 2025, o que incentivará ações como o armazenamento de água da chuva.

Paralelamente à ampliação destes projetos estão os avanços tecnológicos e desenvolvimento metodológico que buscam avaliar o comportamento destas estruturas ao longo de sua vida útil, principalmente em momentos de intervenções nas estruturas. O monitoramento periódico, nestes casos, evitaria ocorrências como o

desabamento em 2020 de uma caixa d'água em Diadema, na Grande São Paulo, causando danos materiais e paralizações de serviços (G1, 2020).

Irughe-Ehigiator e Ehiorobo (2021) destacam o Laser Scanner Terrestre (LST) como uma ferramenta útil para a captura de informações e o monitoramento de estruturas de engenharia. De acordo com os autores, a varredura por LST possibilitam observar alterações de forma contínua, quando comparado a outros métodos de levantamento topográfico.

Entretanto, considerando que a aquisição das nuvens de pontos caracteriza-se como um processo automatizado, erros na determinação dos dados são inevitáveis (MARJETIC, 2018). Tais erros, também definidos como propriedades das observações (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015), resultam na existência de pontos que representariam a estrutura, mas encontra-se fora da superfície levantada. Estes erros resultam tanto de imperfeições instrumentais quanto ambientais como, por exemplo, erros na mensuração da distância em o LST e a superfície levantada. Isto pode ocasionar em distorções nas informações extraídas dos dados, como na obtenção de normais de superfície ou falhas no registro da nuvem de pontos (RUSU et al., 2008).

Portanto, a avaliação dos pontos obtidos torna-se etapa importante para a prévia extração de informação das nuvens de pontos. Uma forma de analisar tais pontos baseia-se nas suas propriedades geométricas, as quais podem ser adquiridas em termos de uma vizinhança local, ou seja, considerando um conjunto de pontos em torno de um ponto de consulta. Uma abordagem é a procura dos vizinhos mais próximos usando distância euclidiana tridimensionais (3D) como métrica (RUSU et al., 2008).

A remoção ou filtragem de uma nuvem de pontos pode ser realizada manualmente, uma vez que os dados manipulados sejam em torno de centenas de pontos. Entretanto, habitualmente, em trabalho de monitoramento por varredura laser, o volume de dados pode corresponder a centenas de milhões de pontos. Nestes casos exigem-se métodos automáticos como algoritmos de filtragem.

A partir da elaboração de metodologias para minimização desses erros, vem se ampliando o número de pesquisas que visam investigar a potencialidade do levantamento por varredura laser em trabalhos de monitoramento de estrutura, como: eclusas marítimas (LINDENBERGH; PFEIFER, 2005), pontes (LOVAS et al., 2008), barragens (LENARTOVICZ, 2013), túneis (WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS,

2014), estruturas históricas (JAAFAR; MENG; SOWTER, 2016), entre outras. Mutuamente, ampliaram-se as pesquisas destinadas a avaliar o estado das estruturas verticais (MARJETIC, 2018; IRUGHE-EHIGIATOR; EHIOROBO, 2021; GUMILAR *et al.* 2021).

No âmbito do monitoramento de estruturas verticais, Widerski e Kurałowicz (2009) indicam a verticalidade da linha que contém os eixos geométricos da estrutura como uma das condições básicas que estas construções devem atender.

Neste sentido, a determinação dos centros das circunferências, contidas em múltiplos segmentos transversais, poderia delinear de forma contínua a verticalidade ao longo de toda a estrutura. Adicionalmente, nos casos de estruturas cilíndricas, como reservatórios, fenômenos ocasionados pelo movimento da estrutura e/ou do solos que possam interferir na geometria da construção, como dilatações, fissuras ou orifícios, poderiam ocasionar desvios no traçado da linha pelo deslocamento que podem promover no respectivo centro da circunferência presente na região da deformação.

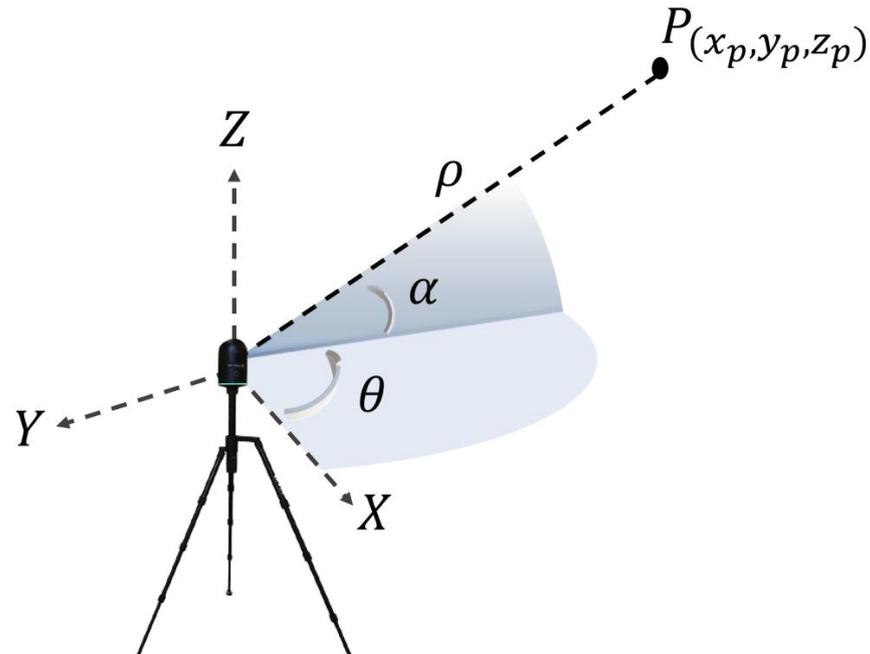
Assim, com base nos avanços tecnológicos relacionados ao funcionamento dos LST e nas estruturas dos produtos obtidos por meio de varredura laser, este artigo visou o desenvolvimento de uma metodologia para a detecção da inclinação ou não verticalidade de construções cilíndricas verticais, fundamentada na parametrização das nuvens de pontos para a determinação da linha do eixo vertical da estrutura.

3.2 REVISÃO DE LITERATURA

3.2.1 LASER SCANNER TERRESTRE

O laser scanner caracteriza-se como um equipamento de mensuração capaz de fornecer um conjunto de dados pontuais a partir da leitura de ângulos verticais de altura (α), direções horizontais (θ) e distâncias inclinadas (ρ). Tal conjunto de dados obtidos pelas mensurações ou varreduras laser é denominado por nuvens de pontos. Em seu produto final, cada ponto (P) apresenta coordenadas cartesianas x , y e z , as quais representam uma amostra da superfície levantada pelo equipamento, conforme a Figura 3.2.1.

Figura 3.2.1 - Sistema de varredura laser terrestre



FONTE: O autor (2022).

A transformação das leituras de um sistema polar para o sistema cartesiano é expressa nas equações (3.1), (3.2) e (3.3) (OGUNDARE, 2016):

$$x = \rho \cos \theta \cos \alpha \quad (3.1)$$

$$y = \rho \sin \theta \cos \alpha \quad (3.2)$$

$$z = \rho \sin \alpha \quad (3.3)$$

Atualmente, os LST disponíveis podem ser classificados conforme as técnicas empregadas para o levantamento das nuvens de pontos. De acordo com Petrie e Toth (2018) e Wutke (2006), neste quesito os LST são divididos entre estático (fixo) e dinâmico, sendo este segundo caracterizado pela aquisição de dados simultânea ao movimento do equipamento.

Em relação ao campo de varredura, Staiger (2003) classifica os LST em scanners do tipo panorâmico, quando o campo de varredura laser (Field of View - FoV) consiste em uma cobertura angular de 360° na horizontal e mínima de 180° na vertical; scanners híbridos se caracterizam por operarem com a rotação completa em um eixo e inclinação limitada em outro, sendo comumente a cobertura angular horizontal de 360° e vertical geralmente de 50° à 60°; scanners do tipo câmera possuem FoV faixa angular de varredura limitada, semelhante aos quadros de câmeras convencionais.

Vosselman e Maas (2010) classificam as técnicas de medição em: *time-of-flight* (tempo de voo), Diferença de Fase ou Triangulação. No primeiro método é considerado o tempo médio que um pulso laser leva desde a emissão até a interação do mesmo com a superfície de interesse e o seu retorno ao LST.

De acordo com Ogundare (2016), os equipamentos que utilizam o método da diferença de fase apresentam taxas de aquisição de dados menor e precisão superior em relação ao método *time-of-flight*, mas limitam-se quanto a distância de operação (DIEDERICHS, 2014). Neste segundo método são calculadas as distâncias entre o equipamento e o objeto levantado por meio da diferença de fase e pela contagem do número de comprimentos de onda emitidos até o retorno do sinal.

O método de medição por triangulação implica na utilização mútua dos sensores *Charge-Coupled Device* (CCD), *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS) ou *Position Sensing Detector* (PSD), com o laser. As distâncias são calculadas por triangulações considerando o ângulo de saída (emissão) do feixe laser. A porção refletida sobre a superfície levantada retorna ao instrumento e, a partir disso, é determinada a distância entre o instrumento e a superfície refletora (LENARTOVICZ, 2013).

3.2.2 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS VERTICAIS

Widerski e Kurałowicz (2009) indicam que tanto as medições periódicas quanto o monitoramento constante de estruturas verticais devem incluir simultaneamente:

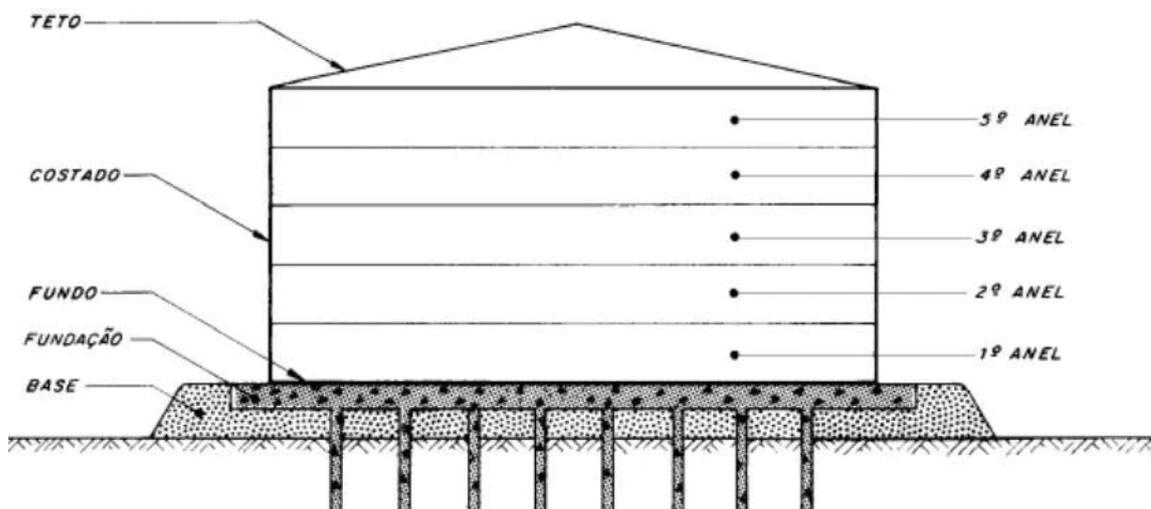
- medição topográfica na fundação ao redor do eixo da estrutura;
- medição de deslocamento do eixo vertical, incluindo inclinação e torção da estrutura.

No caso da investigação do eixo vertical, os autores indicam que os métodos a serem escolhidos dependem de fatores locais, como localização da estrutura e a visibilidade, e a precisão desejada. Dentre os métodos possíveis, encontram-se: nivelamento trigonométrico, levantamento fotogramétrico, sensores automáticos (inclinômetros, acelerômetros, níveis eletrônicos) e levantamentos por Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS).

Dentro do âmbito do monitoramento de estruturas verticais, Wang et al. (2010) apontam que um dos maiores desafios do comercio internacional petrolífero constitui

a determinação volumétrica de tanques verticais. Conforme ilustrado por Barros (2009) (Figura 3.2.2), nos tanques de armazenamento denomina-se por costado a parede lateral da construção, o qual é dividido em anéis. Com base nisso, Wang et al. (2010) propõem a estimativa do volume destas estruturas pelo levantamento de pontos na superfície interna por irradiação com estação total, determinando-se o raio para cada anel do costado.

Figura 3.2.2 – Principais componentes de um tanque de armazenamento



Fonte: Barros (2009).

Canto (2018) desenvolveu uma metodologia para o monitoramento geodésico em torres eólicas *onshore*. A partir dos métodos de nivelamento trigonométrico e método das bordas para interseção a vante e determinação do centro da torre. Foram avaliados os recalques da base, bem como o ângulo de deflexão e o diâmetro da torre na solda transversal, respectivamente. Com tal método, observou-se um ângulo de deflexão de $0^{\circ}2'39.22'' \pm 2.83''$ na direção Noroeste e diferença linear média de $0,0878 \pm 0,0078$ m na solda mais alta da torre eólica Gravata 02.

Canto e Seixas (2020) apresentaram a implantação de um sistema de referência e medição para o monitoramento de torres eólicas, com a materialização de marcos de concreto. Ademais, os autores descreveram a metodologia para o monitoramento investigar eventos de recalque da base e ângulos de deflexão da torre. Para a primeira análise, os autores descrevem o método de nivelamento geométrico de alto precisão com nível digital e, para a segunda, apresentam a determinação da

deflexão por meio do cálculo dos centros virtuais da torre métodos da irradiação tridimensional por estação total e medição de bordas.

3.2.3 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS POR VARREDURA LASER

Com base na finalidade dos projetos e nas propriedades dos LST, uma etapa relevante do processo de monitoramento é o planejamento das estações de varredura. Gonçalves e Veiga (2019) apresentaram o projeto para uma rede de monitoramento da barragem de uma usina hidrelétrica a partir das equações de propagação de erros e a precisão nominal do instrumento. Ponderando as restrições dos locais das estações de varredura, a resolução da nuvem, os ângulos de incidência e as distâncias entre o instrumento e a superfície mensurada, elegeu-se a rede de monitoramento que forneceu as precisões esperadas. Os autores apontaram que as incertezas dos pontos aumentam nas regiões de bordas da nuvem e indicaram como ideal, para o caso avaliado, a distância 20 m entre as estações da rede e entre o instrumento e o objeto levantado foi de 20 m.

Marjetic (2018) realizou a avaliação da verticalidade de duas chaminés de aproximadamente 35 m por meio da posição absoluta, baseada no modelo da estrutura no espaço 3D e no eixo vertical. O autor indica como posição absoluta o estado da estrutura no momento da tomada das medições, diferenciando-se da avaliação por meio das diferenças relativas na geometria da nuvem de pontos medidas em diferentes épocas. Com base nas propriedades vetoriais que descrevem o eixo do cilindro, o autor assumiu a estrutura como um corpo rígido, obtendo a inclinação de 04'35" e deslocamento no topo de 0,0834 m para a chaminé 1 e 03'55" e 0,0738 m para a chaminé 2.

Irughe-Ehigiator e Ehiorobo (2021) utilizaram do levantamento por varreduras por LST para escanear a superfície de um tanque de separação de gás com mais de 23 m. Foram realizadas quatro estações de varredura, com distâncias entre o LST e o objeto variando de 13,775 m a 20,944 m. Pelo modelo combinado do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), as nuvens de pontos foram parametrizadas, determinando-se o raio e as coordenadas do centro x e y da circunferência do tanque, com precisões de 4 mm, 5 mm e 7 mm, respectivamente. Adicionalmente, avaliou-se a não verticalidade da estrutura em 10 alturas distintas, obtendo-se deslocamentos no topo do tanque de até 18 mm.

Gumilar *et al.* (2021) avaliaram as condições de dois tanques, de aproximadamente 5,0 m de altura, baseado base em dados de varredura por LST. Os autores realizaram o registro e a filtragem dos dados. Em seguida, analisou-se o volume do tanque modelado a partir da nuvem de pontos em relação ao volume indicado no projeto da estrutura. Adicionalmente, calculou-se a verticalidade das estruturas pela inclinação nos tanques e os raios dos tanques. Os volumes do tanque I e do tanque II foram calculados apresentaram diferenças para o volume projetado de 0,24 m³ e 0,20 m³, respectivamente. As inclinações obtidas variaram entre 2 mm e 10 mm. Já as diferenças entre o raio projetado e o mensurado foi de 3,44 mm para o tanque I e 2,78 mm para o tanque II. Para os autores, os tanques podem ser considerados seguros de acordo com o preconizado pela norma API 650 (*American Petroleum Institute*).

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

Esse capítulo destina-se a descrição das etapas de desenvolvimento da pesquisa. A Figura 3.3.1 ilustra o fluxograma das etapas e os principais aspectos metodológicos. A primeira etapa contemplou a aquisição de dados sobre a estrutura, seguida do processamento, no qual foram aplicadas técnicas de registro e filtragem dos dados. Posteriormente se aplicou a segmentação dos dados, desenvolvida e programada. Tais dados foram parametrizados para a delineação da linha do eixo vertical.

Figura 3.3.1 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento da metodologia proposta Sistema de varredura laser terrestre



FONTE: O autor (2022).

Para realização da metodologia proposta, determinou-se como objeto de estudo uma caixa d'água, com formato próximo à um cilindro vertical. A estrutura possui aproximadamente 25 m de altura e 3,2 m de diâmetro. A caixa d'água está localizada no campus Jardim Botânico, da Universidade Federal do Paraná (Figura 3.3.2).

Figura 3.3.2 – Caixa d'água cilíndrica do campus Jardim Botânico



FONTE: O autor (2022).

3.3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS SOBRE A ESTRUTURA MONITORADA

O monitoramento estrutural requer planejamento para a definição das estações de varredura a serem realizadas em campo. Devido ao modo de operação do LST e determinação de coordenadas, há a ocorrência de erros inerentes às amostras adquiridas. Tais erros resultam de diferentes fatores como os efeitos dos parâmetros ambientais na mensuração de distância pelo laser, incerteza angular do equipamento na mensuração de ângulos verticais de emissão do pulso e obstáculos entre o equipamento e a superfície levantada que interferem na qualidade dos dados. Paralelamente, a dimensão do objeto de estudo exige a realização de mais de uma varredura, o que recai nos cuidados relativos à sobreposição entre pares de nuvens.

A escolha das posições do laser ponderou:

- o alcance máximo e mínimo do LST indicados no manual técnico;
- elementos como vegetações e construções que ocasionariam oclusões nos dados;

- a sobreposição entre pares de nuvens necessária para o registro.

Diante destes fatores e considerando as características da estrutura, foram realizadas duas campanhas de levantamento, diferenciadas pelas distâncias entre o LST e à superfície de estudo (Figura 3.3.3). Na primeira campanha efetuaram-se 6 varreduras com distâncias semelhantes de aproximadamente 10 m entre o LST e a base do reservatório (Levantamento 1). Obstruções como vegetação, irregularidades do relevo e construções inviabilizaram aquisição de nuvens com distâncias semelhantes na segunda campanha, na qual foram trabalhadas distâncias superiores à 30 m, resultando em 6 nuvens de pontos (Levantamento 2).

Figura 3.3.3 - Croquis da disposição das estações de varredura laser no Levantamento 1 e no Levantamento 2



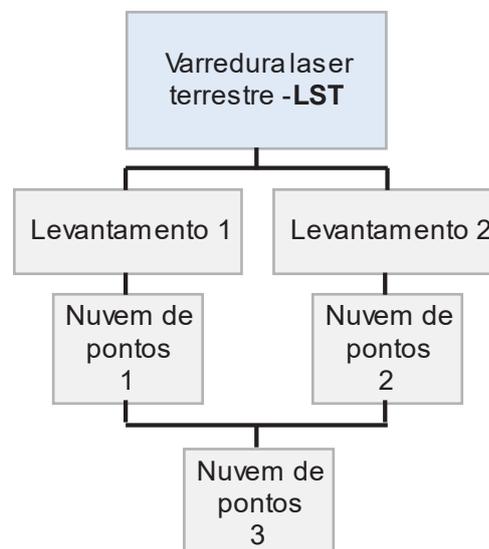
FONTE: O autor (2022).

A varredura laser foi realizada a partir do LST BLK360 do tipo panorâmico, com varredura do laser de 300° na vertical e 360° na horizontal. O equipamento possui uma unidade laser Classe 1, com comprimento da onda 830 nm, um prisma rotativo vertical em base rotativa horizontal e foi utilizado no modo alta densidade. Ao longo de cada escaneamento, a taxa de aquisição pode chegar a 360 mil pontos por

segundo, com alcance de varredura mínimo de superfícies de 60 cm e máximo de 60 m (LEICA GEOSYSTEMS, 2018).

Conforme diagrama de fluxo a seguir (Figura 3.3.4), a partir dos levantamentos realizados, foram elaborados três grupos de amostras sobre a estrutura. As nuvens de pontos 1 e 2 consistem nos produtos derivados dos levantamentos 1 e 2, respectivamente. A nuvem de pontos 3 resulta da união dos dados derivados de ambos os levantamentos. Estas configurações visaram avaliar os efeitos das disposições das estações de varredura sobre a aquisição de dados, bem como o aumento da amostragem.

Figura 3.3.4 – Composição de dados avaliados

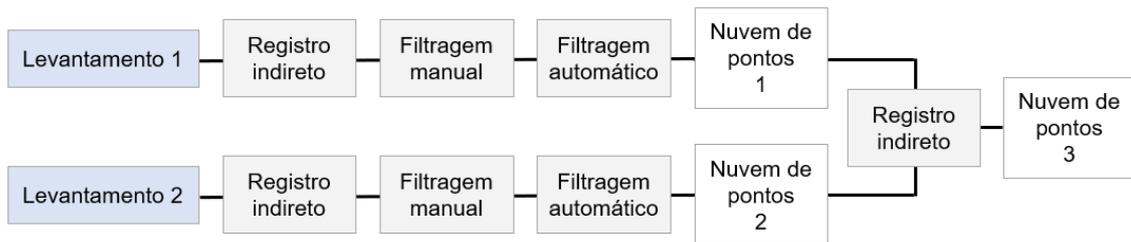


FONTE: O autor (2022).

3.3.2 PROCESSAMENTO DAS NUVENS DE PONTOS

A etapa do processamento constituiu o tratamento dos dados brutos a fim de que estes fossem utilizados para nas etapas de segmentação e parametrização (Figura 3.3.5). Sendo assim, executou-se o registro manual indireto das nuvens de pontos por meio do software Cyclone, da empresa Leica Geosystems. O registro indireto é definido por Van Genechten et al. (2008) e Ogundare (2016) como a união das varreduras utilizando recursos da própria superfície levantada, com alvos naturais ou artificiais que permitam estabelecer a relação entre as estações do laser.

Figura 3.3.5 – Etapas de processamento das nuvens de pontos

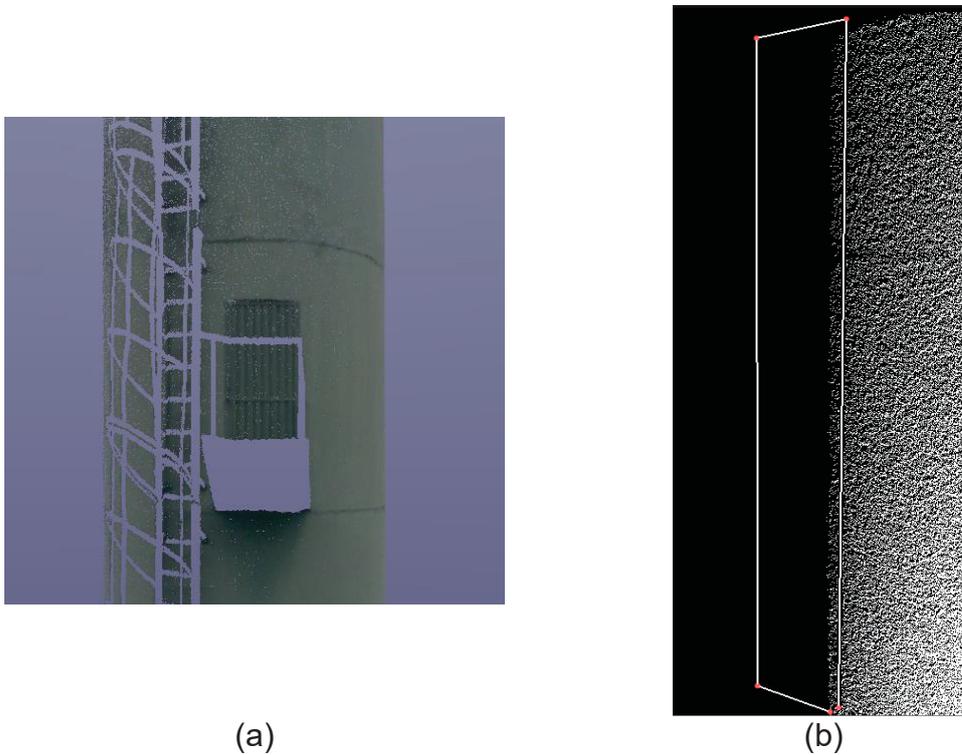


FONTE: O autor (2022).

Considerando que a aquisição de dados no modo de varredura é totalmente automatizada, é possível que alguns pontos presentes na nuvem não pertençam à superfície do objeto. Tal fato se deve à diferentes efeitos que interferem na varredura, como obstáculos ou elementos sobre superfície da estrutura. Estes pontos representariam erros grosseiros no processo de modelagem e precisariam ser removidos ou filtrados das nuvens de pontos (MARJETIC, 2018).

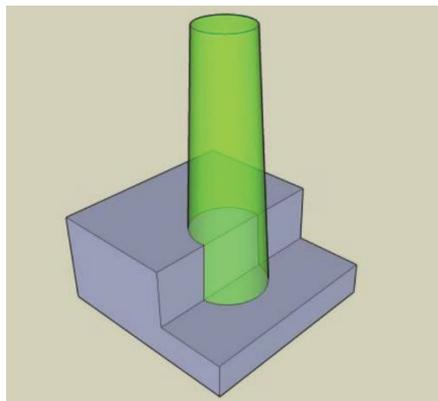
Desta forma, executou-se inicialmente a filtragem manual das nuvens 1 e 2, na qual foram excluídos objetos próximos à estrutura, como construções e vegetação. Além disso, excluíram-se pontos de objetos presentes na estrutura, como escadas e plataformas (Figura 3.3.6-a). Outra ocorrência sobre a varredura laser é o efeito de borda, no qual o feixe laser é dividido ao refletir parcialmente em estrutura, como em regiões de quina, por exemplo. Tal divisão do feixe promove deslocamentos artificiais nos pontos por ocasionar variações na distância inclinada mensurada (Figura 3.3.7). Considerando estes fatos, para cada estação de varredura, foram excluídos pontos na região próximas as extremidades da amostra de pontos sobre a caixa d'água (Figura 3.3.6-b), sem que houvesse perda significativa de pontos a fim de viabilizar a extração de informação da superfície do reservatório.

Figura 3.3.6 – Filtragem manual de pontos errôneo de elementos sobre a superfície (a) e em bordas (b)



FONTE: O autor (2022).

Figura 3.3.7 – Efeito de borda no feixe laser



Fonte: Adaptado de Van Genechten et al. (2008).

As nuvens de pontos foram salvas no formato *.pts e depois, pelo software Cloud Compare, convertidas para *.pcd. Adotou-se tal estratégia para diminuir o custo computacional na manipulação das nuvens de pontos em etapas posteriores, uma vez que arquivos em *.pts possuem tamanhos superiores a três vezes ao observado em arquivos homólogos salvos em *.pcd.

Após a filtragem manual e conversão para extensão *.pcd, realizou-se a filtragem automática das nuvens de pontos buscando investigar possíveis pontos afastados o suficiente dos demais que compõem a vizinhança, sendo assim, considerados como contendo erros grosseiros e/ou sistemáticos que descaracterizem a superfície da estrutura real. Para tal foi implementado um algoritmo de filtragem automática na linguagem Python (disponível no Apêndice A), utilizando as bibliotecas Numpy e Open3d.

Definiu-se a abordagem *Radius outlier removal*, na qual são excluídos os pontos cuja quantidade de pontos na vizinhança esteja abaixo de um limiar pré-estabelecido. Neste sentido, dois parâmetros foram ajustados para a aplicação do filtro (OPEN3D, 2022):

- *nb_points*, que permite escolher a quantidade mínima de pontos que a esfera deve conter;
- *radius*, que define o raio da esfera a ser utilizada para contar os vizinhos.

Conforme Rusu et al. (2008), o raio (r) é calculado pela média (μ) e o desvio-padrão (σ) das distâncias entre o ponto analisado e os vizinhos mais próximos:

$$r = \mu \pm \alpha \cdot \sigma \quad (3.4)$$

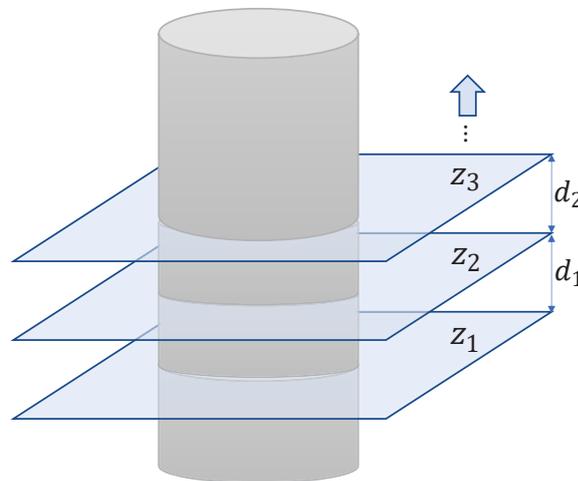
em que α representa o parâmetro *radius* definido na filtragem, ou seja, a quantidade de desvios-padrão considerado na determinação do raio. Rusu et al. (2008) recomendam a definição de 30 pontos para o número de vizinhos e $\alpha = 1$ para delimitação do raio, indicando que tais valores foram satisfatórios em seus experimentos, resultando na exclusão de aproximadamente 1%.

Entretanto, nesta pesquisa, realizou-se varreduras laser em ambiente externo com filtragem manual. Adicionalmente, a variação da altura da estrutura levantada ocasionou a variação da densidade da nuvem ao longo da caixa d'água. Por isso, optou-se por manter o número de vizinhos em 30, porém foi considerado $\alpha = 3$, uma vez que $\alpha = 1$ tornou a filtragem rigorosa e inviabilizou o cálculo do centro de circunferências no topo da estrutura.

3.3.3 SEGMENTAÇÃO TRANSVERSAL DA NUVEM DE PONTOS

A obtenção dos segmentos circulares que compõem a estrutura monitorada se deu pela segmentação ou fatiamento da estrutura ao longo do eixo vertical. Conforme a Figura 3.3.8, foram considerados planos horizontais ao longo da estrutura, separados por intervalos constantes pré-definidos. O algoritmo foi desenvolvido em linguagem Python (disponível no Apêndice B), utilizando as bibliotecas Numpy e Open3d.

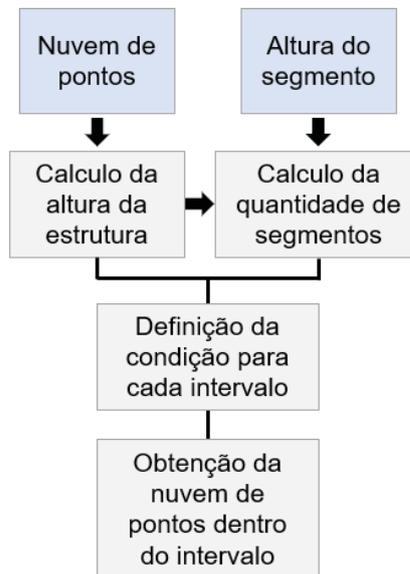
Figura 3.3.8 – Segmentação da estrutura ao longo do eixo vertical



Fonte: O autor (2022).

De posse das nuvens de pontos filtradas, construiu-se a função denominada *fatiar_nuvem*, a qual recebe o arquivo da nuvem de pontos a ser processada e o valor da distância desejada entre os planos (altura do segmento). Na Figura 3.3.9 são apresentadas as etapas de funcionamento da função elaborada.

Figura 3.3.9 – Etapas de funcionamento do algoritmo de segmentação da nuvem de pontos



Fonte: O autor (2022).

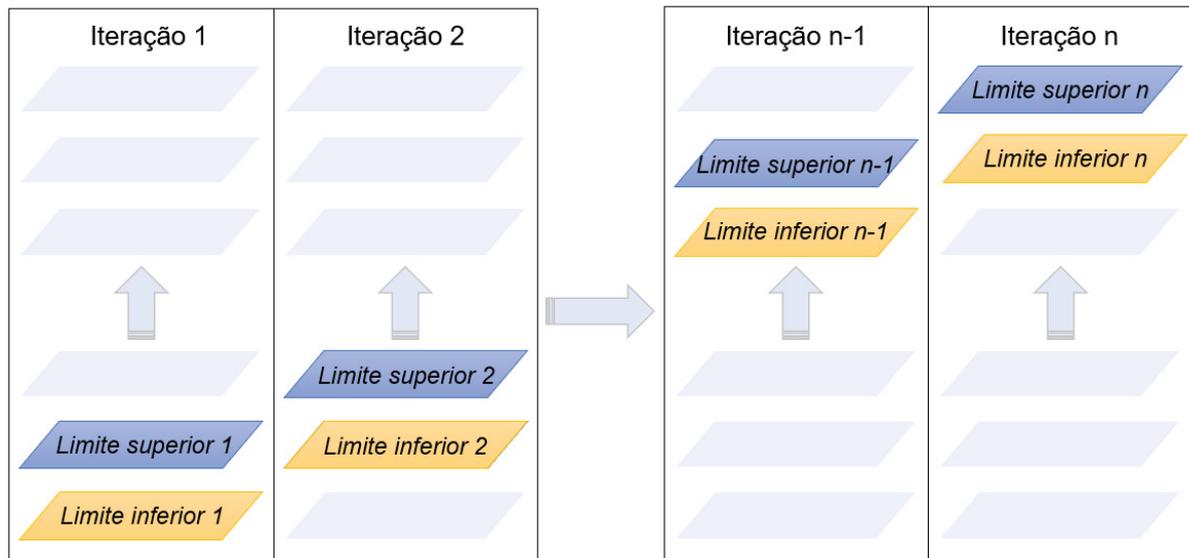
Inicialmente, importa-se a nuvem de pontos e define-se a altura de cada segmento. Visto que neste trabalho foram levantadas nuvens de pontos densas, a altura estipulada influencia na quantidade de pontos contidos em cada segmento. Conseqüentemente, aumenta a quantidade de pontos a serem utilizadas no ajustamento das observações posteriormente, impactando na dimensão das matrizes e aumentando o custo computacional para a resolução das equações normais.

Adicionalmente, em caso de deformações na estrutura, a dimensão dos intervalos pode influenciar a determinação dos centros de cada circunferência. Segmentos menores favorecem o deslocamento do centro determinado pela deformação na estrutura. Neste sentido, o intervalo para cada segmento foi definido em 0,01 m.

A etapa “Definição da condição para cada intervalo” estabelece os planos da segmentação, delimitando os limites inferior e superior para cada segmento. Conforme a Figura 3.3.10, a delimitação dos segmentos foi iniciada a partir do ponto com menor valor no eixo z, baseado no sistema de referência local criado no instante de realização das varreduras. Neste ponto, define-se o limite intervalo inferior e, somando-se a altura do segmento estipulada (0,01 m), determina-se o limite superior. Os pontos da nuvem importada que possuam coordenada z dentro deste intervalo,

pertence ao primeiro segmento. Este processo foi realizado de forma iterativa, sendo o limite superior o valor utilizado para o limite inferior no intervalo seguinte.

Figura 3.3.10 – Processo iterativo de estabelecimento dos limites inferior e superior



Fonte: O autor (2022).

Com isso, elaboraram-se nuvens de pontos para cada segmento. Considerando a altura da estrutura e o funcionamento do LST para a varredura laser, a quantidade de pontos em cada segmento tende a diminuir ao longo do eixo z. Para analisar este fator, foi contabilizada a quantidade de pontos existentes ao longo da estrutura.

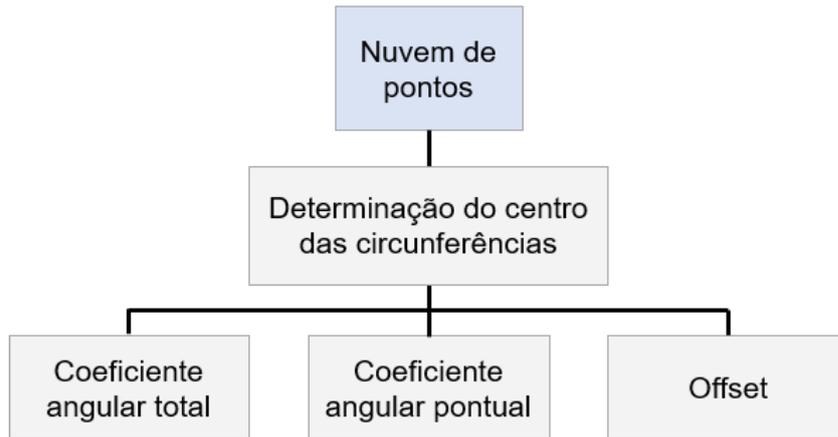
3.3.4 PARAMETRIZAÇÃO DOS SEGMENTOS CIRCULARES E DETERMINAÇÃO DA LINHA DO EIXO VERTICAL DA ESTRUTURA

A Figura 3.3.11 ilustra as etapas desenvolvidas, iniciada pela determinação das coordenadas do centro. Em razão do modo de levantamento e do posterior processamento dos dados, cada nuvem de pontos apresentou um sistema de referência local com origem e orientação própria. Para viabilizar a interpretação e comparação dos resultados, realizou-se a normalização dos dados.

Posteriormente, para avaliar se as coordenadas x e y variam de acordo com o segmento analisado, calculou-se o coeficiente angular pela regressão linear das coordenadas em cada nuvem de pontos, denominado aqui por coeficiente angular

total. Em seguida, calculou-se o coeficiente angular de cada ponto em relação à coordenada média, nomeado por coeficiente pontual. Por fim, calcularam-se os offsets, representando os deslocamentos horizontais existentes em cada segmento circular em relação a coordenada média.

Figura 3.3.11 – Etapas de determinação e avaliação da linha do eixo vertical

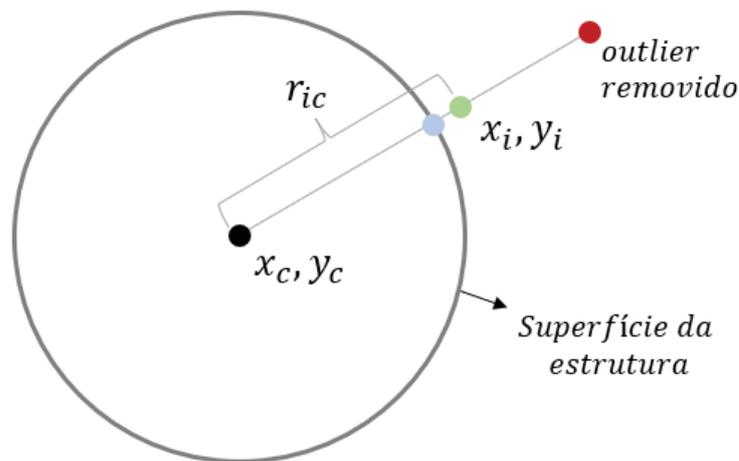


Fonte: O autor (2022).

Após a filtragem e segmentação das nuvens de pontos, calculou-se os parâmetros referentes ao centro de cada circunferência delimitada (x_c, y_c) , o raio (r_c) e as respectivas precisões a partir do ajustamento das observações pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), utilizando o modelo combinado. A equação (3.5) implícita é definida como a equação de condição, representando o modelo matemático funcional, ilustrado na Figura 3.3.12. Esta considera a relação geométrica entre as coordenadas do centro da circunferência e as coordenadas (x_i, y_i) de dado ponto i pertencente ao perímetro da circunferência, bem como a distância radial entre ambos dos dois pontos (r_{ic}) (WANG et al., 2010; CANTO; SEIXAS, 2021).

$$(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 - r_{ic}^2 = 0 \quad (3.5)$$

Figura 3.3.12 – Ajustamento das coordenadas dos pontos observados x_i, y_i e dos parâmetros definidores da circunferência x_c, y_c, r_{ic}



Fonte: O autor (2022).

Deste modo, o número de parâmetros do ajustamento u é igual a três, o número de equações de condição r condiz com o número de pontos existentes em cada segmento e o número de observações n , o qual resulta do número de coordenadas x e y de cada ponto. Dessa forma, tem-se um sistema de equações inconsistente, devido aos erros inerentes aos pontos, e com observações superabundantes, possibilitando a solução pelo MMQ. O *script* desenvolvido para o ajustamento na linguagem de programação Python está disponível no Apêndice C.

O vetor observação foi organizado conforme a equação (3.6), sendo o número de linhas correspondente à duas vezes o número de pontos em cada segmento circular:

$$L_b = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Neste trabalho considerou-se iguais as incertezas das observações para cada segmento circular. Sendo assim, a matriz peso (P) do ajustamento foi definida como a matriz identidade de dimensão $2n \times 2n$. A rigor, utilizando-se os valores ρ , θ e α indicados nas equações (3.1), (3.2) e (3.3) é evidenciado a correlação entre as

coordenadas x e y de cada ponto. Entretanto, neste trabalho estas foram negligenciadas, sendo a sua influência sobre os resultados do ajustamento uma sugestão para investigações futuras.

Conforme Alves, Veiga e Medina (2022), a média dos valores das coordenadas x e y contidas em um alvo circular pode ser considerada como uma estratégia estatisticamente viável para estimar o seu centro. Neste trabalho, sendo as nuvens de pontos as observações contidas no perímetro da circunferência, adotou-se para os valores das coordenadas (x_0, y_0) do vetor dos parâmetros iniciais (X_0) a média aritmética das coordenadas x_m e y_m em cada segmento circular (equação (3.7) e (3.8)). O valor inicial para o raio (r_0) foi calculado a partir dos valores e as coordenadas de um ponto p qualquer da nuvem (equação (3.9)).

$$x_0 = x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.7)$$

$$y_0 = y_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.8)$$

$$r_0 = (x_p - x_0)^2 + (y_0 - y_c)^2 \quad (3.9)$$

$$X_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ r_0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Na equação (3.11) é apresentada a matriz A das derivadas parciais das r equações de condição em relação aos u parâmetros, na equação (3.12) a matriz B das derivadas parciais das r equações de condição em relação as n observações e na equação (3.13) o vetor erro de fechamento $F(X_0, L_b) = W$ calculados a partir das r equações de condição considerando as observações realizadas e os valores iniciais estimados para parâmetros (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015).

$$A = \frac{\partial F}{\partial X_a} = \begin{bmatrix} \frac{dr_1(x_1, y_1)}{dx_0} & \frac{dr_1(x_1, y_1)}{dy_0} & \frac{dr_1(x_1, y_1)}{dr_0} \\ \frac{dr_2(x_2, y_2)}{dx_0} & \frac{dr_2(x_2, y_2)}{dy_0} & \frac{dr_2(x_2, y_2)}{dr_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{dr_{r-1}(x_{n-1}, y_{n-1})}{dx_0} & \frac{dr_{r-1}(x_{n-1}, y_{n-1})}{dy_0} & \frac{dr_{r-1}(x_{n-1}, y_{n-1})}{dr_0} \\ \frac{dr_r(x_n, y_n)}{dx_0} & \frac{dr_r(x_n, y_n)}{dy_0} & \frac{dr_r(x_n, y_n)}{dr_0} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$B = \frac{\partial F}{\partial L_a} = \begin{bmatrix} \frac{dr_1}{dx_1} & \frac{dr_1}{dy_1} & \cdots & \frac{dr_1}{dx_n} & \frac{dr_1}{dy_n} \\ \frac{dr_2}{dx_1} & \frac{dr_2}{dy_1} & \cdots & \frac{dr_2}{dx_n} & \frac{dr_2}{dy_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{dr_r}{dx_1} & \frac{dr_r}{dy_1} & \cdots & \frac{dr_r}{dx_n} & \frac{dr_r}{dy_n} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$W = \begin{bmatrix} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - r_0^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 - r_0^2 \\ \vdots \\ (x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 - r_0^2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Os parâmetros ajustados X_a (equação (3.16)) é determinado pelo cálculo do vetor das correções X (equação (3.15)) (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$M = BP^{-1}B^T \quad (3.14)$$

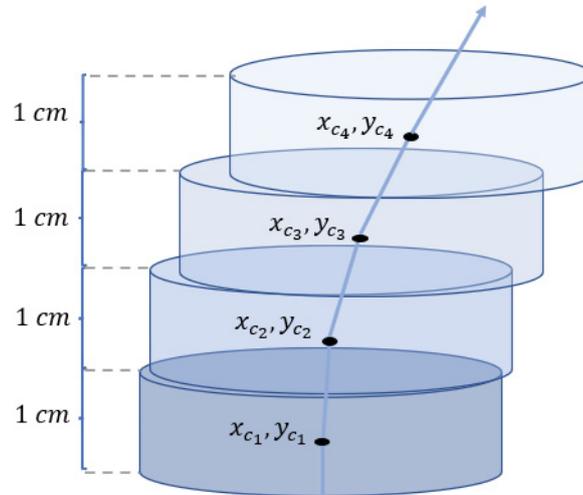
$$X = -(A^T M^{-1} A)^{-1} A^T M^{-1} W \quad (3.15)$$

$$X_a = X_0 + X \quad (3.16)$$

Entretanto, visto que a equação (3.5) trata de um modelo matemático não linear, requer-se o processor de iteração no ajustamento aplicado, uma vez que a omissão de termos na série de Taylor na linearização e a adoção de valores iniciais para os parâmetros induzem erros no ajustamento (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015).

De posse dos parâmetros ajustados, cabe a delineação da linha do eixo vertical, ou seja, o segmento linear que interliga os centros das circunferências, conforme a Figura 3.3.13.

Figura 3.3.13 – Traçado da linha do eixo vertical



Fonte: O autor (2022).

Entretanto, conforme indicado preliminarmente, após o levantamento e os processamentos, cada nuvem de pontos encontram-se em um sistema de referência local próprio, com orientação e origem incompatíveis. Para minimizar as discrepâncias entre os dados, aplicou-se a normalização das coordenadas (x_{no}, y_{no}) , conforme a equação (3.17) e (3.18).

$$x_{no} = \frac{x_c - \bar{x}_c}{\sigma_{x_c}} \quad (3.17)$$

$$y_{no} = \frac{y_c - \bar{y}_c}{\sigma_{y_c}} \quad (3.18)$$

sendo \bar{x}_c e \bar{y}_c o valor médio da coordenada x_c ou y_c de todos os segmentos circulares em cada nuvem de pontos; σ_{x_c} e σ_{y_c} os respectivos valores dos desvios-padrão.

A análise da linha do eixo vertical foi realizada graficamente, plotando-se o valor das coordenadas dos centros das circunferências. Aplicando-se a regressão linear dos dados, obteve-se o coeficiente angular da reta para todos os pontos que continham os centros dos segmentos circulares, denominado coeficiente angular total (m_t). Este valor corresponde a inclinação (θ_t) existente entre as coordenadas do eixo x ou y em relação ao eixo z , conforme a equação (3.19) e (3.20).

$$m_t(x) = \frac{n \sum x_i z_i - \sum x_i \sum z_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad \text{e} \quad m_t(y) = \frac{n \sum y_i z_i - \sum y_i \sum z_i}{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2} \quad (3.19)$$

$$\theta_t(x) = \arctg(m_t(x)) \frac{180^\circ}{\pi} \quad \text{e} \quad \theta_t(y) = \arctg(m_t(y)) \frac{180^\circ}{\pi} \quad (3.20)$$

em que:

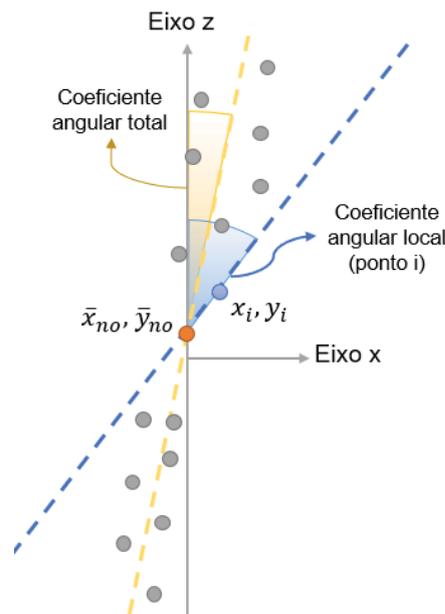
- x, y – Coordenada normalizada x_{no} ou y_{no} de cada segmento;
- n – Total de segmentos circulares;
- z – Número do segmento circular.

Para avaliar o comportamento angular de cada coordenada em relação ao eixo z , calculou-se o coeficiente angular pontual m_p pela adaptação da equação (2.23). Conforme ilustrado na Figura 3.3.14, foi considerada a inclinação do segmento reto definido pela coordenada normalizada x_{no} e y_{no} de cada centro circular e o valor médio \bar{x}_{no} e \bar{y}_{no} de todos os centros das circunferências existente por nuvem de pontos (equação (3.21) e (3.22)).

$$m_p(x) = \frac{x_{no} - \bar{x}_{no}}{z_i} \quad \text{e} \quad m_p(y) = \frac{y_{no} - \bar{y}_{no}}{z_i} \quad (3.21)$$

$$\theta_p(x) = \arctg(m_p(x)) \frac{180^\circ}{\pi} \quad \text{e} \quad \theta_p(y) = \arctg(m_p(y)) \frac{180^\circ}{\pi} \quad (3.22)$$

Figura 3.3.14 – Coeficiente angular total dos pontos normalizados em cinza e coeficiente angular pontual entre o ponto médio ($\bar{x}_{no}, \bar{y}_{no}$) e o ponto i (\bar{x}_i, \bar{y}_i)



Fonte: O autor (2022).

Por fim, determinou-se os offsets (Δ) do centro de cada circunferência i em relação as coordenadas médias \bar{x}_c e \bar{y}_c (equação (3.27)). Tais valores foram avaliados buscando identificar se os deslocamentos horizontais resultantes em x e y , do centro de cada segmento circular, atenderiam a parte 3.2 da norma europeia EN 1993-3-2:2006, da Comissão Europeia de Normalização (CEN, 2006). Segundo a norma, estruturas verticais (torres, mastros e chaminés) sujeitas às imperfeições devem obedecer a tolerância para deslocamento horizontal Δ_{tol} conforme a equação (3.24), baseada na altura (h) da estrutura analisada.

$$\Delta_i = \sqrt{(x_i - \bar{x}_c)^2 + (y_i - \bar{y}_c)^2} \quad (3.23)$$

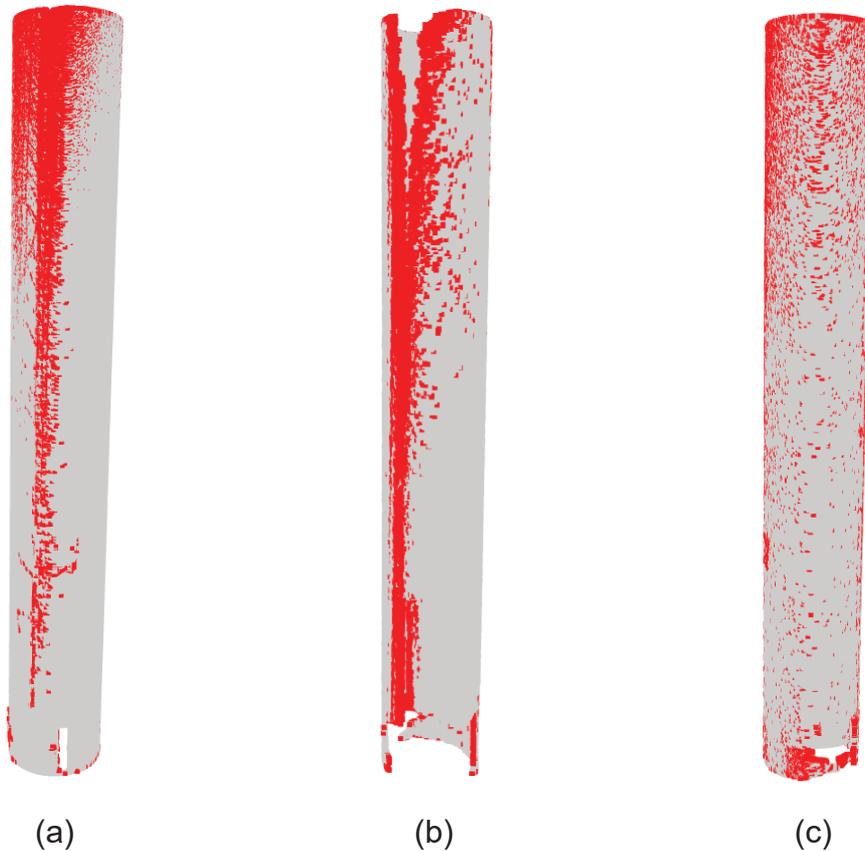
$$\Delta_{tol} = \frac{h}{500} \sqrt{1 + \frac{50}{h}} \quad (3.24)$$

3.4 RESULTADOS

Os levantamentos e processamentos dos dados, com registros das varreduras e filtragem manual, resultaram em três conjuntos de dados: nuvem de pontos 1 com 8,24 milhões de pontos, nuvem de pontos 2 com 1,35 milhões de pontos e nuvem de pontos 3 com 9,61 milhões de pontos.

Posteriormente, realizou-se a filtragem automática dos dados. De acordo com a Figura 3.4.1, a remoção automática de pontos considerados errôneos foi mais acentuada nas regiões próximas ao topo da estrutura, posto que quanto maior a altura do ponto levantado, maiores os erros propagados. Isto se deve ao aumento mútuo do ângulo vertical e da distância inclinada.

Figura 3.4.1 – Pontos removidos pela filtragem automática (vermelho) e pontos mantidos (cinza) na nuvem de pontos 1 (a), nuvem de pontos 2 (b) e nuvem de pontos 3 (c)



Fonte: O autor (2022).

Na Tabela 3.4-1 são apresentadas as quantidades de pontos excluídos por nuvem de pontos.

Tabela 3.4-1 – Número de pontos por nuvem de pontos antes e posteriormente à filtragem

Nuvem de Pontos	Número total de pontos	Número de pontos pós-filtragem
1	8,24 milhões	8,15 milhões
2	1,35 milhões	1,34 milhões
3	9,61 milhões	9,59 milhões

Fonte: O autor (2022).

De acordo com a Tabela 3.4-1, constata-se que a maior remoção ocorreu na nuvem de pontos 1. Pela maior proximidade entre o equipamento e a superfície da

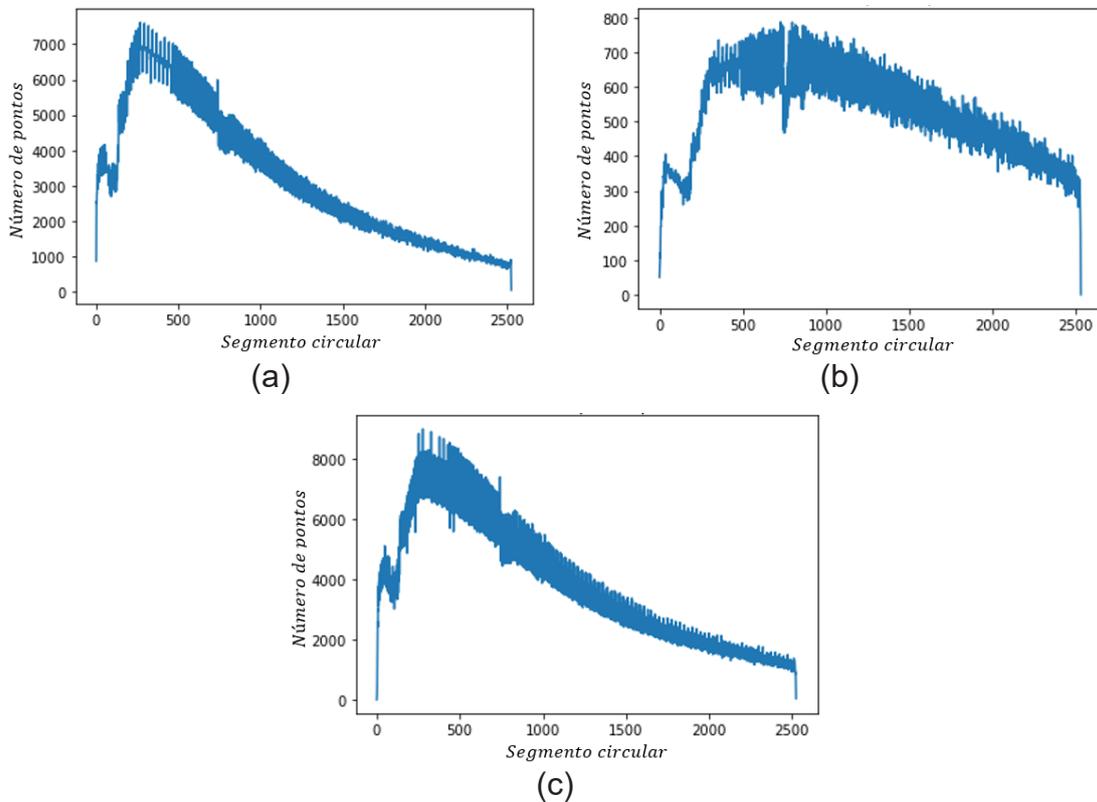
estrutura, entende-se que elementos como o cabo de aço e a escada provocam obstruções nas varreduras laser, ocasionando erros na determinação de pontos, também denominado por efeito de borda. Tal efeito resulta na divisão do feixe laser e, conseqüentemente, no deslocamento dos pontos que deveriam representar a superfície.

Este deslocamento resulta no afastamento dos pontos dos demais levantados, favorecendo a sua remoção pela filtragem automática implementada. Adicionalmente, observa-se que a existência de ângulos verticais maiores no levantamento 1 resultaram em erros com grandezas mais sensíveis ao filtro, quando comparado ao efeito do aumento das distâncias no levantamento 2.

Ainda com base na Figura 3.4.1 e na Tabela 3.4-1, observa-se uma faixa de pontos removidos desde a base da estrutura até o topo, fato mais acentuado na nuvem de pontos 2. Este efeito decorre da posição do LST e do cenário dos levantamentos, os quais resultaram em uma região da nuvem de pontos com baixo recobrimento e com número reduzido de feixes laser incidentes perpendicularmente sobre a estrutura. Em decorrência disto, tal região possuía pontos de periférica da nuvem, sujeitos também aos erros provocados pelo efeito de borda, os quais podem ser removidos por meio da filtragem dos dados.

Após a filtragem manual e automática, aplicou-se a segmentação das nuvens. Neste processo, cada nuvem de pontos foi transformada em segmentos circulares de 0,01 m de altura e definidos pelas coordenadas horizontais x e y dos pontos. Cada nuvem foi dividida em torno de 2520 segmentos circulares. A quantidade de pontos em cada segmento circular pode ser visualizada na Figura 3.4.2, na qual são demonstradas a variação desta quantidade para a nuvem de pontos 1 (Figura 3.4.2-a), 2 (Figura 3.4.2-b) e 3 (Figura 3.4.2-c). A média de pontos contidos nos segmentos foi de 2700, 446 e 3261 pontos para as nuvens 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 3.4.2 – Variação na quantidade de pontos por segmento circular na nuvem de pontos 1 (a), 2 (b) e 3 (c)



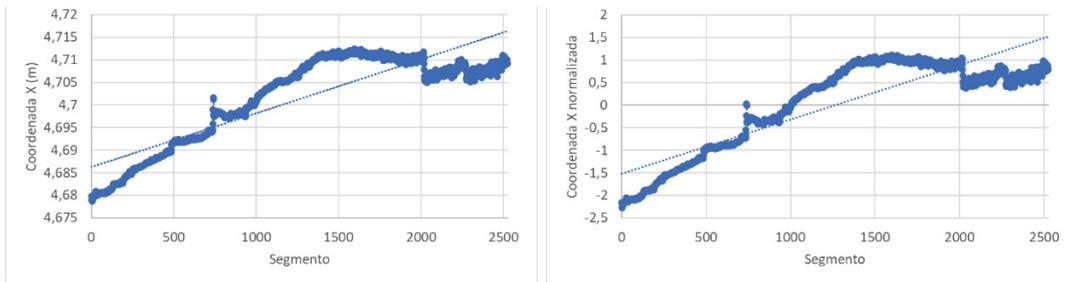
Fonte: O autor (2022).

Conforme observado, o levantamento 1 proporcionou uma nuvem de pontos mais densa ao longo da estrutura que o levantamento 2, demonstrando os efeitos das escolhas da posição do LST em relação a superfície sobre a quantidade e distribuição dos dados. Entretanto, a altura da estrutura e o aumento gradual do ângulo vertical corroborou para uma redução mais acentuada do número de pontos nos segmentos ao longo do levantamento 1.

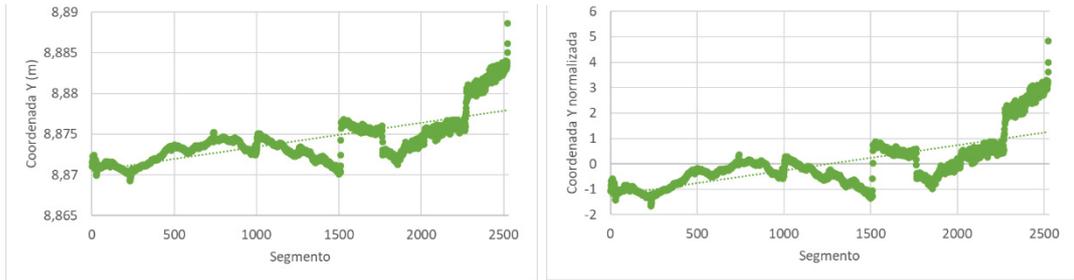
Pelos gráficos, constata-se a influência similar de elementos presentes na base da estrutura, como vegetação e elementos da própria construção. Os pontos obtidos sobre estes elementos foram removidos pelas filtragens, resultando na redução de pontos amostrais nestas regiões.

Com base nos pontos de cada segmento, aplicou-se o ajustamento das observações pelo modelo combinado, definindo os centros das circunferências. As Figura 3.4.3 ilustram os valores obtidos para as coordenadas x e y ajustadas, no sistema de referência local, e as coordenadas normalizadas para cada segmento das nuvens de pontos 1, 2 e 3.

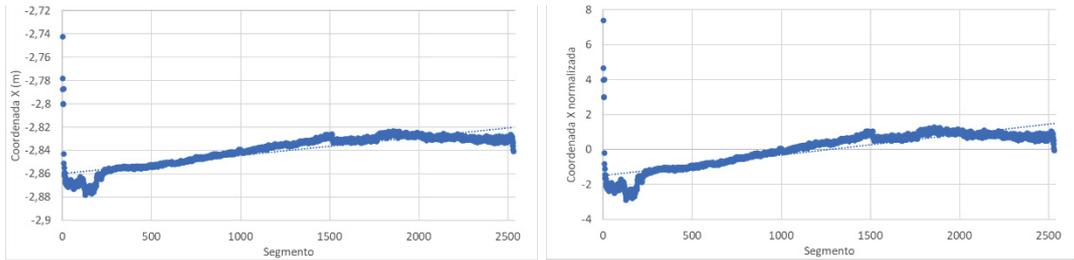
Figura 3.4.3 – Valores das coordenadas x e y ajustadas e normalizadas respectivas a nuvem de pontos 1 (a) (b), nuvem de pontos 2 (c) (d) e nuvem de pontos 3 (e) (f)



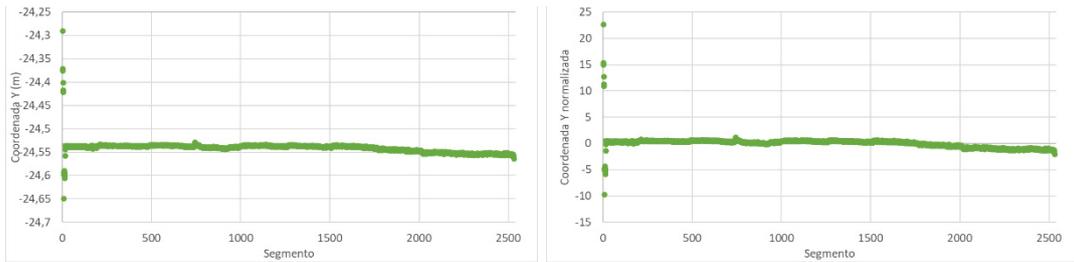
(a)



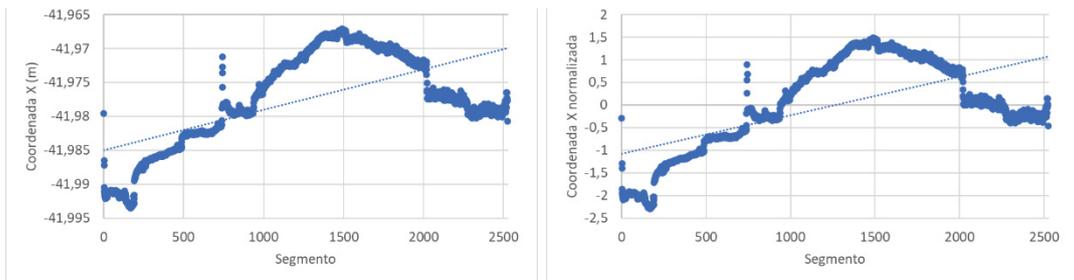
(b)



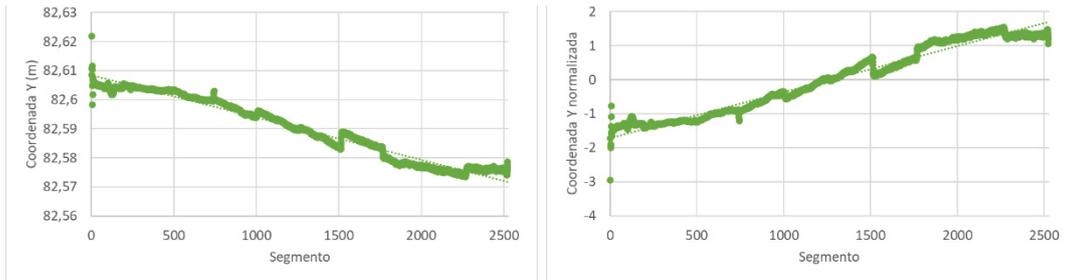
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: O autor (2022).

A partir da Figura 3.4.3, em todos os cenários, as coordenadas normalizadas x e y apresentam variações conforme altera-se o segmento analisado. Isto é, à medida que se aumenta a altura do reservatório, constata-se a variação horizontal do plano observado, o que indicaria a não verticalidade da estrutura.

Apesar dos gráficos (c) e (d) apresentarem menores variações aparente ao longo da estrutura, este fato está relacionado aos valores das coordenadas levantadas na base, as quais indicam deslocamentos superiores ao constatado nas demais. Este efeito está relacionado à pontos que não representam de fato a estrutura e não foram removidos nos processos de filtragem.

Outra hipótese é a baixa amostragem de pontos nesta região, resultante dos obstáculos físicos existentes no levantamento 2, influenciando na determinação das coordenadas dos centros dos segmentos circulares. Tal condição foi minimizada pela união dos levantamentos, conforme indicado nos gráficos (e) e (f).

Com base nos dados normalizados, efetuou-se a regressão linear dos dados, visando a determinação do coeficiente angular da reta. A Tabela 3.4-2 apresenta o resultado do coeficiente angular total por nuvem de pontos.

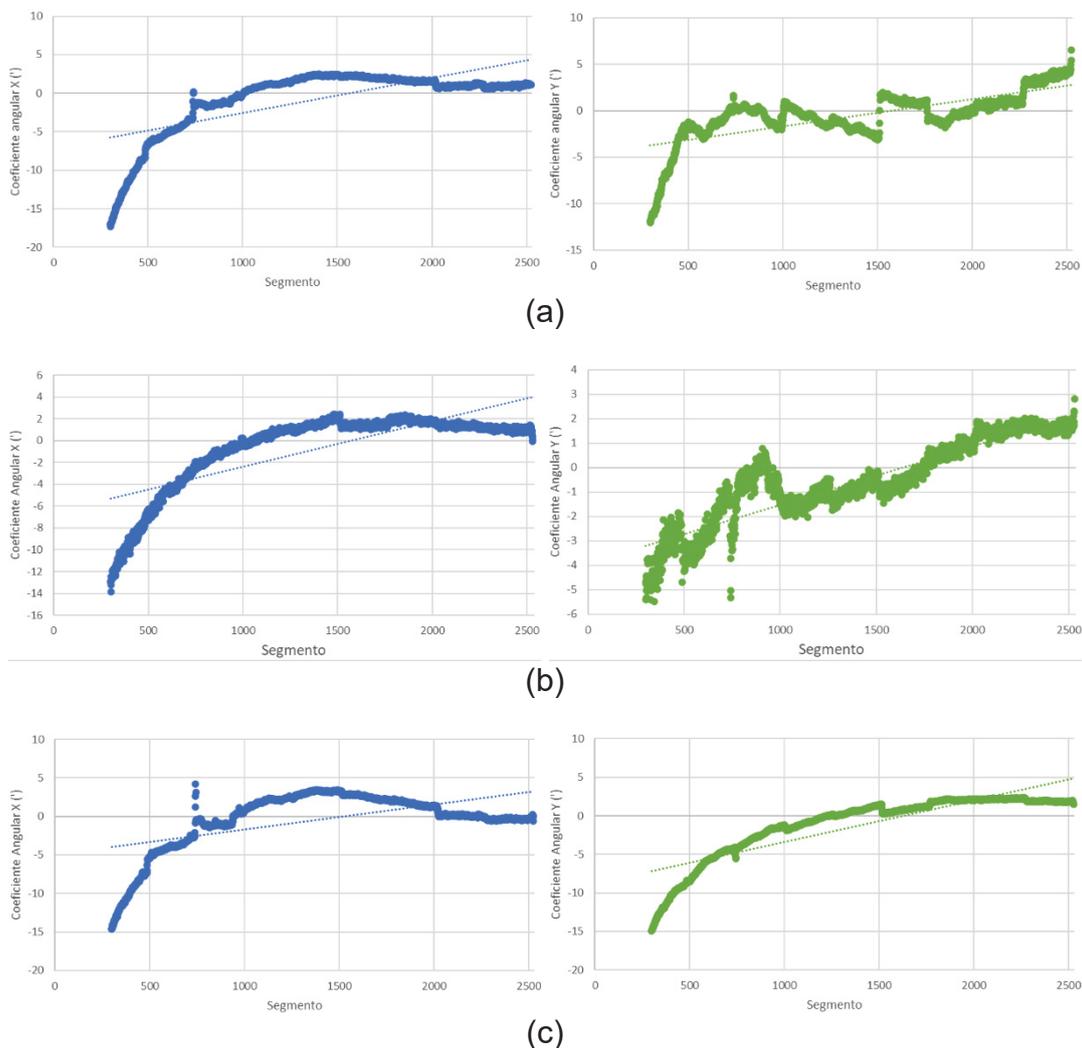
Tabela 3.4-2 – Coeficiente angular total por nuvem de pontos

Nuvem de Pontos	$\theta_t(x)$	$\theta_t(y)$
1	0° 04' 07,52''	0° 03' 26,26''
2	0° 04' 07,52''	0° 02' 24,38''
3	0° 03' 05,64''	0° 04' 28,14''

Fonte: O autor (2022).

Adicionalmente, a Figura 3.4.4 ilustra o coeficiente angular local calculado para os segmentos circulares, baseado na coordenada média de x e y. Entretanto, ponderando-se a defasagem de dados na base da estrutura, foram considerados as circunferências a partir de 3,0 m de altura no cálculo dos coeficientes angulares locais, aplicando-se uma nova regressão linear. Com isso, buscou-se minimizar os efeitos observados anteriormente na análise local dos centros das circunferências.

Figura 3.4.4 – Variação do coeficiente angular local em minutos na nuvem de pontos 1 (a), nuvem de pontos 2 (b) e nuvem de pontos 3 (c)



Fonte: O autor (2022).

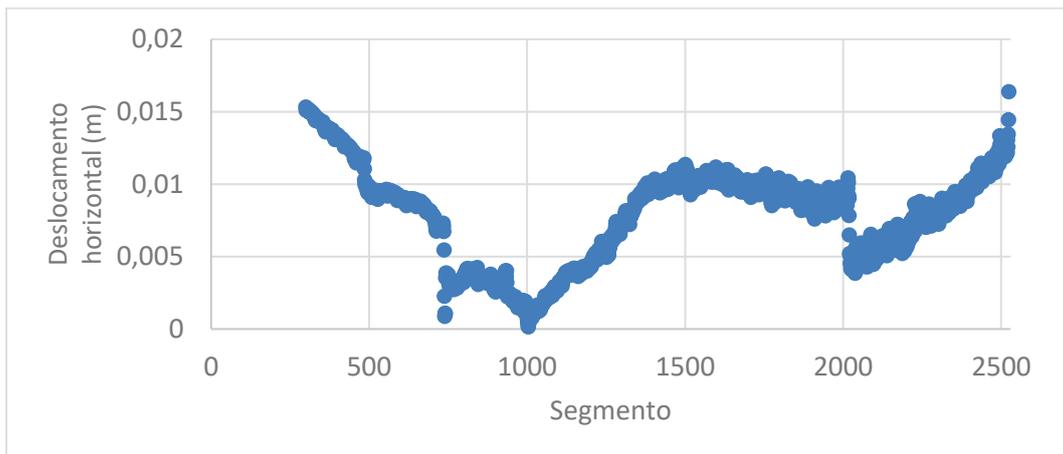
A partir dos gráficos da Figura 3.4.4, pode-se observar a variação similar dos coeficientes angulares locais para os seis grupos de coordenadas analisados. Os valores positivos, ou seja, os coeficientes determinados para os pontos acima do valor

médio das coordenadas, não ultrapassaram $0^{\circ} 05'$, indicando a não verticalidade da estrutura e confirmando os resultados obtidos pelos coeficientes angulares totais.

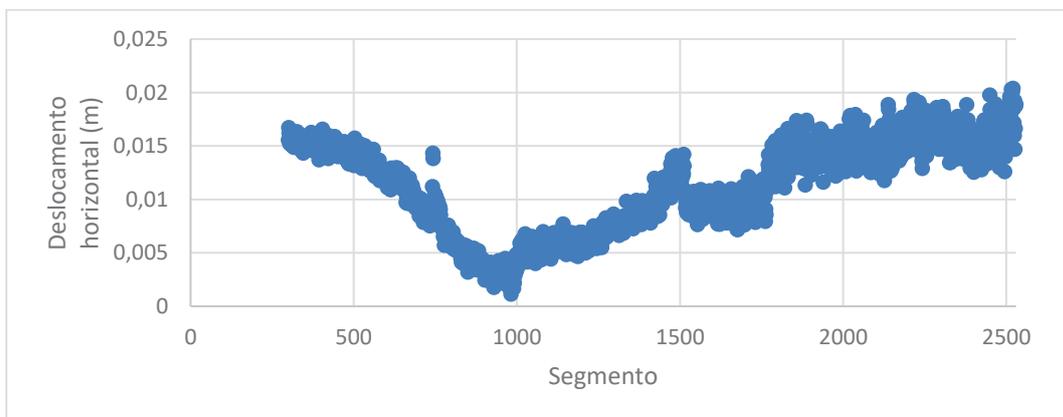
Porém, nos valores negativos, os primeiros pontos apresentaram coeficientes angulares totais discrepantes dos demais. Este fato pode ser ainda uma consequência da posição do LST e de elementos próximos à estrutura, interferindo na determinação das coordenadas dos centros dos segmentos, com maior efeito para o levantamento 1, refletindo na nuvem de pontos 1 e 3.

Por fim, conforme a Figura 3.4.5, foram calculados os deslocamentos horizontais com base nas coordenadas ajustadas e o valor da coordenada média de x e y de cada conjunto analisado. Nesta análise, também foram considerados os segmentos circulares acima de 3,0 m.

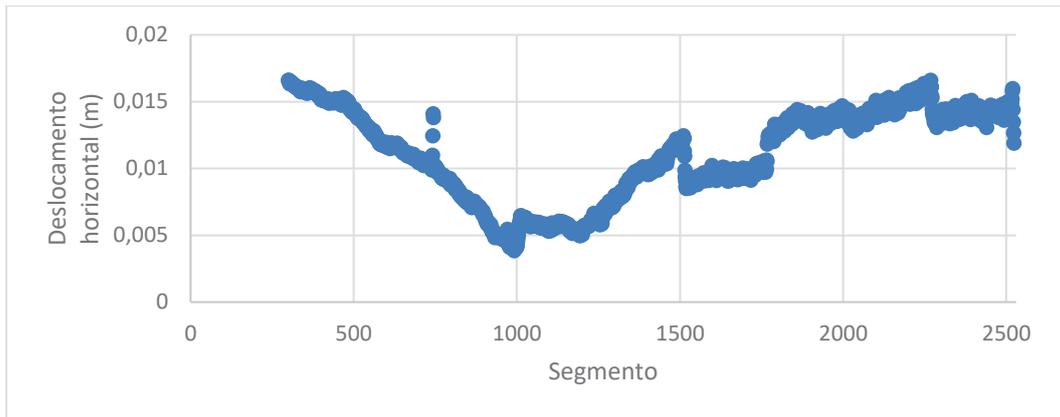
Figura 3.4.5 – Deslocamento horizontal dos segmentos circulares



(a)



(b)



(c)
Fonte: O autor (2022).

Os gráficos ilustrados na Figura 3.4.5 apontam semelhanças nos calculados dos deslocamentos para as nuvens de pontos avaliadas. Esta ocorrência indica a não influência da posição do LST para a análise baseada nos deslocamentos horizontais. Em ambos os casos, o valor da coordenada média está próximo ao segmento 1000, o que resulta no menor deslocamento nesta posição, com progressivo aumento nos segmentos anteriores e posteriores.

De acordo com o estabelecido pelo Comitê Europeu de Normalização, o limite estabelecido para o deslocamento horizontal no topo de uma estrutura de 25 m seria de 8,0 cm. Nos casos ilustrados na Figura 3.4.5, nenhuma amostra analisada ultrapassou a grandeza de 2,0 cm. Com isso, pode-se inferir que existe o afastamento da verticalidade na estrutura analisada, porém os deslocamentos horizontais são consideráveis aceitáveis conforme a tolerância estipulada pelo referido comitê.

3.5 CONCLUSÃO

A varredura por LST se apresentou como um método eficaz para a obtenção de pontos amostrais sobre a estrutura de interesse. As varreduras laser possibilitaram o recobrimento amplo do reservatório d'água, apesar das dimensões distintas quando comparados a proporção do eixo vertical e o plano horizontal do objeto investigado.

Entretanto, cabe ressaltar que a existência de elementos em campo, como vegetação e construções, interferiu na escolha da disposição de instalação do equipamento em que se buscou a equidistância entre as posições do equipamento e a estrutura. Neste trabalho, conforme observado tanto no levantamento 1 quanto levantamento 2, a tentativa de estabelecer a posição LST a uma distância de 10 m e 30 m do reservatório d'água, respectivamente, resultou em regiões com uma distribuição de pontos não uniforme. Estes obstáculos também promoveram deslocamentos de pontos que deveriam ser levantados sobre a estrutura. Apesar da filtragem manual e automática, tais deslocamentos permaneceram nas nuvens de pontos trabalhadas, principalmente nas regiões próximas a base da estrutura.

Adicionalmente, averiguou-se que a união de varreduras próximas (levantamento 1) e distantes (levantamento 2) da estrutura se tornou uma alternativa viável para o aumento do recobrimento, além de não impactar de forma significativa no custo computacional para aplicação da metodologia, com diferença inferior a duas horas.

A estratégia de segmentação ao longo do eixo vertical viabilizou uma análise contínua da verticalidade do reservatório d'água, com o agrupamento de pontos em segmentos circulares que possibilitaram a determinação do centro da circunferência. Esta metodologia permitiu a detecção de deslocamentos horizontais na estrutura em diferentes alturas e de forma contínua.

Todavia, a metodologia está sujeita a distribuição dos dados sobre a estrutura, visto que o vazio de informações na região próxima à base do reservatório resultou na determinação de centros das circunferências incompatíveis com os demais segmentos. Tal fato foi reforçado ao serem desconsiderados segmentos abaixo de 3,0 m, o que possibilitou o cálculo dos deslocamentos horizontais mais condizentes com a realidade.

REFERÊNCIAS

ALVES, S. de S. O.; VEIGA, L. A. K.; MEDINA, A. S. Avaliação da qualidade posicional de varreduras laser terrestre para aplicações em arquitetura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 13, n. 00, p. e022012, 2022. DOI: 10.20396/parc.v13i00.8659734.

BARROS, Stenio Monteiro de. **Tanques de Armazenamento**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2009.

CANTO, L. F. C. DO; SEIXAS, A. DE. Auscultação Geodésica em Torres Eólicas Onshore: Definição do Sistema de Referência e de Medição para o Monitoramento. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 2, p. 294-311, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72n2-50539>

CANTO, Luiz Filipe C.; SEIXAS, Andrea de. Geodetic monitoring on onshore wind towers: analysis of vertical and horizontal movements and tower tilt. **Structural Monitoring And Maintenance**, v. 8, n. 4, p. 309-328, 2021. <http://dx.doi.org/10.12989/SMM.2021.8.4.309>.

CANTO, Luiz Filipe Campos do. **Metodologia para o monitoramento geodésico em torres eólicas onshore**. 250f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO - CEN. **EN 1993-3-2:2006**: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 3-2: Towers, masts and chimneys - Chimneys. Bruxelas: European Comitee For Standardization, 2006. 30 p.

G1. ESTRUTURA de caixa d'água desaba em Diadema, na Grande SP, e amassa carros. **G1**. São Paulo, p. 10-10. 23 ago. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2020/08/23/estrutura-de-caixa-dagua-desaba-em-diadema-na-grande-sp-e-amassa-carros-veja-fotos.ghtml>. Acesso em: 24 out. 2022.

GEMAEL, Camil; MACHADO, Alvaro Muriel Lima; WANDRESEN, Romualdo. **Introdução ao ajustamento de observações**. 2 ed. Curitiba: Ed. UFPR. 2015.

GONÇALVES, Évelin Moreira; VEIGA, Luis Augusto Koenig. Planejamento de Rede de Monitoramento de Estruturas Empregando-se LST (Laser Scanner Terrestre). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 3, p. 906-933, 25 set. 2019.

GUMILAR, Irwan et al. Tank Modeling and Its Condition Assessment using Terrestrial Laser Scanner. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 936, n. 1, 2021. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/936/1/012004>

IRUGHE-EHIGIATOR, R.; EHIOROBO, J. O. Application of Terrestrial Laser Scanner in Monitoring Gas Separation Tank. **Journal of Civil and Environmental Systems Engineering**, Benin City, v. 1, n. 1, p. 13-26, jun. 2021.

JAAFAR, Hasan Abdulhussein; MENG, Xiaolin; SOWTER, Andrew. Terrestrial laser scanner error quantification for the purpose of monitoring. **Survey Review**, v. 50, n. 360, p.232-248, 7 mar. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00396265.2016.1259721>

KOTARI, Manjunath et al. **Water Tank Monitoring System**. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348777802_Water_Tank_Monitoring_System. Acesso em: 10 mar. 2022.

LEICA. Leica Geosystems. **Leica BLK360**: Manual do Usuário. 2 ed. Brasil, 2018. 42 p.

LENARTOVICZ, Igor Ribeiro. **Avaliação da potencialidade do laser scanner terrestre no monitoramento de estruturas**: estudo de caso UHE Mauá. Curitiba, 2013. 123f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, 2013.

LINDENBERGH, Roderik; PFEIFER, Norbert. A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. In: PROCEEDINGS OF THE 7TH CONFERENCE ON OPTICAL. 2005. p. 61-70.

LOVAS, T. et al. Terrestrial laser scanning in deformation measurements of structures. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 37., 2008, Pequim, p. 527–532.

MARJETIC, Ales. TPS and TLS laser scanning for measuring the inclination of tall chimneys. **Geodetski Glasnik**, v. 49, n. 1, p. 23-43, out. 2018.

OGUNDARE, John Olusegun. **Precision surveying**: the principles and geomatics practice. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

OPEN3D. **Point cloud outlier removal**. Disponível em: http://www.open3d.org/docs/0.9.0/tutorial/Advanced/pointcloud_outlier_removal.html#prepare-input-data. Acesso em: 12 dez. 2022.

PETRIE, Gordon; TOTH, Charles K. **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2018.

RUSU, Radu Bogdan *et al.* Towards 3D Point cloud based object maps for household environments. **Robotics And Autonomous Systems**, Garching Bei München, v. 11, n. 56, p. 927-941, ago. 2008.

STAIGER, Rudolf. The geometrical quality of terrestrial laser scanner (TLS). In: PROCEEDINGS OF FIG WORKING WEEK, 2005. Cairo, Egypt, 2005.

VAN GENECHTEN, Björn et al. **Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning**: Training material based on practical applications. 2008.

VOSELNAN, George; MAAS, Hans-gerd. **Airborne and Terrestrial Laser Scanning**. Dunbeath: Whittles Publishing, 2010. 337 p.

WALTON, Gabriel; DELALOYE, Danielle; DIEDERICHS, Mark S. Development of an elliptical fitting algorithm to improve change detection capabilities with applications for deformation monitoring in circular tunnels and shafts. **Tunnelling And Underground Space Technology**, v. 43, p.336-349, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.014>

WANG, Jin Tao; LIU, Zi Yong; ZHANG, Long; GUO, Li Gong; BAO, Xue Song; TONG, Lin. Automatic Measurement System for Vertical Tank Volume by Electro-Optical Distance-Ranging Method. **Applied Mechanics and Materials**, [S.L.], v. 26-28, p. 416-421, 2010. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.26-28.416>.

WIDERSKI, Tadeusz; KURAŁOWICZ, Z. **Geodesic monitoring of tower and mast structures**. 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/282868646_Geodesic_monitoring_of_tower_and_mast_structures. Acesso em: 25 jan. 2022.

WUTKE, JULIANA DIAS. **Métodos para Avaliação de um Sistema Laser Scanner Terrestre**. 2006, 97f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

Capítulo 4

ANÁLISE DA VERTICALIDADE DE ESTRUTURAS CILÍNDRICAS POR VARREDURA LASER TERRESTRE

Métodos tradicionais de monitoramento geodésico de estruturas civis baseiam-se na determinação do deslocamento de um conjunto de pontos selecionados sobre o objeto monitorado, assumindo que estes podem assinalar o comportamento como um todo da estrutura. Técnicas modernas de mensuração tornaram possível a medição de milhões de pontos em um curto espaço de tempo possibilitando uma melhor amostragem geométrica e aproximando este conjunto de pontos da forma original da estrutura. O presente estudo propôs uma abordagem para análise da verticalidade de uma torre de caixa d'água em concreto com formato cilíndrico por meio da definição do seu eixo vertical determinado a partir de nuvens de pontos obtidas pela varredura empregando-se um Laser Scanner Terrestre (LST). Para fins de comparação da qualidade dos resultados, o mesmo método foi empregado com dados obtidos pela varredura com uma estação total robótica (ETR), equipamento comumente utilizado em trabalhos de monitoramento geodésico. Visando viabilizar a comparação, uma abordagem inovadora para compatibilização da direção dos sistemas de referências dos dados foi proposta por meio da matriz de rotação da decomposição por valores singulares. Após a transformação dos sistemas e segmentação da nuvem em camadas, o eixo vertical de cada segmento foi obtido pela parametrização de uma circunferência e, pelo método algébrico de Kasa, estabelecendo as coordenadas do ponto do centro de cada segmento. O eixo vertical foi então definido a partir destas coordenadas. Com os dados da varredura pelo LST determinou-se uma inclinação e deslocamento horizontal do eixo no topo da estrutura de 9,35' e 6,15 cm, respectivamente. Paralelamente, com a varredura pela ETR determinou-se uma inclinação de 6,94' e deslocamento horizontal de 4,56 cm. Sendo assim, constatou-se que a partir das nuvens de pontos e com base na metodologia proposta, foi possível verificar a inclinação do reservatório. Complementarmente, o LST possibilitou maior detalhamento da inclinação ao longo de toda a estrutura.

4.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a modernização das técnicas de análise, os materiais mais resistentes e os métodos construtivos mais apurados vêm contribuindo com que peças cada vez mais esbeltas sejam elaboradas pela engenharia de estruturas e, conseqüentemente, cada vez mais suscetíveis a problemas de instabilidade (BRASIL, 2021). Como esbeltez entende-se a relação dada entre o comprimento da estrutura (altura efetiva) e propriedades geométricas de rigidez, espessura efetiva dada pelo raio de giração ou espessura da parede (PARSEKIAN; CORRÊA; LOPES; CAVICHIOLLI, 2016).

Obras de engenharia baseadas em estruturas de concreto tendem a apresentar deformações e inclinações em decorrência de cargas externas e fatores ambientais, o que pode afetar no posicionamento, deslocamento e funcionalidades operacionais da estrutura (JIA et al., 2021; SCAIONI et al., 2018). Neste sentido, é necessário que sejam aplicadas técnicas de monitoramento que possam auxiliar na avaliação das variações geométricas (deslocamentos e deformações) do objeto.

O monitoramento geodésico de uma estrutura representa uma área de pesquisa interdisciplinar, relacionando campos dos conhecimentos das Ciências Geodésicas e das Engenharias. Essa interface possibilita que sejam realizadas medições sistemáticas e periódicas, bem como investigações quanto às alterações na forma, dimensão e posição de um objeto (MUKUPA et al., 2017).

Métodos pontuais com instrumentos convencionais são aplicados neste campo, como o uso de instrumentos de nivelamento para monitoramento de subsidência e estações totais ou teodolitos para análise de inclinação e deslocamento (JIA et al., 2021). Estes instrumentos são aplicados na etapa de aquisição de dados e podem ser distinguidos quanto ao tipo de sensor presente empregado: ativo e passivo.

Como sensores ativos podem ser citados o Laser Scanner Terrestre (LST) e a estação total robotizada (ETR). A aquisição dos dados, com estes equipamentos, ocorre de forma similar pelos instrumentos, sendo para o caso das estações totais habitualmente realizada de forma pontual e em localizações específicas. Já os LST proporcionam a aquisição de dados de milhões de pontos por segundo, cuja amostragem de pontos não é restringida à uma região da estrutura (JIA et al., 2021).

Embora a precisão para cada ponto obtido por um LST seja ainda inferior que a precisão dos pontos obtidos com o uso de uma estação total, a redundância dos dados pela varredura com LST é vantajosa para a detecção de alterações nas superfícies de objetos (SCAIONI et al., 2018). Devido à versatilidade e potencialidade de taxa de aquisição de dados superior à ETR, os LST vêm sendo aplicado na reconstrução tridimensional de edificações históricas (LIN et al., 2021), monitoramento de áreas suscetíveis ao deslizamento de terra (KASPERSKI et al., 2010), análise estrutural de pontes (RIVEIRO et al., 2011), entre outras atividades.

Considerando que a análise de estruturas passou a utilizar um grande número de pontos de varredura, novos desafios surgiram relativos aos aspectos da modelagem dos deslocamentos. Uma das abordagens viáveis desenvolvidas

consistiu na parametrização dos deslocamentos existentes (HOLST; KUHLMANN, 2016) como, por exemplo, o cálculo de parâmetros definidores de planos a partir da nuvem de pontos e dos ângulos de deslocamento do plano (ALVES et al., 2020).

Dentre as formas geométricas aplicadas a parametrização, ressalta-se a circunferência e o cálculo de parâmetros que os descrevam. Diversas áreas como medicina, arqueologia e física nuclear necessitam da determinação do circunferências em suas práticas, permitindo a caracterização dos dados e viabilizando a tomada de decisões (CHERNOV, 2011). A definição de uma circunferência em dados possibilita aplicações como inventário florestal, reconstrução de superfície, rastreamento de partículas, captura de movimento, processamento de informações de construção, entre outras (NURUNNABI; SADAHIRO; LAEFER, 2018).

Ajustar circunferências e arcos circulares a pontos observados é uma tarefa básica em reconhecimento de padrões e na visão computacional (ABDUL-RAHMAN; CHERNOV, 2013). Tal prática pode ser realizada por meio de métodos geométricos e métodos algébricos. Na primeira abordagem, visa-se a minimização das distâncias geométricas (ortogonais) entre os pontos de dados e a circunferência, aplicando-se uma iteração a partir de valores iniciais para os parâmetros que definem a circunferência, tornando-o uma abordagem considerada lenta a depender do número de pontos trabalhados. Os métodos algébricos são procedimentos não iterativos de baixo custo que fornecem uma boa estimativa dos parâmetros (CHERNOV; LESORT, 2005; CHERNOV, 2011; AL-SHARADQAH, 2014).

Assim, considerando os avanços tecnológicos na elaboração de instrumentos geodésicos, bem como o progresso metodológico nas pesquisas que investigam a aplicação da varredura do LST para fins de modelagem e análise do estado de estruturas, a acurácia das informações obtidas a partir das nuvens de pontos derivadas destes instrumentos deve ser continuamente avaliada visando proporcionar maior confiabilidade nos parâmetros extraídos dos dados.

Neste sentido, a presente pesquisa buscou propor uma metodologia para a determinação da verticalidade de estruturas cilíndricas a partir de nuvens de pontos levantadas pela varredura aplicando-se um LST e uma ETR, fazendo-se uma avaliação dos métodos. Os dados obtidos foram comparados tanto com base no desempenho em campo para coleta de dados, quanto na determinação da inclinação da estrutura monitorada a partir da parametrização do cilindro em segmentos circulares pelo método Kasa (1976). Para viabilizar a comparação, uma abordagem

inovadora para compatibilização da direção dos sistemas de referências dos dados foi proposta por meio da matriz de rotação da decomposição por valores singulares.

4.2 DECOMPOSIÇÃO POR VALORES SINGULARES

Um dos conceitos fundamentais para entender e realizar operações da álgebra matricial é o de autovetor e autovalor. Dada uma transformação linear $A: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^N$, o vetor não nulo v é dito como autovetor de A se existir um número real λ , tal que (Equação 01):

$$A[v] = \lambda[v] \quad (01)$$

em que λ é definido de autovalor da matriz A . Logo, cabe ressaltar que os autovetores sempre estão associados a um autovalor.

A Decomposição por Valores Singulares (*Singular Decomposition Values – SVD*) consiste em um processo de fatorização de uma matriz e estão intimamente associadas a fatoração de autovalores e autovetores (STRANG, 2010). Aplicando-se a fatoração é obtido um produto matricial utilizado em algoritmos de inversão de matrizes e de solução de sistemas lineares. Um dos caminhos para se realizar este processo é dado pelo teorema de diagonalização, no qual se transforma uma matriz A qualquer em uma matriz diagonal D , ou seja, os elementos fora da diagonal principal em D são iguais a zero. Este processo é definido por decomposição espectral da matriz A (Equação 02).

$$A = PDP^{-1} \quad (02)$$

onde P é uma matriz qualquer invertível que permite a diagonalização de A . Tal aplicação é considerada importante por representar o tipo mais simples de operador linear. Para que $A_{n \times n}$ seja diagonalizável, a matriz deve possuir n autovetores linearmente independentes (ANTON; BUSBY, 2007) associados a um autovalor. As colunas da matriz P serão formadas pelos autovetores e a diagonal da matriz D pelos autovalores.

A diagonalização e, conseqüentemente, a aplicação da técnica SVD baseia-se nos conceitos de posto e vetores linearmente independentes. Define-se como posto de uma matriz A o número de linhas ou número de colunas linearmente

independentes. Por exemplo, considerando dois vetores a_1 e a_2 correspondentes à duas colunas da matriz A , ambos serão linearmente independentes se não existir um número real k que atenda a relação $a_1 = ka_2$. Assim, o posto de uma matriz sempre atendendo a condição $r \leq \text{mínimo}(m, n)^1$.

“Se A é uma matriz $n \times n$ de posto r , então A pode ser fatorada como (Equação 03)

$$A = U\Sigma V^T \quad (03)$$

onde U e V são matrizes ortogonais $n \times n$ e Σ é uma matriz diagonal $n \times n$ cuja diagonal principal tem r entradas positivas e $n - r$ entradas nulas” (ANTON; BUSBY, 2007).

Sendo assim, o diferencial do SVD é por considerar duas matrizes ortogonais (U e V) ao invés de uma (P). Além disso, por serem matrizes ortogonais, a inversa é igual a transposta. Logo, $V^{-1} = V^T$.

Considerando que os vetores-coluna de V são autovetores unitários de $A^T A$, a diagonal de Σ tendo como entrada nas primeiras r posições os autovalores de $A^T A$ (denominados como valores singulares A) e que os vetores-coluna de U são autovetores unitários de AA^T (STRANG, 2010), a fatoração pode ser reescrita como (ANTON; BUSBY, 2007) (Equação 04):

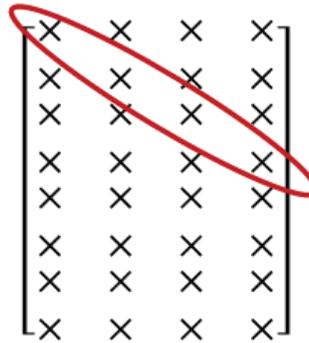
$$A = [u_1 \quad \dots \quad u_r \quad u_{r+1} \quad \dots \quad u_n] \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & \sigma_r & & & \\ & & & 0 & & \\ & 0 & & & 0 & \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^T \\ \vdots \\ v_r^T \\ v_{r+1}^T \\ \vdots \\ v_n^T \end{bmatrix} \quad (04)$$

Os sigmas dos valores da diagonal de Σ são dados pela relação $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$, em que λ_i é o autovalor não nulo de $A^T A$. Os vetores u_1, \dots, u_r são denominados vetores singulares à esquerda de A e v_1, \dots, v_r vetores singulares à direita de A (ANTON; BUSBY, 2007).

Entretanto, em estruturas matriciais como os presentes em dados de nuvens de pontos, as matrizes das observações são denominadas como *tall-thin* (altas e finas) e possuem número de linhas que superam o número colunas. Logo, nestes casos em que as matrizes não são quadradas, a igualdade $A[v] = \lambda[v]$ não é atendida.

Para a aplicação do SVD em matrizes arbitrárias (m x n), define-se a diagonal principal como sendo a reta cujos elementos de entrada a_{ij} apresentam a igualdade $i = j$ (Figura 4.2.1).

Figura 4.2.1 – Localização de uma diagonal principal de uma matriz arbitrária (8 x 3)



Fonte: O autor (2022).

“Se A é uma matriz $m \times n$ de posto r , então A pode ser fatorada como

$$A = U\Sigma V^T \tag{05}$$

$$A = [u_1 \ \dots \ u_r \ | \ u_{r+1} \ \dots \ u_n] \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_r \\ 0_{(m-r) \times r} & & & 0_{(m-r) \times (n-r)} \\ & & & 0_{(m-r) \times (n-r)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^T \\ v_2^T \\ \vdots \\ v_r^T \\ v_{r+1}^T \\ \vdots \\ v_n^T \end{bmatrix} \tag{06}$$

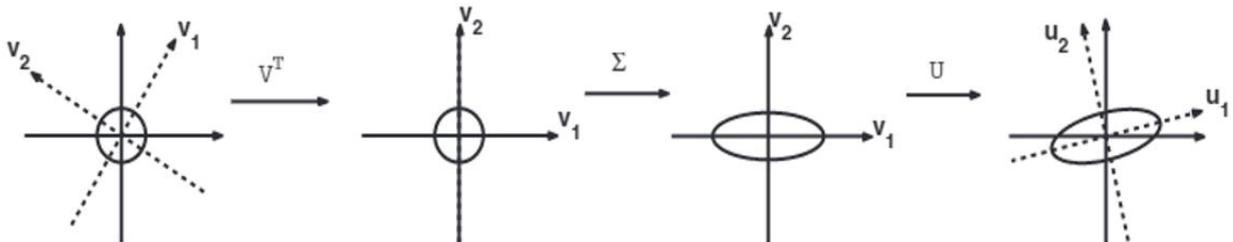
em que U, Σ, V^T têm tamanhos $m \times m$, $m \times n$ e $n \times n$, respectivamente, e em que:

- (...) (...)
- (c) Os vetores-coluna de V são ordenados de tal modo que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r$;
- (d) $u_i = \frac{Av_i}{\|Av_i\|} = \frac{1}{\sigma_i} Av_i \quad (i = 1, \dots, r)$
- (e) $\{u_1, \dots, u_r\}$ é uma base ortogonal do subconjunto coluna da matriz A ;
- (f) $\{u_1, \dots, u_r, u_{r+1}, \dots, u_m\}$ é uma extensão de $\{u_1, \dots, u_r\}$ a uma base ortogonal de \mathbb{R}^m (ANTON; BUSBY, 2007).

Geometricamente, o SVD atua com transformações de rotação dadas pelas matrizes U e V e uma transformação de escala dada por Σ . Conforme a Figura 4.2.2, para uma matriz 2×2 , V^T é uma rotação do círculo para que V_1 e V_2 coincidam com os eixos das coordenadas. Σ aplica um fator de escala no círculo, esticando-o e

transformando-o em uma elipse. U rotaciona os eixos principais da elipse, definidos como U_1 e U_2 (MULLER; MAGAIA; HERBST, 2004). Esta mudança de referencial para U_1 e U_2 pode facilitar, por exemplo, a descrição física da trajetória de um corpo em movimento elíptico, apoiado nos eixos principais da elipse (BOLDRINI et al., 1980).

Figura 4.2.2 – Interpretação geométrica da diagonalização da matriz A

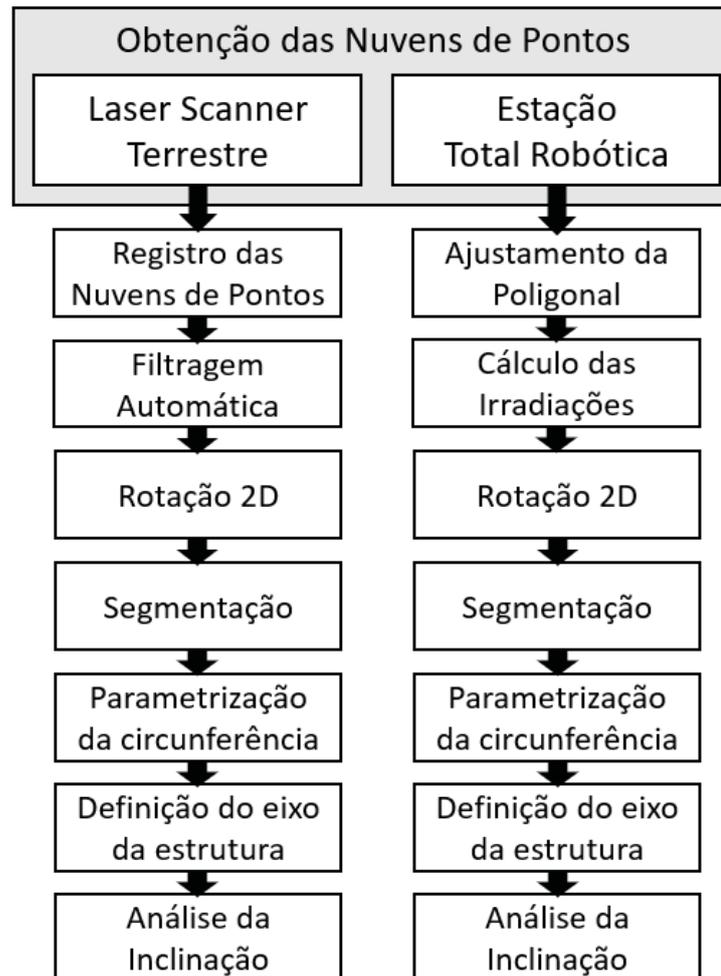


Fonte: Adaptado de Muller, Magaia e Herbst (2004).

4.3 METODOLOGIA

No desenvolvimento da presente pesquisa, foram elaboradas as etapas que compreendem desde o processo de aquisição dos dados espaciais, processamento das amostras, funções voltadas para o ajustamento de observações, até a análise da inclinação da estrutura, conforme o exposto no diagrama de fluxo da Figura 4.3.1. Considerando os dois sistemas de sensores de coletas empregados, o fluxo de trabalho foi definido em função de ambas as abordagens, para assim investigar o comportamento da estrutura de concreto.

Figura 4.3.1 – Etapas de desenvolvimento metodológico



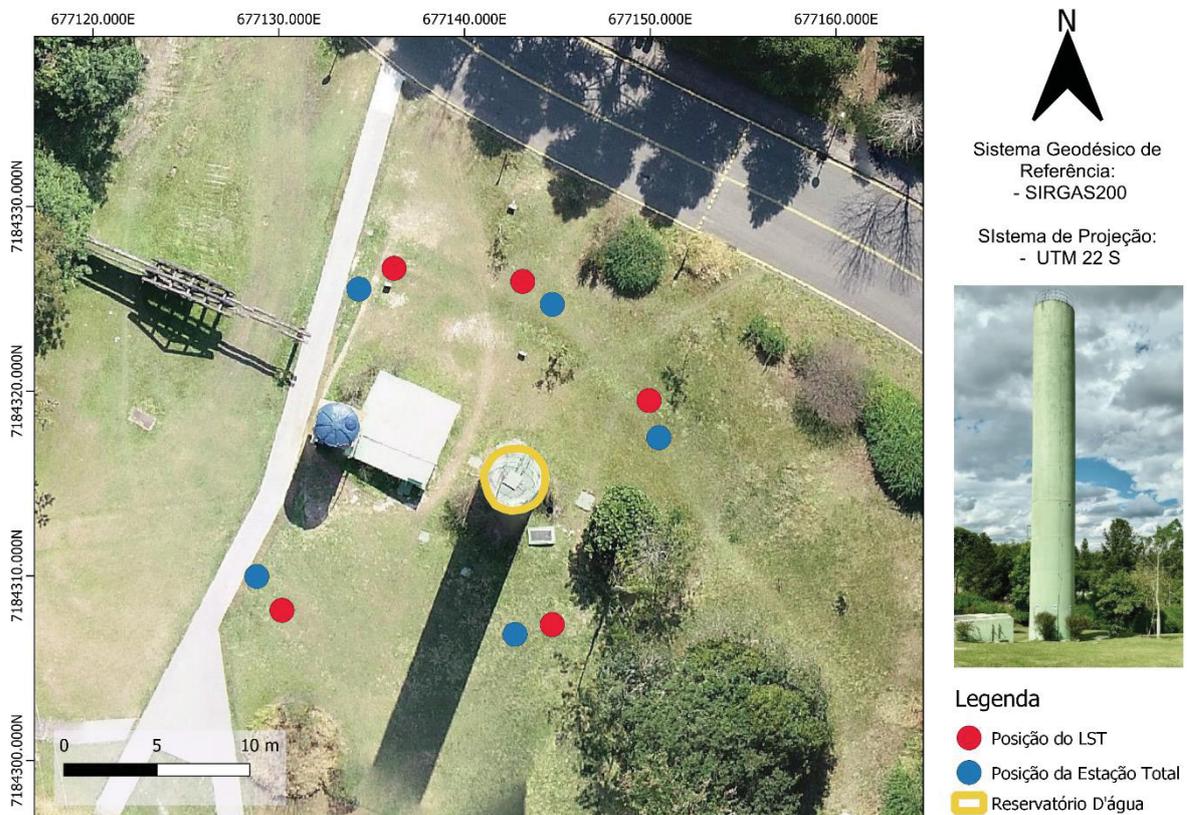
Fonte: o autor (2022).

A primeira etapa consistiu na obtenção de nuvens de pontos com base no planejamento prévio do levantamento de campo. Essas nuvens foram geradas a partir de varreduras realizadas de forma simultânea, empregando uma ETR e um LST. Posteriormente, ambas nuvens de pontos foram rotacionadas a partir da matriz de rotação calculada pela fatorização da matriz dos pontos levantados através do SVD, mantendo-se no eixo Y na direção de maior variação da nuvem 2D. Em seguida, foi aplicado um algoritmo de segmentação ao longo do eixo vertical da estrutura, calculando-se o centro da circunferência de cada segmento circular. A última etapa consistiu na análise angular de inclinação e deslocamentos horizontais no topo da estrutura.

4.3.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS

O levantamento dos dados foi realizado simultaneamente, utilizando-se um LST BLK360 e uma ETR TS15, ambos da fabricante Leica Geosystems. Neste foram realizadas 5 varreduras conforme a Figura 4.3.2, sendo em vermelho as posições de instalação da ETR e em azul as posições referentes ao LST. Optou-se pelo levantamento simultâneo devido a igualdade de condições meteorológicas durante os levantamentos.

Figura 4.3.2 – Localização das posições de varredura com LST e a estação total



Fonte: O autor (2022).

O planejamento da aquisição de dados buscou atender às seguintes questões: localização do instrumento, número de varreduras, resolução espacial e sistema de referência (RIVEIRO et al., 2011). Os dois primeiros tópicos são relacionados, uma vez que a definição da localização no planejamento, visa minimizar o número de varreduras ao ponto para que todo objeto seja levantado. Quanto maior

o número de varreduras, maior o volume de dados a ser pós-processado e maior o tempo para análise da estrutura.

A posição para varredura busca evitar oclusões, o que garante a cobertura total da superfície do objeto de estudo (RIVEIRO et al., 2011). Além disso, a distância máxima deve se adequar aos parâmetros de funcionamento do equipamento utilizado. Logo, para este experimento, o alcance do pulso laser do Leica BLK360 no levantamento foi inferior ao alcance máximo de 60 m do LST (LUHMANN; CHIZHOVA; GORKOVCHUK, 2020).

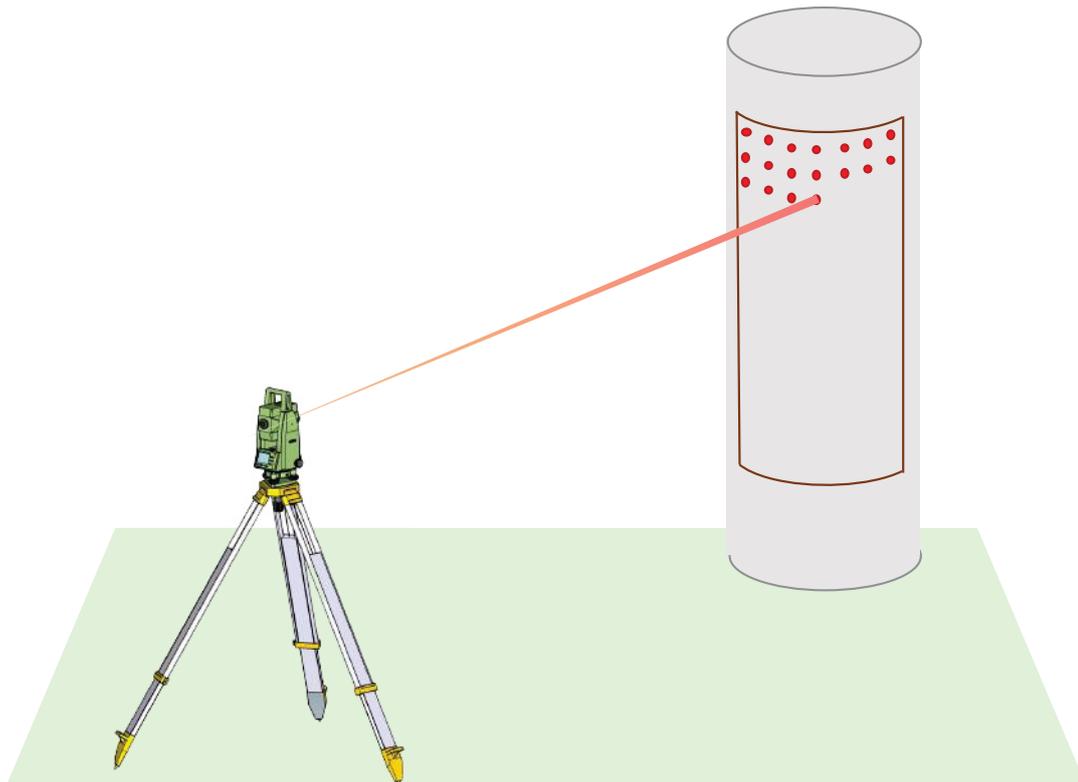
A resolução espacial da varredura laser está relacionada com o espaçamento observado entre os pontos após o levantamento. Visto que a configuração da resolução no LST contribui para o tempo de varredura e precisão dos dados, ponderou-se realizar o levantamento com BLK360 em modo de alta densidade, com a obtenção de cinco nuvens de pontos. Isto permitiu uma amostragem de pontos com a melhor qualidade posicional de acordo com a precisão nominal do equipamento para a configuração adotada. Cabe ressaltar que a precisão nominal angular do sistema laser do BLK360 é de $\pm 40''$ e linear de ± 6 mm a 10 m e ± 8 mm a 20 m (LEICA GEOSYSTEMS, 2018).

No monitoramento de estrutura, recomenda-se a utilização de um sistema de referência local para viabilizar as análises. Considerando que cada varredura com LST apresenta um sistema de referência local próprio, inicialmente optou-se por manter tais dados no referencial da primeira varredura realizada. Tal abordagem evitou a necessidade de transformar e referenciar os dados por meio de alvos, evitando assim uma etapa de determinação de coordenadas de alvos e posterior processo de transformação entre sistemas de referência.

A estação total aplicada no levantamento por varredura laser foi a TS15 da Leica Geosystems. Este equipamento possui precisão angular de $\pm 1''$ e linear de $\pm (1,0 \text{ mm} + 1,0 \text{ ppm})$ para levantamento com prisma e $\pm (2,0 \text{ mm} + 2,0 \text{ ppm})$ para levantamento sem prisma (LEICA GEOSYSTEMS, 2015). Para minimizar os erros no levantamento com a estação foi implementada uma poligonal fechada de cinco vértices com centragem forçada e observadas três séries de pares conjugados em cada estação observando as estações de ré e vante, além de usar o reconhecimento automáticos de alvos nestas posições, minimizando erros de pontaria na poligonal. Tanto as irradiações, quanto as varreduras por LST foram realizadas simultaneamente.

Conforme a Figura 4.3.3, pode-se observar que em cada vértice da poligonal foi realizada a varredura laser, através do processo de irradiação 3D, definindo-se a região na estrutura a ser levantada e o espaçamento entre os pontos. As varreduras foram realizadas posteriormente às leituras das séries da poligonal.

Figura 4.3.3 – Irradiação 3D do reservatório cilíndrico por estação total robótica



Fonte: O autor (2022).

4.3.2 PROCESSAMENTO DAS NUVENS DE PONTOS DO LST

As cinco nuvens de pontos obtidas pela varredura com BLK360 foram importadas no software Cyclone Register, no qual realizou-se o registro das mesmas. Nesta etapa, foram realizadas translação e rotação nos sistemas de referência local de cada nuvem, compatibilizando-os ao sistema de referência da primeira nuvem de pontos.

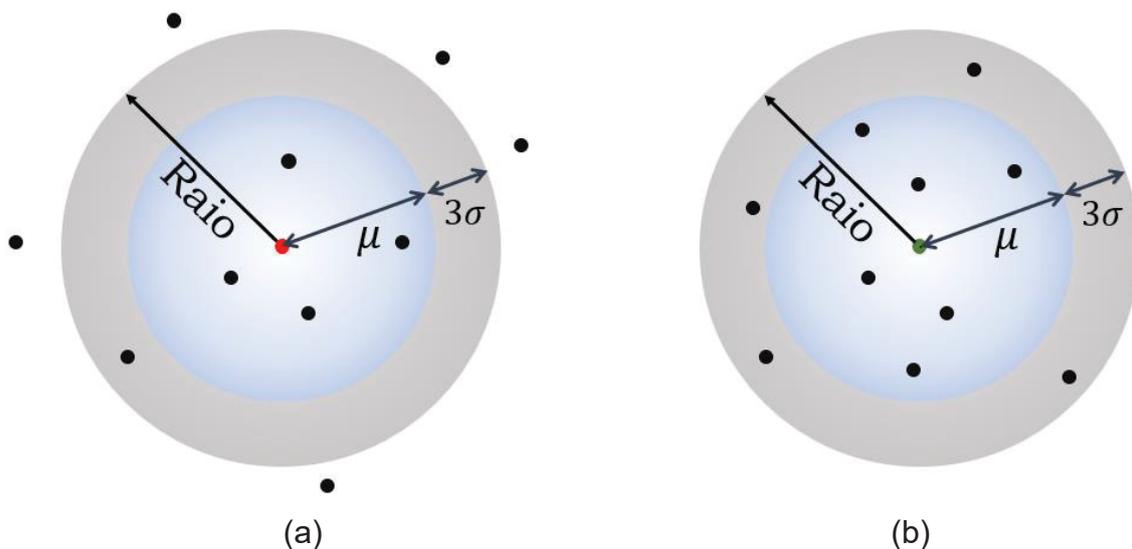
Em seguida, a nuvem registrada passou por um processo de filtragem manual, excluindo-se os pontos de elementos não pertencentes a estrutura do reservatório, como vegetações, dutos, escadas, suporte de para-raios e outros elementos, de forma que resultasse em uma nuvem com apenas pontos que representam o reservatório.

Cabe ressaltar que o BLK360 é um equipamento cuja região de varredura se dá em 360° no eixo horizontal e 270° no eixo vertical (LEICA GEOSYSTEMS, 2018), inviabilizando a determinação de uma janela de interesse para a varredura. Com isso, faz-se necessária a etapa de exclusão de elementos que não pertençam à estrutura.

A segunda filtragem foi realizada de forma automática, implementando-se um algoritmo utilizando critérios estatísticos que para retirar os pontos mais distantes dos seus vizinhos, no qual uma região esférica é construída em torno do ponto avaliado. O valor do raio da esfera é calculado com base na média das distâncias do ponto avaliado (μ) somado ao número de vezes do desvio-padrão (σ) que se deseja considerar (Figura 4.3.4). Estes dois parâmetros de entrada no código foram definidos como (OPEN3D, 2022):

- nb_neighbors – especificou-se o número de 10 vizinhos para o cálculo da distância média para cada ponto;
- std_ratio – especificou-se este parâmetro com três. Tal parâmetro multiplicou o desvio-padrão das distâncias, sendo somado a distância média para definir o tamanho do raio de avaliação do ponto.

Figura 4.3.4 – Filtragem estatística para remoção (a) ou manutenção (b) de pontos a partir do cálculo de um raio R de abrangência



Fonte: O autor (2022).

4.3.3 AJUSTAMENTO DA POLIGONAL FECHADA E VARREDURA LASER POR ESTAÇÃO TOTAL

Conforme abordado anteriormente, as varreduras laser pela ETR TS15 foram efetuadas a partir dos cinco vértices de uma poligonal fechada. Em cada posição da estação total, três séries de leituras foram realizadas de ré e vante. Os dados da poligonal foram calculados e ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), a partir do método dos correlatos (Equação 07), no qual condições foram impostas sobre as observações para a determinação do valor mais provável ao conjunto de dados levantado (GHILANI, 2018).

$$F(L_a) = F(L_b + V) = 0 \quad (07)$$

onde:

- L_a – Vetor das observações ajustadas;
- L_b – Vetor das observações;
- V – Vetor dos resíduos.

Além do ajuste das observações, o método dos correlatos deve atender às equações de condição. Sendo um caso de uma poligonal fechada, as condições checadas no ajustamento foram (ZOCOLOTTI FILHO, 2005):

- a) Fechamento angular (ε_α);
- b) Fechamento Linear na coordenada X (ε_X);
- c) Fechamento Linear na coordenada Y (ε_Y).

As equações de condição lineares para o fechamento nas coordenadas X e Y, para a poligonal de 5 vértices, tem-se (ZOCOLOTTI FILHO, 2005):

$$f_1 = \varepsilon_\alpha = (Az_{final} - Az_{inicial}) = \sum_{i=1}^{n-1} Az_i \quad (08)$$

$$f_2 = \varepsilon_X = (X_n - X'_n) = \sum_{i=1}^{n-1} (Y_n - Y_i)\alpha_i + \sum_{i=1}^{n-1} (X_j - X_i)s_{i,j} \quad (09)$$

$$f_3 = \varepsilon_Y = (Y_n - Y'_n) = \sum_{i=1}^{n-1} (X_n - X_i)\alpha_i + \sum_{i=1}^{n-1} (Y_j - Y_i)s_{i,j} \quad (10)$$

em que:

- $j = i + 1$;
- Az_i : Azimute da direção i, j no ponto i ;
- X_1, \dots, X_n : Coordenadas X calculadas;
- Y_1, \dots, Y_n : Coordenadas Y calculadas;
- X'_n, Y'_n : Coordenadas conhecidas do ponto de controle da poligonal fechada;
- α_i : Ângulo externo no ponto i ;
- $s_{i,j}$: Distância entre os pontos i e j .

O ajustamento de uma poligonal requer, no mínimo, um ponto como estação de controle como posição fixa e o azimute de uma direção para fixar a orientação angular da poligonal (GHILANI, 2018). Nesse trabalho arbitraram-se as coordenadas tridimensionais para o ponto P2 iguais a 100,000 m e o azimute da direção P2P1 igual a 90°.

A partir do modelo linearizado do método dos correlatos $BV + W = 0$, elaborou-se a matriz das derivadas parciais (B) das funções que definem as equações de condição em função das observações (ângulos e distâncias) e o vetor erro de fechamento (W). Para maiores informações consultar Dalmolin (2002), Gemael, Machado e Wandresen (2015) e Ghilani (2018).

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial f_1}{\partial s_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial s_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial f_2}{\partial s_1} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial s_n} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial f_3}{\partial s_1} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial s_n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$W = \begin{bmatrix} \varepsilon_\alpha \\ \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \end{bmatrix} \quad (12)$$

A avaliação do processo se deu pela análise da qualidade do ajustamento realizado, comparando-se do sigma a priori σ_0^2 adotado no peso do ajustamento (adotado de forma padronizada como 1) e o sigma a posteriori $\hat{\sigma}_0^2$ calculado por meio da relação $\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T_{PV}}{gt}$, sendo o valor de graus de liberdade (GEMAEI; MACHADO; WANDRESEN, 2015). A partir do teste hipotético baseado na distribuição Qui-

Quadrado (Equação 13), comparou-se o valor da estatística calculada ($\chi^2_{calculado}$) (Equação 14) com os valores críticos ($\chi^2_{gl,\frac{\alpha}{2}}$, $\chi^2_{gl,1-\frac{\alpha}{2}}$). Aceita-se a hipótese nula, ou seja, os dois valores podem ser considerados estatisticamente iguais se a relação estabelecida pela Equação 15 for obedecida, sendo o nível de significância estipulado para o teste adotado como $\alpha = 1\%$.

$$\begin{cases} H_0: \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2 \\ H_1: \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2 \end{cases} \quad (13)$$

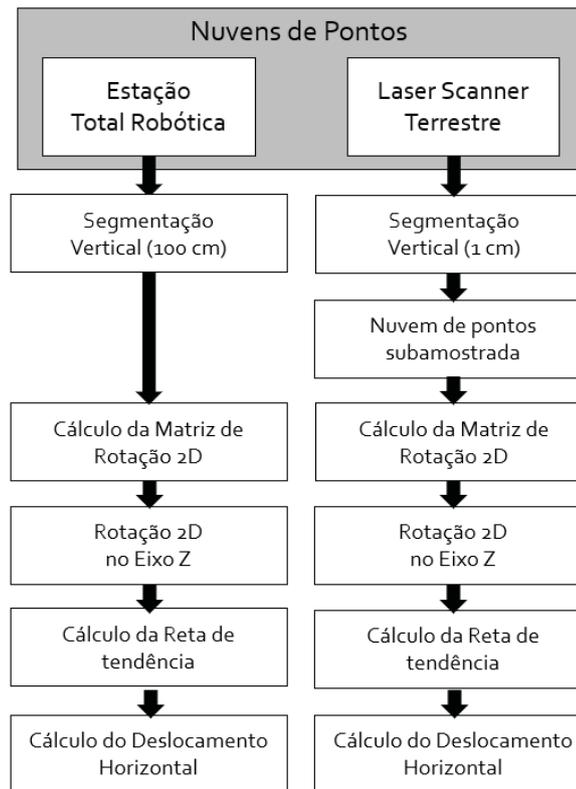
$$\chi^2_{calculado} = \frac{V^T P V}{\sigma_0^2} \quad (14)$$

$$\chi^2_{gl,\frac{\alpha}{2}} < \chi^2_{calculado} < \chi^2_{gl,1-\frac{\alpha}{2}} \quad (15)$$

4.3.4 ANÁLISE DA VERTICALIDADE

Após a aquisição e processamento dos dois conjuntos de dados, prosseguiu-se com a análise da verticalidade baseada nas duas nuvens de pontos. Apesar de ambos os dados possuírem a mesma forma de representação, tratam-se de amostras com densidades distintas. Para viabilizar as análises, adaptações foram aplicadas nas etapas do cálculo da matriz de rotação da nuvem de pontos levantada pelo LST e no parâmetro definidor da altura do segmento da nuvem de pontos levantada pela estação total (Figura 4.3.5).

Figura 4.3.5 – Etapas para análise da verticalidade por nuvens de pontos



Fonte: O autor (2022).

4.3.4.1 Cálculo e Aplicação da Matriz de Rotação 2D

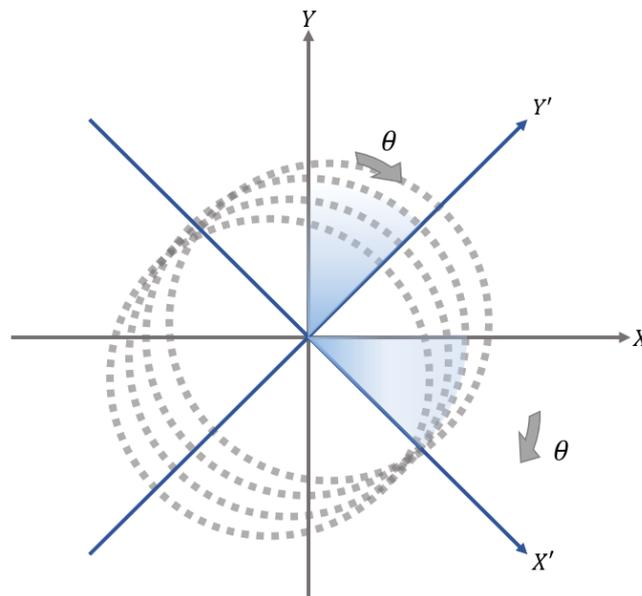
Conforme indicado preliminarmente, as nuvens de pontos encontravam-se em sistemas de referência com origem e orientação distintos. A utilização de alvos artificiais ou naturais dos locais e objetos levantados é uma alternativa aplicada na materialização de referenciais em nuvens de pontos. O ideal é que estes alvos sejam distribuídos ao longo da estrutura modelada, o que não seria possível neste caso, assim optou-se pela não utilização dos mesmos.

Porém, a comparação verticalidade da estrutura entre duas amostras em sistemas com orientações distintas inviabilizaria a comparação direta entre os deslocamentos observados nas nuvens de pontos provenientes das varreduras por LST e pela técnica topográfica.

Tratando-se de uma estrutura onde a altura é maior que sua largura, entendeu-se que existiria uma direção predominante do eixo vertical, caso haja algum deslocamento, este resultado é a da direção de inclinação da estrutura. Logo, em ambos os dados, existiria uma direção de maior variação do eixo.

Assim, utilizou-se o conceito abordado na Decomposição em Valores Singulares (*Singular Value Decomposition* – SVD) para investigar e definir a direção de maior variação 2D dos dados, ou seja, as direções horizontais de inclinação dadas pelas coordenadas X e Y dos centros das circunferências nos sistemas de referência original de cada nuvem de pontos. Uma das matrizes presentes na SVD é a matriz de rotação que corresponde ao ângulo entre o eixo do sistema de referência original da nuvem de pontos e o eixo de maior variação dos dados (Figura 4.3.6).

Figura 4.3.6 – Ângulo de rotação θ entre os eixos do sistema de referência original (X, Y) e os eixos de maior variação dos dados na nuvem de pontos 2D (X', Y')



Fonte: O autor (2022).

Portanto, com base nas coordenadas X e Y das nuvens de pontos, aplicou-se o SVD para determinar a matriz de rotação entre os eixos. No código elaborado em linguagem Python foram utilizadas as bibliotecas Open3D, para manipulação das nuvens de pontos e a biblioteca Numpy, da qual foi aplicada a rotina `numpy.linalg.svd`. Esta rotina da álgebra linear permitiu a fatoração da matriz A de dimensão (m x n), que corresponde a nuvem de pontos 2D importada, retornando os elementos (NUMPY, 2022):

- U – Matriz ortogonal quadrada (m x m);
- S – Vetor (n x 1) com os valores singulares da matriz A, dentro de cada vetor ordenado em ordem decrescente;

- Vh – Matriz ortogonal quadrada ($n \times n$) de rotação entre os eixos do sistema de referência inicial e os eixos ortogonais de maior variação dos dados.

Neste estudo, considerando que a matriz de rotação a ser calculada foi baseada nas coordenadas X e Y, a Matriz A inserida foi de dimensão ($np \times 2$), em que np representa o número de pontos da nuvem. Logo, a matriz de rotação Vh gerada foi de dimensão (2×2) (Equação 16).

$$Vh = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Os dados levantados representam tridimensionalmente a estrutura e buscou-se analisar a verticalidade do reservatório, foi implementada a rotação aos dados, mantendo-se a fixo o eixo das coordenadas Z do sistema de referência original e após a aplicação da rotação. Sendo assim, a matriz Vh calculada para rotação 2D foi expandida conforme para rotação 3D, conforme a Equação 17:

$$Vh_{3D} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & 0 \\ v_{21} & v_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Com a matriz 3D, utilizou-se a ferramenta *rotate* da biblioteca Open3D. Entretanto, necessita-se o estabelecimento da origem da rotação, a qual foi definida como o centro da região da base da nuvem de pontos, a princípio o ponto com menor variação em inclinação. Para tal, foram calculadas as coordenadas médias de X e Y dos pontos contidos na região compreendida entre 0 e 20 cm de altura da nuvem de pontos.

Cabe destacar que, devido às limitações relativas ao custo computacional, a aplicação direta da técnica SVD ao volume de dados do levantamento LST se tornou inviável. Assim, foi necessária a adaptação dos dados por meio da subamostragem ou compressão da nuvem, o que reduz o número de pontos a serem importados como a matriz A de entrada no código.

A nuvem de pontos subamostrada foi gerada por meio a redução da quantidade de pontos na nuvem original, aplicando-se decomposição ou particionamento através de *Octree* no software CloudCompare. Tal método permite a

redução da resolução em *voxels*, com a subdivisão da nuvem por níveis hierárquicos que especifica o critério de parada de decomposição. Assim, a nuvem de pontos a nuvem de pontos pode ser subamostrada preservando-se o ponto central de cada *voxel* (MEAGHER, 1982; SANTOS, 2020).

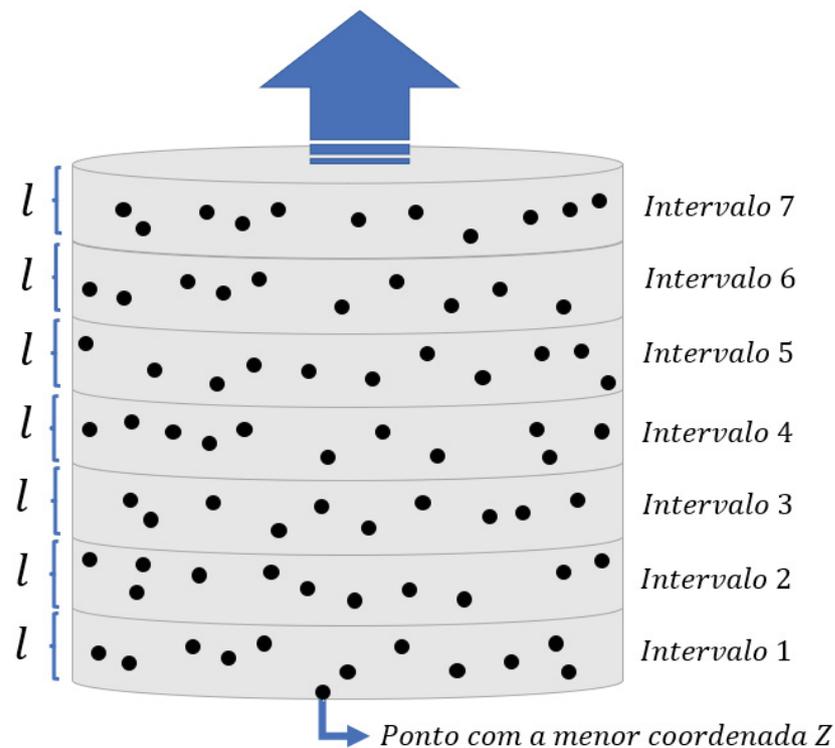
Neste estudo, o nível hierárquico da *Octree* foi definido como 8 de forma empírica. Tal nível viabilizou a redução do número de pontos e proporcionou o cálculo da matriz de rotação a partir do SVD. A nuvem de pontos obtida pela varredura com estação total não houve a necessidade de passar pelo processo de redução, uma vez que a nuvem apresenta uma densidade de pontos inferior em relação à varredura com LST.

4.3.4.2 Segmentação pelo Eixo Vertical

Visando a posterior análise baseada no eixo vertical da estrutura, aplicou-se a segmentação da nuvem de pontos proposta em Alves et al. (2022). Tal segmentação foi desenvolvida em código na linguagem Python, em que se utilizou as bibliotecas NumPy e Open3D.

Além da entrada da nuvem de pontos, outro parâmetro definido no código é a altura do segmento circular desejado. Conforme a Figura 4.3.7, o valor da altura do segmento (l) definiu os intervalos a partir do menor valor da coordenada Z presente a nuvem de pontos importadas.

Figura 4.3.7 – Segmentação da nuvem de pontos cilíndrica a partir da coordenada Z de menor valor



Fonte: O autor (2022).

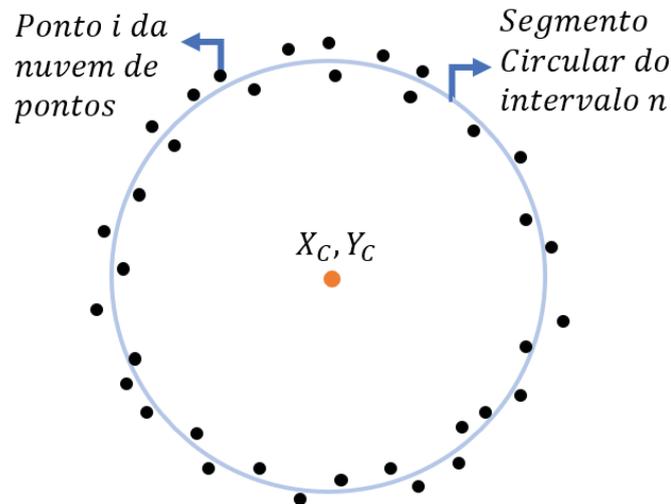
Tendo em vista que as varreduras foram realizadas por equipamentos com operacionalidades distintas, o parâmetro relativo à altura do segmento foi definido considerando a quantidade mínima de 3 pontos necessárias para o ajuste da circunferência. Para os dados derivados da varredura por LST, altura do segmento foi definida em 1,0 cm, conforme Alves et al., (2022). Já a altura para a varredura derivada da estação total, definiu-se l como 100 cm, favorecendo com que todos os segmentos possuísem pelo menos 3 pontos para o cálculo do centro do segmento.

4.3.4.3 Deslocamento Horizontal

A análise do deslocamento horizontal ao longo da estrutura, a partir das varreduras realizadas, fundamentou-se da definição de um segmento reto que representasse o eixo central do reservatório. Para tal, os dados contidos em cada segmento extraído na etapa anterior foram parametrizados considerando a figura geométrica de uma circunferência. Sendo assim, a partir das coordenadas X e Y de

cada ponto, forma calculados os parâmetros referentes aos centros das circunferências, X_c e Y_c (Figura 4.3.8).

Figura 4.3.8 – Cálculo do centro da circunferência (X_c, Y_c) do intervalo n



Fonte: O autor (2022).

O ajuste clássico de uma circunferência pelos mínimos quadrados visa o cálculo da distância mínima entre os pontos observados e a circunferência que melhor se ajusta a amostra dada. Com isso, são determinados os parâmetros X_c, Y_c e R que descrevem uma circunferência no plano (Kasa, 1976; Chernov, 2011; Abdul-Rahman; Chernov, 2013) (Equação 18).

$$F(X_c, Y_c, R) = \sum_{i=1}^n \left[\sqrt{(X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2} - R \right]^2 \rightarrow \text{mínimo} \quad (18)$$

onde:

- X_c, Y_c - Coordenadas do centro da circunferência ajustada;
- X_i, Y_i - Coordenadas dos pontos levantados (nuvem de pontos);
- R – Raio da circunferência ajustada.

Neste estudo, o vetor observações para ajuste da circunferência foi elaborado a partir das coordenadas 2D (X, Y) da nuvem para cada segmento. Para o cálculo dos centros das circunferências foi adotado o método algébrico de Kasa (1976), considerado método eficiente pela simplicidade e rapidez na parametrização (NURUNNABI; SADAHIRO; LAEFER, 2018). Tal fato viabilizou o ajuste dos segmentos circulares gerados pela varredura por LST, visto que a taxa de aquisição

do BLK360 é de 360 mil pontos por segundo, resultando em um volume de dados significativamente maior do que o levantamento realizado pela estação total (Equação 19).

$$\begin{aligned}
 F(X_C, Y_C, R) &= \sum_{i=1}^n [X_i^2 + Y_i^2 - 2X_C X_i - 2Y_C Y_i + X_C^2 + Y_C^2 - R^2]^2 \\
 &= \sum_{i=1}^n [d_i^2 - R^2]^2
 \end{aligned} \tag{19}$$

onde $d_i = \sqrt{(X_i - X_C)^2 + (Y_i - Y_C)^2}$ e $[d_i^2 - R^2]$ é definido como a distância algébrica entre os pontos levantados e a circunferência parametrizada. Na solução pelo método algébrico e não iterativo de Kasa (1976), os parâmetros são modificados (Chernov, 2011; NURUNNABI; SADAHIRO; LAEFER, 2018) (Equação 20, 21, 22, 23 e 24):

$$B = -2X_C \tag{20}$$

$$C = -2Y_C \tag{21}$$

$$D = X_C^2 + Y_C^2 - R^2 \tag{22}$$

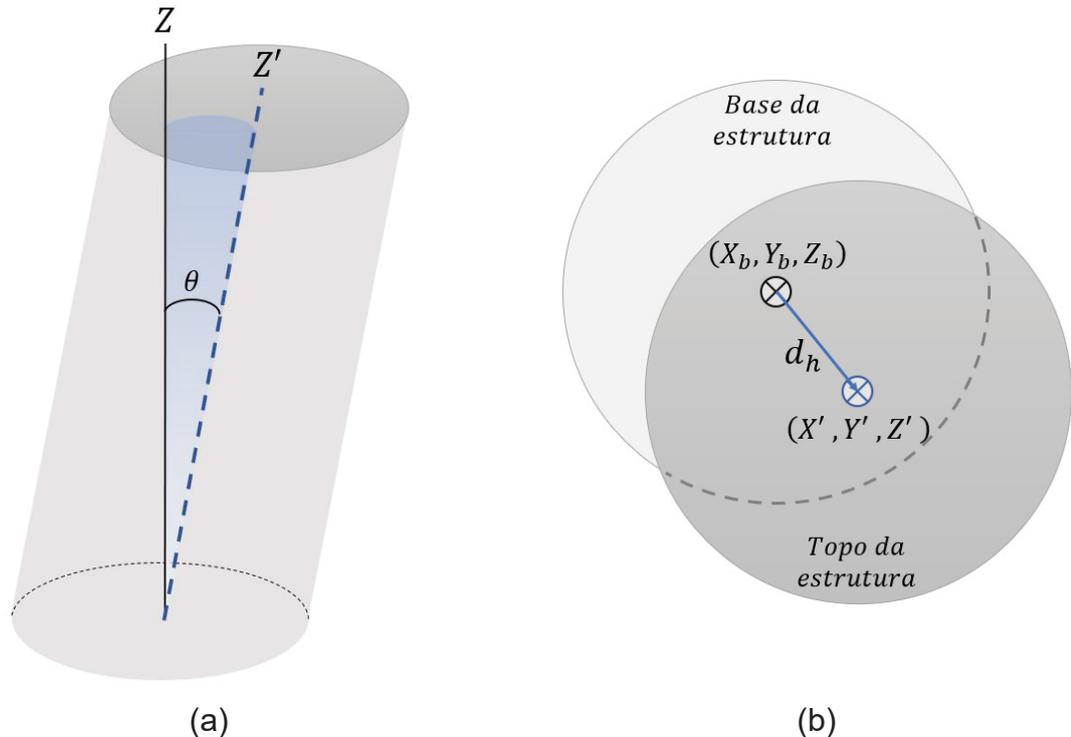
$$z_i = X_i^2 + Y_i^2 \tag{23}$$

$$F = \sum_{i=1}^n [z_i + BX_i + CY_i + D]^2 \tag{24}$$

em que $z_i = X_i^2 + Y_i^2$ e a solução é dada pelo sistema de equações lineares. Maiores informações disponíveis em Kasa (1976) e Chernov (2011). O algoritmo para esta etapa foi desenvolvido em linguagem Python e está disponível Alves (2022)..

De posse dos centros das circunferências para os dois conjuntos de dados, definiu-se a linha que interliga os parâmetros X_C e Y_C de cada intervalo segmentado, gerando-se assim o eixo da estrutura cilíndrica. Elaboram-se gráficos de linha a fim de serem verificadas as variações das coordenadas X e Y e o deslocamento horizontal resultante em relação ao eixo vertical. Adicionalmente, foram aplicadas regressões lineares aos gráficos gerados e determinado o coeficiente angular da reta ajustada à esta linha do eixo. Baseado no coeficiente angular, obteve-se o ângulo de inclinação da estrutura (θ) e calculou-se o deslocamento horizontal (d_h) entre a reta de regressão e a reta perpendicular à base do reservatório no topo da estrutura (Figura 4.3.9).

Figura 4.3.9 – Ângulo de Inclinação do reservatório baseado no coeficiente angular (a) e o deslocamento horizontal no topo da estrutura (b)



Fonte: O autor (2022).

O deslocamento horizontal no topo da estrutura é dado por (Equação 25):

$$d_h = (Z_n - Z_1) \tan \theta \quad (25)$$

4.4 RESULTADOS

O levantamento por varredura com ETR resultou em 5 nuvens de pontos, totalizando 3.100 pontos. A poligonal elaborada para o levantamento, adotando-se a estação 2 como ponto inicial, foi ajustada e o resultado avaliado conforme o teste de hipótese de igualdade entre o sigma a priori e a posteriori. Os resultados do ajustamento da poligonal e as estatísticas de teste calculadas estão indicadas na Tabela 4.4-1.

Tabela 4.4-1 – Erro angular, erro linear e estatísticas de teste do ajustamento da

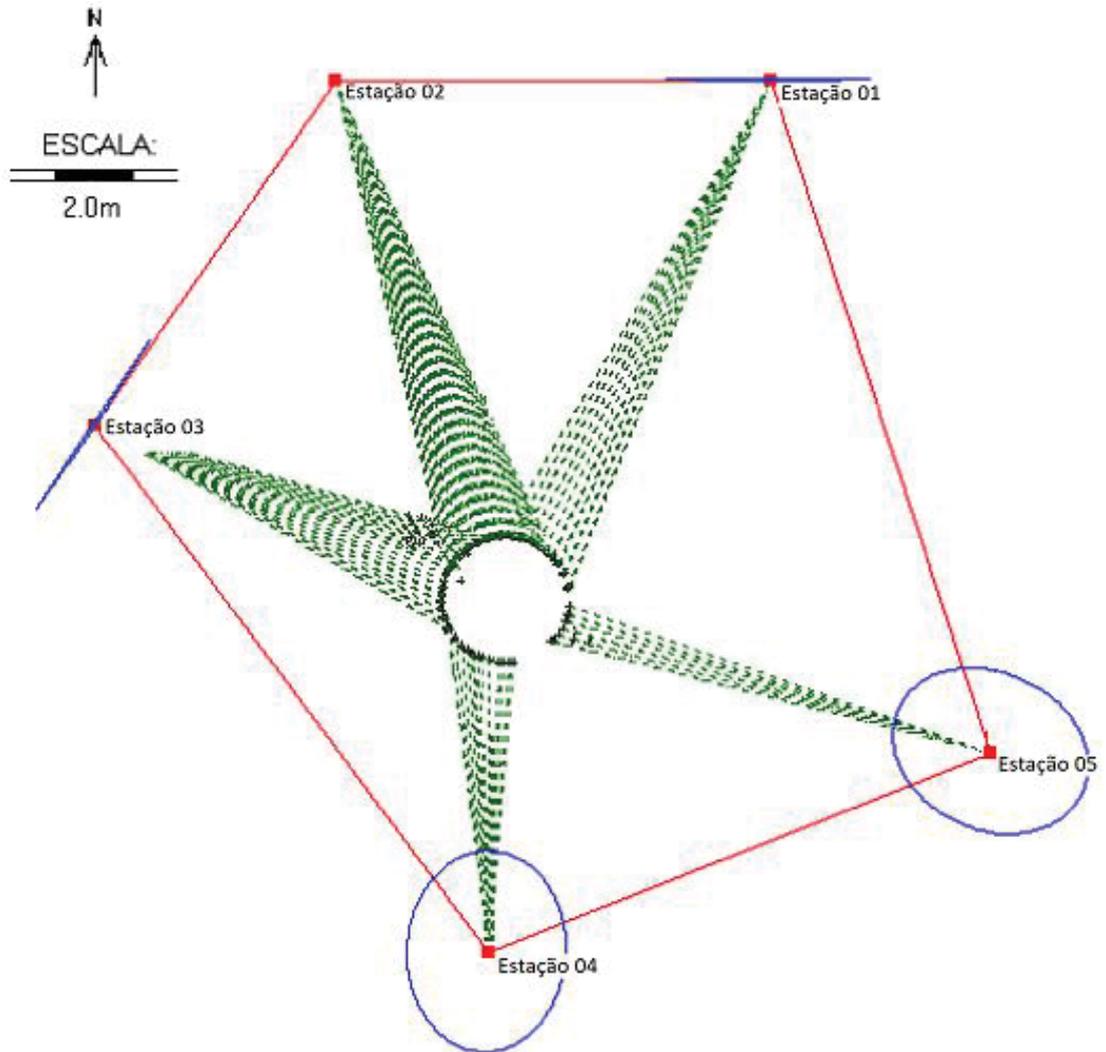
Erro Angular	0°00'04''
Erro linear	1,7 mm
Siga a posteriori	0,356
$\chi^2_{calculado}$	1,07

Fonte: O autor (2022).

Considerando o nível de significância adotado como $\alpha = 1\%$ e o grau de liberdade igual a 3, as estatísticas tabeladas para o teste Qui-Quadrado foram $\chi^2_{gl, \frac{\alpha}{2}} = 0,07$ e $\chi^2_{gl, 1-\frac{\alpha}{2}} = 12,84$. Sendo o valor de $\chi^2_{calculado}$ dentro do intervalo estipulado, aceita-se a hipótese nula de igualdade entre o sigma a priori (igual a um) e o sigma posteriori. Com isso, considerou-se que não houve erros grosseiros, erros sistemáticos ou problemas no modelo funciona aplicado ao ajustamento das observações, uma vez que a diferença entre os dois valores não foi considerada estatisticamente significativa.

Na Figura 4.4.1 são ilustrados os campos de varredura em cada estação, bem como as respectivas elipses de erro. Na Tabela 4.4-2 são apresentados os parâmetros do semi-eixo maior, semi-eixo menor e a direção azimutal do semi-eixo maior. Observe-se que os valores dos eixos das semi elipses foi inferior a 1mm.

Figura 4.4.1 – Poligonal ajustada e campos de varredura por estação



Fonte: O autor (2022).

Tabela 4.4-2 – Semi-eixo maior e semi-eixo menor das elipses de erro

Estação	Semi-eixo Maior (m)	Semi-eixo Menor (m)	Direção Azimutal
01	0,0005	0,0000	90°00'00"
03	0,0005	0,0000	34°36'55"
04	0,0005	0,0004	02°38'49"
05	0,0005	0,0004	115°27'20"

Fonte: O autor (2022).

Conforme observado na Figura 4.4.1, uma região da superfície da estrutura, entre as varreduras da Estação 04 e 05, não foi levantada visto que nesta área localiza-se uma escada de acesso aos pavimentos do reservatório. Sendo assim,

buscou-se evitar que erros sistemáticos do levantamento interferissem na avaliação dos dados, como o efeito de borda.

Paralelamente, a aquisição de dados e registro das varreduras por LST resultou em uma nuvem com 5.210.567 de pontos. De posse destes dados, aplicou-se a filtragem automática na varredura por LST, resultando em uma nuvem contendo 4.443.719 pontos. A Figura 4.4.2 ilustra os pontos mantidos (cinza) e os pontos removidos (vermelho) na nuvem registrada.

Figura 4.4.2 – Filtragem automática da nuvem de pontos com remoção de outliers (pontos vermelhos)



Fonte: O autor (2022).

Pode-se observar que a região do topo da nuvem de pontos concentrou maior quantidade de pontos removidos. Tal efeito decorre do aumento da distância e do aumento do ângulo vertical de visada para os pontos, resultando em erros propagados de maior magnitude quando comparado às demais regiões levantadas. Erros nas medidas aumentam a dispersão dos dados em relação aos pontos vizinhos, aumentando as chances de remoção pela filtragem aplicada.

Com base nos dados ajustados da varredura por ETR e da nuvem de pontos registrada e filtrada da varredura pelo LST, realizou-se a etapa de rotação 2D dos

sistemas de referência. Para o caso da nuvem de pontos do LST, foi aplicada a etapa de subamostragem da nuvem de pontos para cálculo da matriz de rotação. Aplicando-se o método *Octree* pelo nível 8, foi obtida uma nuvem de 36.116 pontos.

A partir dos dados da varredura pela ETR e da nuvem subamostrada da varredura LST, foram extraídas a nuvem 2D com as coordenadas X e Y dos pontos. Aplicando-se a fatorização da matriz da nuvem de pontos 2D por SVD, as matrizes de rotação dos autovetores da primeira e segunda componente principal foram calculadas. Por conseguinte, obteve-se o ângulo de rotação entre o eixo de referência original e os eixos de maior variação (Tabela 4.4-3).

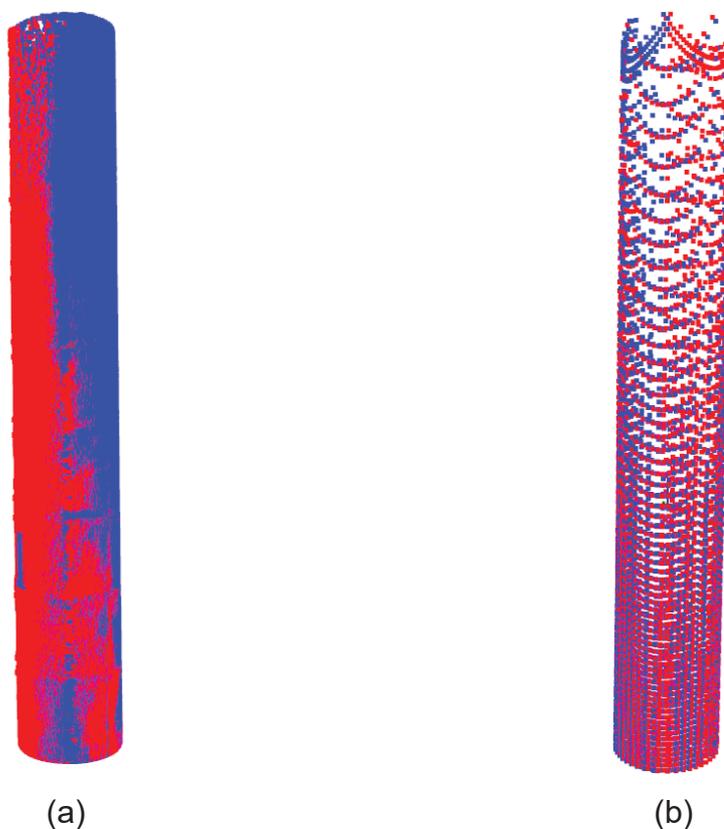
Tabela 4.4-3 – Ângulos calculados para rotação entre os sistemas de referência

Nuvem de Pontos	Ângulo de Rotação
LST	41,16°
Estação Total	39,55°

Fonte: O autor (2022).

As nuvens de pontos foram rotacionadas em seu eixo Z, de modo que o eixo Y do sistema de referência da varredura pela estação total e pelo LST fossem orientados para direção de máxima inclinação da estrutura. As nuvens de pontos no sistema de referência do levantamento em vermelho e em azul a nuvem de pontos após a rotação são apresentadas na Figura 4.4.3.

Figura 4.4.3 – Nuvens de ponto levantadas a partir da varredura pelo LST (a) e ETR (b) originais (vermelho) e rotacionadas (azul)

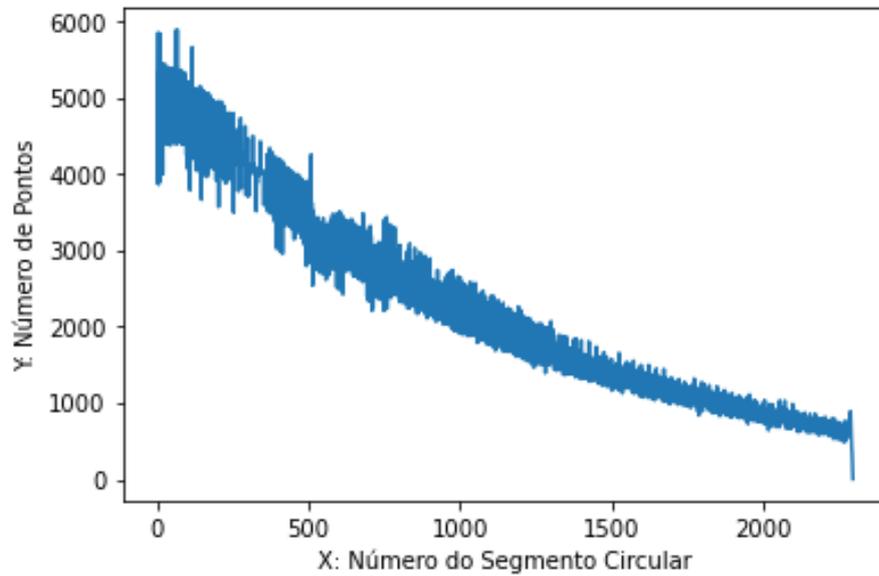


Fonte: O autor (2022).

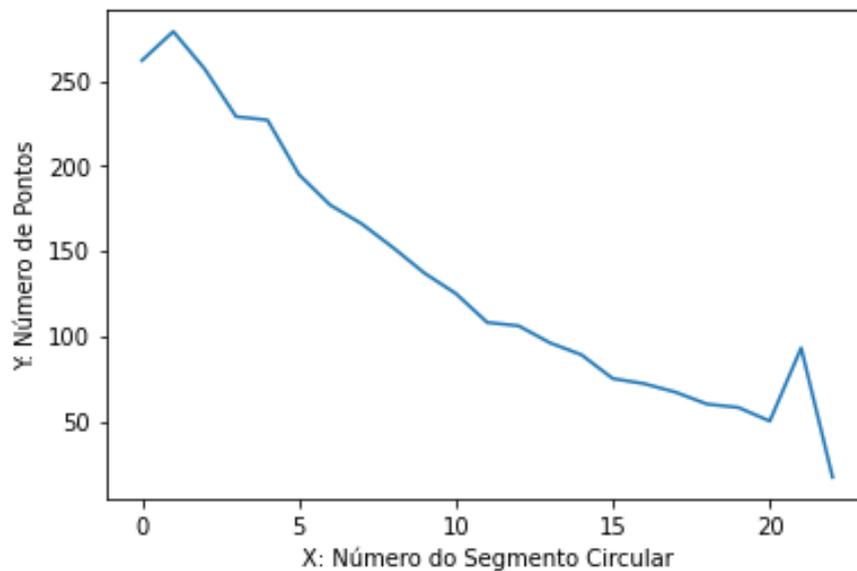
Conforme Figura 4.4.3, pode-se constatar que em ambas as nuvens de pontos ocorreu a rotação. Para o levantamento a partir da estação total, a densidade menor da nuvem no topo da estrutura permite a identificação visual de sequências de pontos rotacionadas em torno do eixo Z. Na Figura 14-a, a alta densidade torna a nuvem com aparência contínua e, por conseguinte, torna-se perceptível que a rotação promove um deslocamento da nuvem vermelha em relação à original em azul, sobretudo na região próxima ao topo do reservatório.

Posteriormente, efetuou-se a segmentação nas duas nuvens de pontos. A aplicação do algoritmo na varredura por LST com intervalo de 1,0 cm resultou em 2269 segmentos circulares. O intervalo de 100 cm para a varredura pela estação total extraiu 22 segmentos da nuvem de pontos. A quantidade de pontos por segmento, bem como sua variação, pode ser avaliada na Figura 4.4.4.

Figura 4.4.4 – Variação da quantidade de pontos por segmento circular extraído da varredura por LST (a) e pela estação total (b)



(a)



(b)

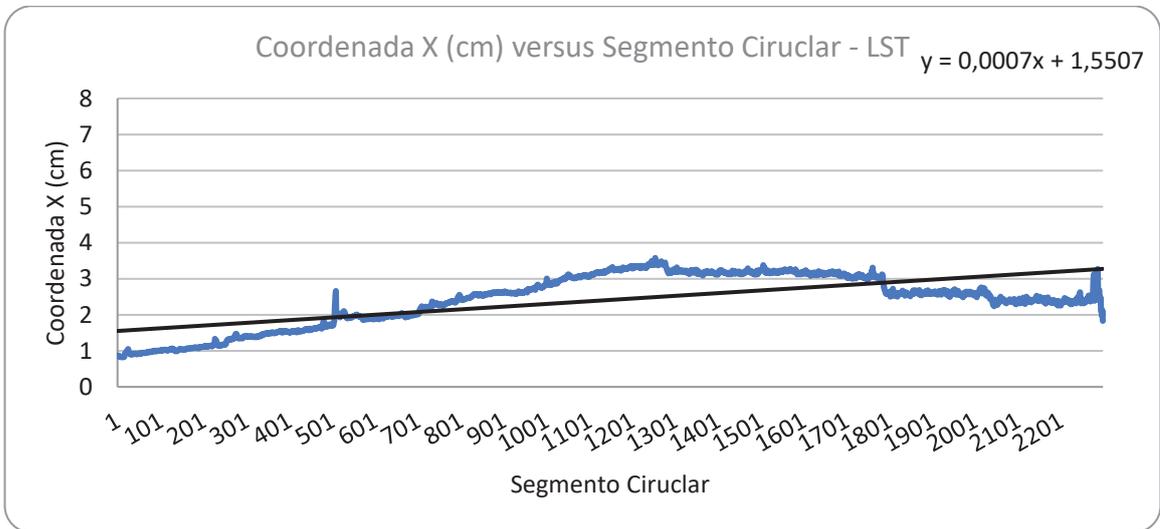
Fonte: O autor (2022).

De acordo com os gráficos na Figura 4.4.4, verificou-se a diminuição da quantidade de pontos por segmento circular em razão do aumento da altura, ou seja, do ângulo vertical levantado. Em ambos os levantamentos, o intervalo angular vertical e, conseqüentemente, da distância entre os equipamentos e a superfície do reservatório tornaram a nuvem mais espaçada na região próxima ao topo. Com isso, quanto mais alto o segmento circular extraído, menos pontos contidos foram

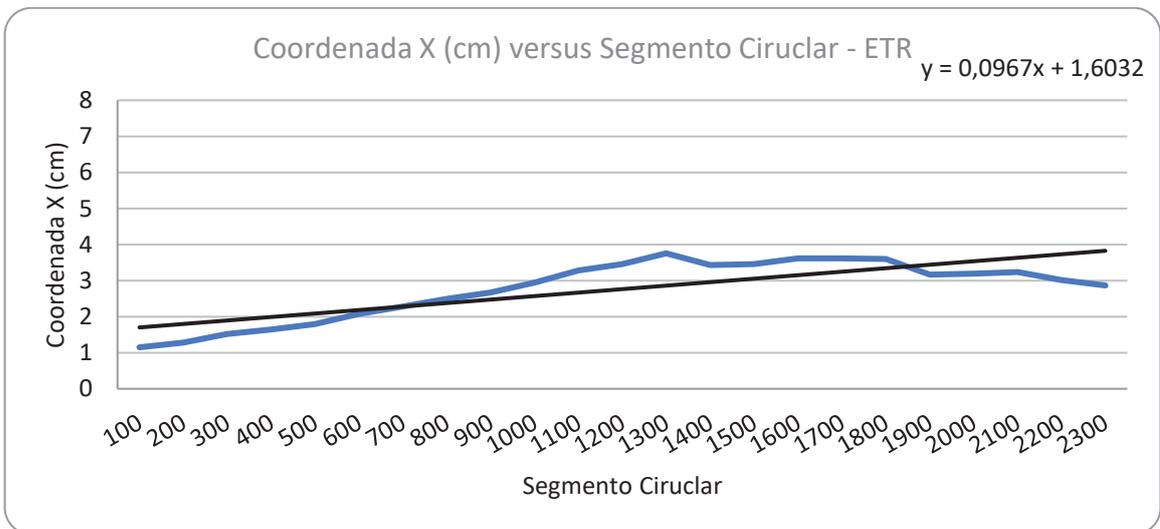
contabilizados. Adicionalmente, cabe destacar que todos os segmentos contêm pontos suficientes para o cálculo dos parâmetros que definem as circunferências. Logo, os intervalos definidos para a segmentação foram adequados para viabilizar a posterior parametrização dos dados.

Apoiado nos dados segmentados e na parametrização dos centros das circunferências, na Figura 4.4.5 são apresentadas as variações das coordenadas X_c e Y_c ao longo do eixo Z. Complementarmente, delineou-se a linha de regressão das variações das coordenadas para a abordagem com LST e com ETR.

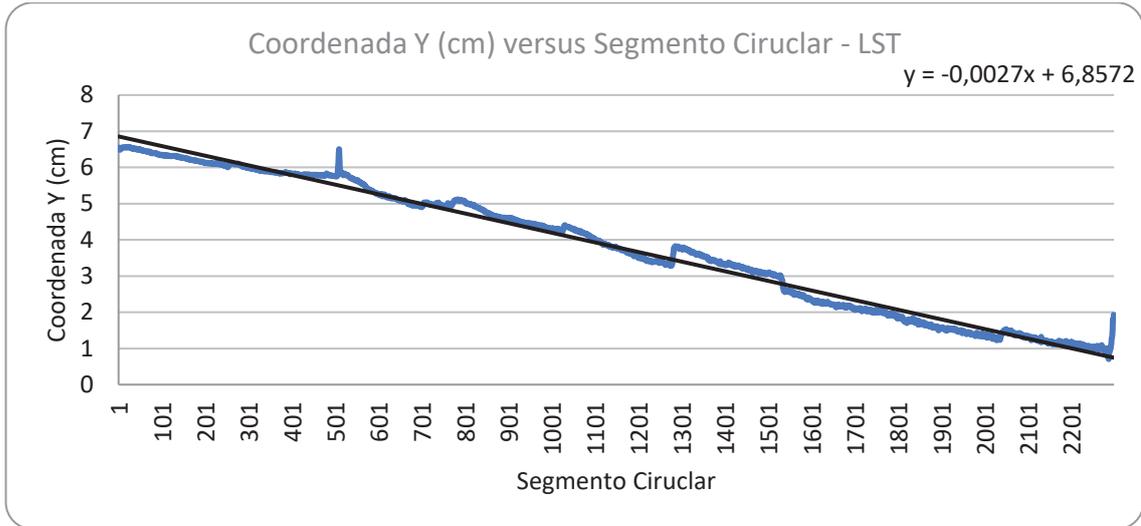
Figura 4.4.5 – Variações das coordenadas dos centros das circunferências calculadas pela varredura por LST (a)(c) e pela ETR (b)(d)



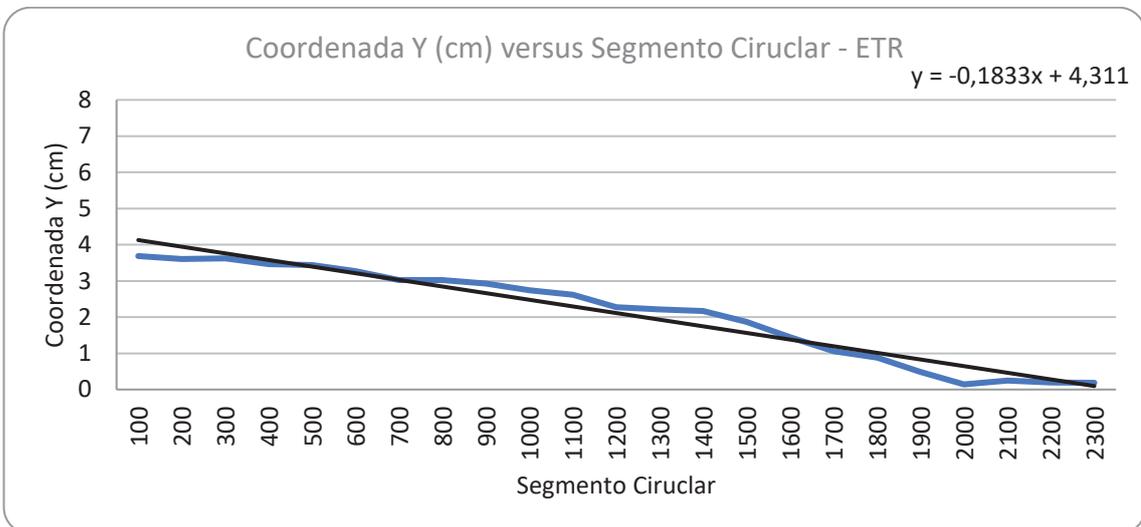
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: O autor (2022).

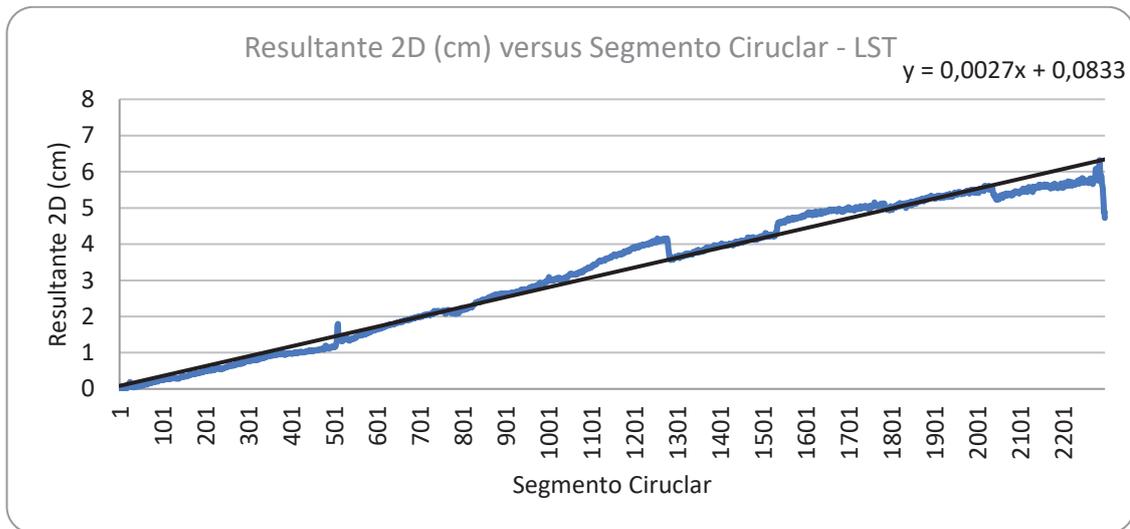
A partir dos gráficos apresentados acima, constata-se que a variação maior das coordenadas foi para a componente Y, indicando que aplicação da rotação 2D permitiu direcionar o eixo Y para direção de maior variação em ambos os casos. As curvas de variações nas coordenadas obtidas pela abordagem com ETR apresentaram aspectos mais suavizados quando comparados ao LST. Para o caso do LST, assinalou-se maior sensibilidade para a determinação da circunferência por meio de deslocamentos ruidosos ao longo do eixo analisado.

Paralelo a isso, identificou-se um comportamento similar para variação entre as coordenadas X e Y dos levantamentos com LST e ETR, em que as retas de tendência indicam não apenas a existência de uma inclinação, como também inclinações

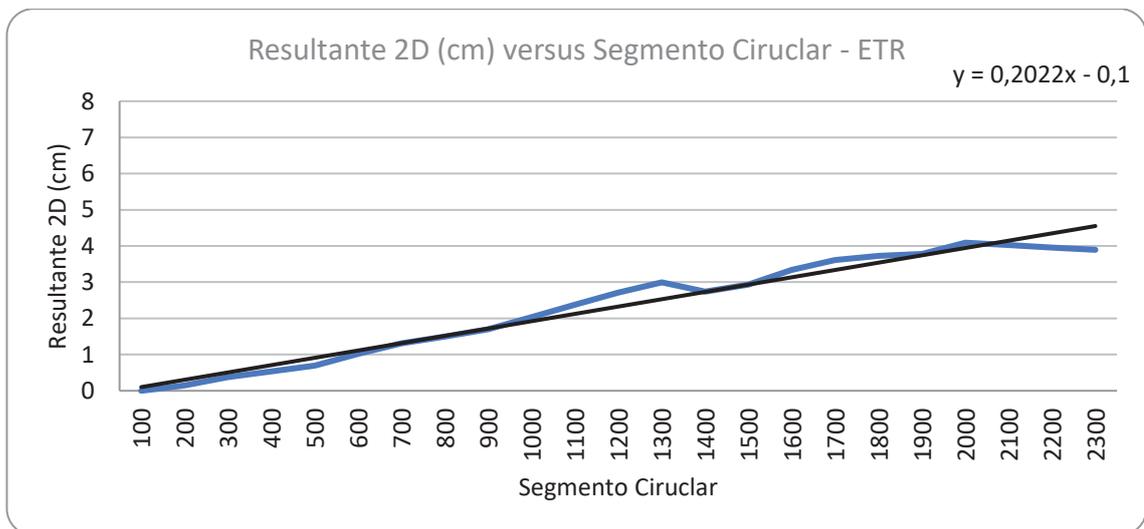
similares em ambos os eixos. Todavia, para as coordenadas Y o LST obteve-se um deslocamento maior, variando de aproximadamente 6,5 cm a 1,0 cm, enquanto com a ETR obteve-se uma variação de 3,7 cm a 0,2 cm.

Com base nos resultados anteriores, calculou-se e plotou-se a resultante das 2D para a variação das coordenadas X e Y (Figura 4.4.6).

Figura 4.4.6 – Variação do deslocamento resultante 2D do reservatório pela varredura por LST (a) e pela ETR (b)



(a)



(b)

Fonte: O autor (2022).

Os gráficos dos deslocamentos resultantes também apresentaram comportamento similares, com regiões de picos e crescimento das coordenadas

conforme aumenta-se a altura do segmento circular parametrizado. As retas de tendências geradas reforçam a indicação de inclinação da estrutura em relação ao eixo de referência da verticalidade.

Entretanto, assim como observado na análise das coordenadas Y, a variação máxima para o levantamento com LST foi de aproximadamente 6,1 cm, contra 4,0 cm para a abordagem com ETR. Tal divergência pode ser oriunda da simplificação gerada no aumento da altura dos segmentos extraído da varredura por ETR, o que minimizaria a inclinação próxima ao topo, bem como da diferença de precisão entre os equipamentos empregados para a coleta de dados.

Em contrapartida, considerando a diferença da precisão nominal angular e linear entre os dois equipamentos, os pontos levantados pelo LST próximos ao topo possuem precisões menores. Sendo assim, a dispersão dos pontos no topo da caixa d'água é maior para a nuvem de pontos obtida com LST, o que pode ter expandido a circunferência parametrizada no topo da estrutura em relação à nuvem obtida pela varredura com a ETR, resultando em deslocamentos maiores.

Apoiando-se na reta de regressão calculada e, conseqüentemente, no coeficiente angular da reta em relação ao eixo de altura do segmento, na Tabela 04 são apresentados os valores dos ângulos de inclinação calculados. Com base neles, foram obtidos os valores das inclinações horizontais no topo da estrutura no plano paralelo aos eixos X e Y, considerando a altura entre a maior e menor coordenadas Z igual a 22,6 m.

Tabela 4.4-4 – Ângulos de inclinação do eixo da estrutura e deslocamentos horizontais no topo do reservatório

Nuvem de Pontos	Ângulo de Inclinação	Deslocamento Horizontal (cm)
LST	9' 21"	6,15
ETR	6' 57"	4,56

Fonte: O autor (2022).

Os ângulos de inclinação corroboram com a indicação da existência de inclinação da estrutura observada nos gráficos anteriores. Ademais, por meio da Tabela 04 se reforçou a indicação de inclinação 2,41' maior a partir da nuvem de

pontos levantada pelo LST. No entanto, apesar dos valores distintos para o deslocamento horizontal no topo, as grandezas calculadas foram de acordo com a magnitude da inclinação identificadas anteriormente tanto no deslocamento resultante 2D, quanto no deslocamento de maior variação obtido na direção do eixo Y.

4.5 CONCLUSÃO

As nuvens de pontos levantadas tanto pela varredura com Laser Scanner Terrestre, quanto pela Estação Total Robótica, viabilizaram a representação geométrica tridimensional da estrutura. Apesar da precisão nominal superior da ETR, o tempo para execução do levantamento superou de forma significativa o necessário para o LST. Além disso, o LST favoreceu a captura da realidade da estrutura superior à ETR, com amostragem de pontos maior. Conseqüentemente, o detalhamento do reservatório foi melhor com LST, porém menos preciso.

Entretanto, o processamento das varreduras por LST demandaram maior tempo e desempenho computacional, devido ao volume de dados. Neste sentido, a metodologia de Kasa para parametrização das circunferências viabilizou a determinação das coordenadas dos centros de modo rápido.

A segmentação dos dados ao longo da vertical favoreceu o cálculo do eixo da estrutura em diferentes alturas, com ênfase para a análise realizada através da nuvem de pontos levantada com o LST, a qual viabilizou a definição do eixo de forma contínua. A adaptação da segmentação para os dados obtidos pela ETR possibilitou o cálculo das coordenadas dos centros de cada segmento, porém tal abordagem não proporcionou o grau de detalhamento obtido a partir dos dados da varredura pelo LST.

A aplicação da técnica SVD possibilitou a rotação dos dados com base no eixo Z. Com isso, a comparação direta do comportamento da estrutura ao longo de diferentes alturas foi viabilizada, observando-se as maiores variações na direção do eixo Y.

Para ambas as abordagens de levantamento das nuvens de pontos, foram constatadas as inclinações por meio das nuvens de pontos geradas. As diferenças observadas entre as inclinações, bem como no deslocamento original indicam que apesar da precisão nominal superior da ETR, a amostragem densa e de aparência contínua ao longo da estrutura pela varredura com LST é viável e fornece maior detalhamento das variações horizontais do reservatório ao longo do eixo vertical.

REFERÊNCIAS

ABDUL-RAHMAN, H.; CHERNOV, N. Fast and Numerically Stable Circle Fit. *Journal Of Mathematical Imaging and Vision*, v. 49, n. 2, p. 289-295, 7 set. 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s10851-013-0461-4>

AL-SHARADQAH, Ali. Further statistical analysis of circle fitting. **Electronic Journal Of Statistics**, v. 8, n. 2, p. 2741-2778, 1 jan. 2014. <http://dx.doi.org/10.1214/14-ejs971>.

ALVES, Samir de Souza Oliveira. **Ajustamento de círculo pelo método Kasa**. Disponível em: https://github.com/samirsoalves/AJUSTAMENTO_CIRCULO_METODO_KASA. Acesso em: 12 dez. 2022.

ALVES, Samir de Souza Oliveira; RODRÍGUEZ, Felipe Andrés Carvajal; SAMPAIO, Livia Faria; MEDEIROS, Leandro Ítalo Barbosa; VEIGA, Luis Augusto Koenig; KLEIN, Ivandro. Avaliação Laboratorial da Parametrização de Dados LST em Superfícies Planas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 3, p. 384-398, 22 set. 2020. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72n3-51444>.

ANTON, Howard; BUSBY, Robert C. **Álgebra Linear Contemporânea**. Porto Alegre: Bookman, 2007.

BOLDRINI, José Luís; COSTA, Sueli I. Rodrigues; FIGUEIREDO, Vera Lúcia; WETZLER, Henry G. **Álgebra Linear**. 3 ed. São Paulo: Harper & Row Brasil, 1980.

BRASIL, Reyolando M. L. R. F. **Estabilidade do equilíbrio das estruturas**. São Paulo: Blucher, 2021.

CHERNOV, N.; LESORT, C. Least Squares Fitting of Circles. **Journal Of Mathematical Imaging And Vision**, v. 23, n. 3, p. 239-252, nov. 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s10851-005-0482-8>

CHERNOV, Nikolai. **Circular and Linear Regression: fitting circles and lines by least squares**. New York: CRC Press, 2011.

DALMOLIN, Quintino. **Ajustamento por Mínimos Quadrados**. Curitiba: UFPR, 2002.

GEMAEL, Camil; MACHADO, Alvaro Muriel Lima; WANDRESEN, Romualdo. **Introdução ao ajustamento de observações**. 2 ed. Curitiba: Ed. UFPR. 2015.

GHILANI, Charles D. **Adjustment Computations: Spatial Data Analysis**. 6. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2018.

HOLST, Christoph; KUHLMANN, Heiner. Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. **Journal of Applied Geodesy**, v. 10, n. 1, p.1-9, 1 jan. 2016. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/jag-2015-0025>.

JIA, Dongfeng; ZHANG, Weiping; WANG, Yuhao; LIU, Yanping. A New Approach for Cylindrical Steel Structure Deformation Monitoring by Dense Point Clouds. **Remote Sensing**, v. 13, n. 12, p. 2263, 9 jun. 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13122263>.

KASA, I. A circle fitting procedure and its error analysis. **IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement**, v. 25, n. 1, p. 8-14, mar. 1976. <http://dx.doi.org/10.1109/tim.1976.6312298>

KASPERSKI, Johan; DELACOURT, Christophe; ALLEMAND, Pascal; POTHERAT, Pierre; JAUD, Marion; VARREL, Eric. Application of a Terrestrial Laser Scanner (TLS) to the Study of the Séchilienne Landslide (Isère, France). **Remote Sensing**, v. 2, n. 12, p. 2785-2802, 17 dez. 2010. <http://dx.doi.org/10.3390/rs122785>.

LEICA. LeicaGeosystems. **Leica BLK360**: Manual do Usuário. 2 ed. Brasil, 2018. 42 p.

LEICA. LeicaGeosystems. **TS15 User Manual**. Suíça, 2015.

LIN, Guiye; GIORDANO, Andrea; SANG, Kun; STENDARDO, Luigi; YANG, Xiaochun. Application of Territorial Laser Scanning in 3D Modeling of Traditional Village: a case study of fenghuang village in china. **Isprs International Journal Of Geo-Information**, v. 10, n. 11, p. 770, 12 nov. 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi10110770>.

LUHMANN, Thomas; CHIZHOVA, Maria; GORKOVCHUK, Denys. Fusion of UAV and Terrestrial Photogrammetry with Laser Scanning for 3D Reconstruction of Historic Churches in Georgia. **Drones**, v. 4, n. 3, p. 53, 7 set. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/drones4030053>.

MEAGHER, Donald. Geometric modeling using octree encoding. **Computer Graphics And Image Processing**, v. 19, n. 2, p. 129-147, jun. 1982. [http://dx.doi.org/10.1016/0146-664x\(82\)90104-6](http://dx.doi.org/10.1016/0146-664x(82)90104-6).

MUKUPA, W.; ROBERTS, G. W.; HANCOCK, C. M.; AL-MANASIR, K. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. **Survey Review**, p. 1-18, 15 abr. 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/00396265.2015.1133039>.

MULLER, Neil; MAGAIA, Lourenço; HERBST, B. M. Singular Value Decomposition, Eigenfaces, and 3D Reconstructions. **Siam Review**, v. 46, n. 3, p. 518-545, jan. 2004. <http://dx.doi.org/10.1137/s0036144501387517>.

NUMPY. **Singular Value Decomposition**. 2022. Disponível em: <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.linalg.svd.html>. Acesso em: 20 set. 2022.

NURUNNABI, Abdul; SADAHIRO, Yukio; LAEFER, Debra F. Robust statistical approaches for circle fitting in laser scanning three-dimensional point cloud data. **Pattern Recognition**, v. 81, p. 417-431, set. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2018.04.010>.

OPEN3D. **Point cloud outlier removal**. Disponível em: http://www.open3d.org/docs/0.9.0/tutorial/Advanced/pointcloud_outlier_removal.html#prepare-input-data. Acesso em: 12 dez. 2022.

PARSEKIAN, Guilherme Aris; CORRÊA, Marcio Roberto Silva; LOPES, Guilherme Martins; CAVICHIOILLI, Isabella. Estudo teórico e experimental de paredes esbeltas de alvenaria estrutural. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 197-213, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000400114>.

RIVEIRO, B.; MORER, P.; ARIAS, P.; ARTEAGA, I. de. Terrestrial laser scanning and limit analysis of masonry arch bridges. **Construction And Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1726-1735, abr. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.094>.

SANTOS, Cristiano Flores dos. **Compressão de Nuvens de Pontos Dinâmicas: Uma Abordagem Eficiente para a Etapa de Predição**. 2020. 152 f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

SCAIONI, Marco; MARSELLA, Maria; CROSETTO, Michele; TORNATORE, Vincenza; WANG, Jin. Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring. **Sensors**, v. 18, n. 11, p. 3682, 29 out. 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/s18113682>.

STRANG, Gilbert. **Álgebra linear e suas aplicações**. 4 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

ZOCOLOTTI FILHO, Carlos Alberto. **Utilização de Técnicas de Poligonização de Precisão para o Monitoramento de Pontos Localizados em Galerias de Inspeção: Estudo de Caso da U. H. de Salto Caxias**. 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

Capítulo 5

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido visou a elaboração de uma abordagem para a automação no monitoramento de estruturas verticais a partir de nuvens de pontos. Apoiado nos dados obtidos nos levantamentos por varredura laser, buscou-se a determinação da linha do eixo de uma estrutura com a elaboração de uma metodologia de segmentação iterativa da nuvem de pontos, baseado no eixo vertical. De posse dos segmentos, pode-se calcular a inclinação e quantificar o deslocamento horizontal ao longo da estrutura.

A verificação quanto a qualidade métrica dos dados levantados a partir do LST foi efetuada em ambiente laboratorial e controlado, o que minimizou possíveis efeitos como as obstruções ou as influências das variações de fatores ambientais para a testagem dos dados. Demonstrou-se que a configuração do equipamento adotada para a varredura impactou na precisão dos dados de forma significativa, no qual a avaliação da nuvem de pontos obtida em no modo alta densidade apresentou precisão em torno de três vezes melhor em relação à nuvem de pontos com baixa densidade. Paralelamente, evidenciou-se que a estratégia de ajustar os dados referentes as centro dos alvos, antes de extrair diretamente a informação requerida, forneceu qualidade métrica melhor.

No âmbito dos levantamentos em ambientes externos, explorou-se a influência da variação da distância relativa entre o equipamento e a superfície de interesse. Constatou-se que a mudança nas distâncias empregadas neste trabalho não resultaram em inclinações distintas. Entretanto, foi evidenciado que a filtragem manual e automática foram etapas fundamentais para remoção de pontos considerados outliers, uma vez que para a nuvem de pontos derivada do levantamento realizado com o LST a aproximadamente 30 m, observou-se um maior número de pontos excluídos, proporcionando resultados similares ao calculado para o levantamento efetuado a 10 m.

O desenvolvimento de uma estratégia inovadora para segmentação iterativa da nuvem de pontos favoreceu o fracionamento do conjunto de dados com base em um dos eixos de sistema de referência cartesiano. Com isso, o algoritmo desenvolvido

não se restringe às estruturas verticais, podendo ser adaptado à demais construções civis, como pontes, tanques horizontais, vigas, entre outros.

De acordo com a forma do objeto monitorado, cada segmento extraído da nuvem de pontos possibilita o ajustamento dos pontos com base em elementos geométricos. Neste quesito, para estruturas cilíndricas, o cálculo de parâmetros que definem circunferências proporcionou a análise da construção com base em seu eixo. Adicionalmente, apresentou-se o método Kasa como uma estratégia alternativa ao ajustamento pelo método combinado do Método dos Mínimos Quadrados, o qual viabilizou o cálculo das coordenadas dos centros das circunferências com maior eficiência em relação ao tempo de processamento.

Considerando a inviabilidade de implantação de alvos sobre a estrutura, para materialização de um sistema de referência, a metodologia proposta para compatibilizar as orientações dos referências para os diferentes levantamentos se mostrou vantajosa. A aplicação da técnica SVD para cálculo da matriz de rotação tornou possível direcionar a inclinação da estrutura para a direção do eixo Y, permitindo a análise dos dados entre os levantamentos realizados.

Por tanto, neste trabalho foi possível identificar e calcular a inclinação e deslocamentos horizontais a partir das nuvens de pontos. Reforçou-se a necessidade da filtragem dos dados para a redução dos erros no conjunto de dados e a viabilidade da parametrização por meio de figuras geométricas para extração de informação precisa, possibilitando o traçado da linha do eixo da estrutura para verificação da verticalidade.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para realização de trabalhos futuros, recomenda-se:

- Considerar a variação das distâncias entre os segmentos extraídos e o equipamento de varredura na precisão das coordenadas das circunferências;
- Implementar alvos na estrutura a fim de quantificar a influência de sua utilização na materialização de um sistema de referência;
- Testar a metodologia para estruturas não cilíndricas, utilizando outras figuras geométricas para a parametrização dos segmentos extraídos;
- Realizar a verificação da precisão do equipamento *in situ*.

Capítulo 6

REFERÊNCIAS

RUSU, Radu Bogdan *et al.* Towards 3D Point cloud based object maps for household environments. **Robotics And Autonomous Systems**, Garching Bei München, v. 11, n. 56, p. 927-941, ago. 2008.

BOLKAS, Dimitrios; MARTINEZ, Aaron. Effect of target color and scanning geometry on terrestrial LiDAR point-cloud noise and plane fitting. **Journal of Applied Geodesy**, [s.l.], v. 12, n. 1, p.109-127, 26 jan. 2018.

US DEPARTMENT OF THE ARMY. (Org.). **Structure Deformation Surveying: Engineering Manual**. Washington, 2018.

FRIEDLI, Ephraim; PRESL, Robert; WIESER, Andreas. Influence of atmospheric refraction on terrestrial laser scanning at long range. In: JOINT INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DEFORMATION MONITORING, 4., Atenas., 2019.

FRÖHLICH, Christoph; METTENLEITER, Markus. Terrestrial laser scanning: new perspectives in 3D surveying. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 36., 2004, p. 7-13

GONÇALVES, Evelin Moreira. **Planejamento de rede de monitoramento voltada para o monitoramento de estruturas empregando-se LST (laser scanner terrestre)**. 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

HOLST, Christoph; KUHLMANN, Heiner. Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. **Journal of Applied Geodesy**, v. 10, n. 1, p.1-9, 1 jan. 2016. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/jag-2015-0025>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17123-6**: Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments: Rotating lasers. 2 ed. Suíça, 2012.

IRUGHE-EHIGIATOR, R.; EHIOROBO, J. O. Application of Terrestrial Laser Scanner in Monitoring Gas Separation Tank. **Journal of Civil and Environmental Systems Engineering**, Benin City, v. 1, n. 1, p. 13-26, jun. 2021.

LENARTOVICZ, Igor Ribeiro. **Avaliação da potencialidade do laser scanner terrestre no monitoramento de estruturas: estudo de caso UHE Mauá**. Curitiba, 2013. 123f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, 2013.

LINDENBERGH, Roderik; PIETRZYK, Peter. Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning. **Applied Geomatics**, v. 7, n. 2, p.65-

74, 9 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12518-014-0151-y>.

LOVAS, T., et. al. Terrestrial laser scanning in deformation measurements of structures. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 37., 2008, Beijing, p. 527–532.

MUKUPA, W. et al. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. **Survey Review**, p.1-18, 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00396265.2015.1133039>.

PAVAN, Nadisson Luis; SANTOS, Daniel Rodrigues dos. Um Método Automático para Registro de Dados Laser Scanning Terrestre Usando Superfícies Planas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 3, p.572-589, set. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702015000300032>.

SCAIONI, Marco; WANG, Jim. Technologies for Dam Deformation Measurement: Recent Trends and Future Challenges. In: JOINT INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DEFORMATION MONITORING, 3., AUT, 2016. p. 1-8.

SCHNEIDER, Danilo. Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water damns. In: THE 3RD IAG SYMPOSIUM ON GEODESY FOR GEOTECHNICAL AND STRUCTURAL ENGINEERING AND 12TH FIG SYMPOSIUM ON DEFORMATION MEASUREMENT, Baden, Austria, 2006.

STAIGER, Rudolf. The geometrical quality of terrestrial laser scanner (TLS). In: PROCEEDINGS OF FIG WORKING WEEK, 2005. Cairo, Egypt, 2005.

VOSELNAN, George; MAAS, Hans-gerd (Ed.). **Airborne and Terrestrial Laser Scanning**. Dunbeath: Whittles Publishing, 2010. 337 p.

WALTON, Gabriel; DELALOYE, Danielle; DIEDERICHS, Mark S. Development of an elliptical fitting algorithm to improve change detection capabilities with applications for deformation monitoring in circular tunnels and shafts. **Tunnelling And Underground Space Technology**, v. 43, p.336-349, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.014>.

APÊNDICE A – ALGORITMO DE FILTRAGEM AUTOMÁTICA

```

import open3d as o3d
import numpy as np

### LEITURA DA NUVEM DE PONTOS

print("NUVEM DE PONTOS CARREGADA")
pcd =
o3d.io.read_point_cloud("C:/Users/samir/Desktop/teste/CAIXA_DAGUA_LE
V_1 1.pcd")
print(pcd) #LENDO A NUVEM
print(np.asarray(pcd.points))
o3d.visualization.draw_geometries([pcd]) #VISUALIZACAO DA NUVEM

### FUNCAO PARA COLORIR A NUVEM FILTRADA

def display_inlier_outlier(cloud, ind):
    inlier_cloud = cloud.select_by_index(ind)
    outlier_cloud = cloud.select_by_index(ind, invert=True)

    print("Showing outliers (red) and inliers (gray): ")
    outlier_cloud.paint_uniform_color([1, 0, 0])
    inlier_cloud.paint_uniform_color([0.8, 0.8, 0.8])
    o3d.visualization.draw_geometries([inlier_cloud, outlier_cloud])

### FILTRAGEM

print("Statistical outlier removal")
cl, ind =
pcd.remove_statistical_outlier(nb_neighbors=10,std_ratio=3.0)#
FILTRO
display_inlier_outlier(pcd, ind)#FUNCAO COLORIR

### VISUALIZAR NUVEM FILTRADA

print("NUVEM DE PONTOS FILTRADA")
print(cl) # MOSTRA A QUANTIDADE DE PONTOS
print(np.asarray(cl.points))
o3d.visualization.draw_geometries([cl])

```

APÊNDICE B – ALGORITMO DE SEGMENTAÇÃO VERTICAL

```

import numpy as np
import open3d as o3d

# Ler a nuvem
pc_caixa_dagua =
o3d.io.read_point_cloud("C:/Users/GEENG/Documents/SAMIR_DADOS/FILTRA
GEM/LEV_1_E_2_FILTRADA_r5.pcd")

# Funcao que recebe a nuvem e a altura do segmento no eixo Z
# retorna uma lista de nuvens da segmentação da nuvem de entrada
def fatiar_nuvem(pc, largura_corte):
    # diferença de altura
    z_min = pc.get_min_bound()[2] # metros
    z_max = pc.get_max_bound()[2] # metros
    delta_z = z_max - z_min
    # Calculo dos n intervalos
    intervalos = int(delta_z/largura_corte)
    # Criar lista com n nuvens vazias
    lista_nuvens = [o3d.geometry.PointCloud() for i in
range(intervalos+1)]
    # Preencher cada nuvem segundo o intervalo
    inf = z_min
    sup = largura_corte - abs(z_min)
    for i in range(intervalos+1):
        # condicoes
        logical_1 = np.asarray(pc.points)[: ,2] > inf
        logical_2 = np.asarray(pc.points)[: ,2] < sup
        logical = np.reshape(logical_1*logical_2,
(len(pc.points),1))
        # obtem nuvem numpy do intervalo i
        intervalo_i = logical*np.asarray(pc.points)
        # remove todas as linhas 0
        intervalo_i = intervalo_i[~np.all(intervalo_i == 0, axis=1)]
        # salva na nuvem i da lista_nuvens
        lista_nuvens[i].points =
o3d.utility.Vector3dVector(intervalo_i)
        # atualiza intervalos
        inf = inf + largura_corte
        sup = sup + largura_corte
        print(f"A largura escolhida definiu {intervalos} cortes e
{intervalos+1} nuvens. ")
        print(f"Lista das nuvens com {largura_corte} metros de altura de
baixo para cima:")
        print(lista_nuvens)
        return lista_nuvens

largura = 0.01 # metros
lista_de_fatias = fatiar_nuvem(pc_caixa_dagua, largura)

print(lista_de_fatias[0])

```

```

print(np.asarray(lista_de_fatias[0].points))
print(lista_de_fatias[1263])
print(np.asarray(lista_de_fatias[1263].points))
print(lista_de_fatias[2520])
print(np.asarray(lista_de_fatias[2520].points))

# Desenhar nuvens pulando um segmento
# diferença de altura
z_min = pc_caixa_dagua.get_min_bound()[2] # metros
z_max = pc_caixa_dagua.get_max_bound()[2] # metros
delta_z = z_max - z_min
# Calculo dos n intervalos
intervalos = int(delta_z/largura)
#o3d.visualization.draw_geometries(lista_de_fatias[0:intervalos:2])

# Salvar lista de segmentos fatiados
for i in range(len(lista_de_fatias)):

o3d.io.write_point_cloud("C:/Users/GEENG/Documents/SAMIR_DADOS/AJUST
AMENTO/LEV_1_E_2/LEV_1_E_2_FILTRADA_r5/nuvens_fatias%d.pcd" %i,
lista_de_fatias[i])

# Desenhar grafico da quantidade de pontos por segmento
import matplotlib.pyplot as plt

x = range(len(lista_de_fatias))
y = [len(np.asarray(lista_de_fatias[i].points)) for i in
range(len(lista_de_fatias))]

# Plot
plt.plot(x, y)
plt.xlabel('X: fatia n')
plt.ylabel('Y: nÂ° de pts')
plt.title('Quantidade de pontos por fatia!')
# function to show the plot
plt.show()

```

APÊNDICE C – ALGORITMO DE DETERMINAÇÃO DOS CENTROS DAS CIRCUNFERÊNCIAS

```

import numpy as np
import open3d as o3d
import pandas as pd
from sympy import *
from numpy.linalg import inv, pinv

#criando dicionario
lista_nuvs = {} #dicionario vazio
a_file =
open("C:/Users/GEENG/Documents/SAMIR_DADOS/AJUSTAMENTO/LEV_1_E_2/LEV_1_E_2_FILTRADA_r5/lista_dicio.txt") #Busca o dicionario salvo em
arquivo TXT
for line in a_file: #Ler cada linha do arquivo
    key, value = line.split()
    lista_nuvs[key] = value

del lista_nuvs['^>nuvs_fatias0']

#estimativa dos valores iniciais por m^dia
#for chave, valor in lista_nuvs.items():
#    mfile =
#    'C:/Users/GEENG/Documents/SAMIR_DADOS/AJUSTAMENTO/LEV_2/LEV_2_FILTRADA_r3/nuvs_fatias1250.txt'
#    mx = np.loadtxt(mfile)[: , 0]
#    my = np.loadtxt(mfile)[: , 1]
#x_media = np.mean(mx)
#y_media = np.mean(my)
#print(x_media)

# ajustamento pelo modelo combinado de forma iterativa
# realizado para cada segmento por vez a partir dos dados em txt de
# uma pasta-----
#-----
for chave, valor in lista_nuvs.items(): # Ler os dados em txt do
drive
    file =
    'C:/Users/GEENG/Documents/SAMIR_DADOS/AJUSTAMENTO/LEV_1_E_2/LEV_1_E_2_FILTRADA_r5/%s.txt'%chave

    # Vetor das observações-----
#-----
    x = np.loadtxt(file)[: , 0]
    y = np.loadtxt(file)[: ,1]
    Lb = []
    for i in range(len(x)):
        Lb=np.append(Lb, [x[i]])
        Lb=np.append(Lb, [y[i]])
    Lb=np.transpose(Lb)

```

```

    obs = np.array([np.array(x),np.array(y)]) # observaÃ§Ãµes em
matriz x, y
    obs = np.transpose(obs)

# Valores dos parametros iniciais -----
-----
xin=-41.9715
yin=82.59
rin=float(np.sqrt(((xin-x[0])**2)+((yin-y[0])**2)))

x0 = np.array([[xin],
               [yin],
               [rin]])

# Matriz Peso -----
-----
lx=len(x) #dimension of matrix of values
s=lx #numbers of rows for interative process
P=np.eye(s*2) #identidade
obs = np.array([np.array(x),np.array(y)]) # observaÃ§Ãµes em
matriz x, y
obs = np.transpose(obs)

# Modelo funcional: circunferÃªncia -----
-----

xn,xc,yn,yc,rc = symbols('xn xc yn yc rc')

f = (xn - xc)**2 + (yn - yc)**2 - rc**2

# Montar a matriz A -----
-----
def matrizA(obs,f,x0):
    a1 = diff(f,xc)
    a2 = diff(f,yc)
    a3 = diff(f,rc)

    coef_x = [a1, a2, a3]

    def IterA(coef,obs,x0):
        val_A=[]
        for i in obs:
            for j in coef:
                num_a=j.evalf(subs={xn:i[0], yn:i[1], xc:x0[0][0],
yc:x0[1][0], rc:x0[2][0]})
                val_A=np.append(val_A,num_a)
        return val_A

    val_Ax=IterA(coef_x,obs,x0)

    A = np.zeros((len(x), len(x0)))

    for i in range(len(A)):
        A[i][0]=val_Ax[i*3]
        A[i][1]=val_Ax[1+(i*3)]
        A[i][2]=val_Ax[2+(i*3)]
    return A

```

```

# Montar a matriz B -----
-----
def matrizB(obs,f,x0):
    b1 = diff(f,xn)
    b2 = diff(f,yn)

    coef_x = [b1, b2]

    def IterA(coef,obs,x0):
        val_B=[]
        for i in obs:
            for j in coef:
                num_b=j.evalf(subs={xn:i[0], yn:i[1], xc:x0[0][0],
yc:x0[1][0], rc:x0[2][0]})
                val_B=np.append(val_B,num_b)
        return val_B

    val_Ax=IterA(coef_x,obs,x0)
    B = np.zeros((len(x),2*len(x)))

    for i in range(len(x)):
        B[i][i*2]=val_Ax[i*2]
        B[i][1+(i*2)]=val_Ax[1+(i*2)]
    return B

# Erro de fechamento-----
-----
def matrizw(obs,x0):
    w1 = (xn - xc)**2 + (yn - yc)**2 - rc**2
    coef_x = [w1]

    def IterA(coef,obs,x0):
        val_A=[]
        for i in obs:
            for j in coef:
                num_a=j.evalf(subs={xn:i[0], yn:i[1], xc:x0[0][0],
yc:x0[1][0], rc:x0[2][0]})
                val_A=np.append(val_A,num_a)
        return val_A

    val_Ax=IterA(coef_x,obs,x0)

    w = np.zeros((len(x),1))

    for i in range(len(x)):
        w[i][0]=val_Ax[i]
    return w

# Iteração-----
-----
stop = False
limite_iter = 0.001
it = 1
while not stop:
    if it != 1:

```

```

        x0 = np.array(Xa)
        print(it)

    ### Vetor das correções X -----
-----
    # Calculo de M**-1
    A = matrizA(obs,f,x0)
    B = matrizB(obs,f,x0)
    w = matrizw(obs,x0)

    B = np.matrix(B)
    P = np.matrix(P)
    Bt = np.transpose(B)
    At = np.transpose(A)
    P_inv = np.linalg.inv(P)
    M = B*(P_inv)*Bt
    M_inv = np.linalg.inv(M)

    X = -(np.linalg.inv((At)*(M_inv)*A))*(At)*(M_inv)*w

    ### Parâmetros ajustados Xa -----
-----
    Xa=x0+X
    Xa

    if it != 1: #Stop criteria
        if ((np.amax(abs(X))) <= limite_iter) or (it ==100):
            stop = True
        else:
            x0 = Xa
    it = it+1

    # residuo-----
-----
    K=-(M_inv)*((A*X)+w)
    V=(P_inv)*(Bt)*K

    # Sigma posteriori-----
-----
    Vt=np.transpose(V)
    sigma_pos=Vt*P*V/(len(w)-len(x0))
    sigma_pos=np.array(sigma_pos)

    # MCV dos Parâmetros-----
-----
    mvc_p=sigma_pos[0][0]*pinv((At)*(M_inv)*A)

    Xa=np.array(Xa)
    mvc_p=np.array(mvc_p)

    # Salvando coordenadas e x,y e desvios-padrão em arquivo em txt
    NOME = file[73 : -4]
    with
open('C:/Users/GEENG/Documents/SAMIR_DADOS/AJUSTAMENTO/LEV_1_E_2/LEV
_1_E_2_FILTRADA_r5/coord_e_precisoas.txt', 'a') as writefile:

```

```
writefile.write(str(NOME)+' '+str(Xa[0][0])+  
'+str(Xa[1][0])+' '+str(Xa[2][0])+' '+str(sqrt(mvc_p[0][0]))+  
'+str(sqrt(mvc_p[1][1]))+' '+str(sqrt(mvc_p[2][2]))+'\n')
```