

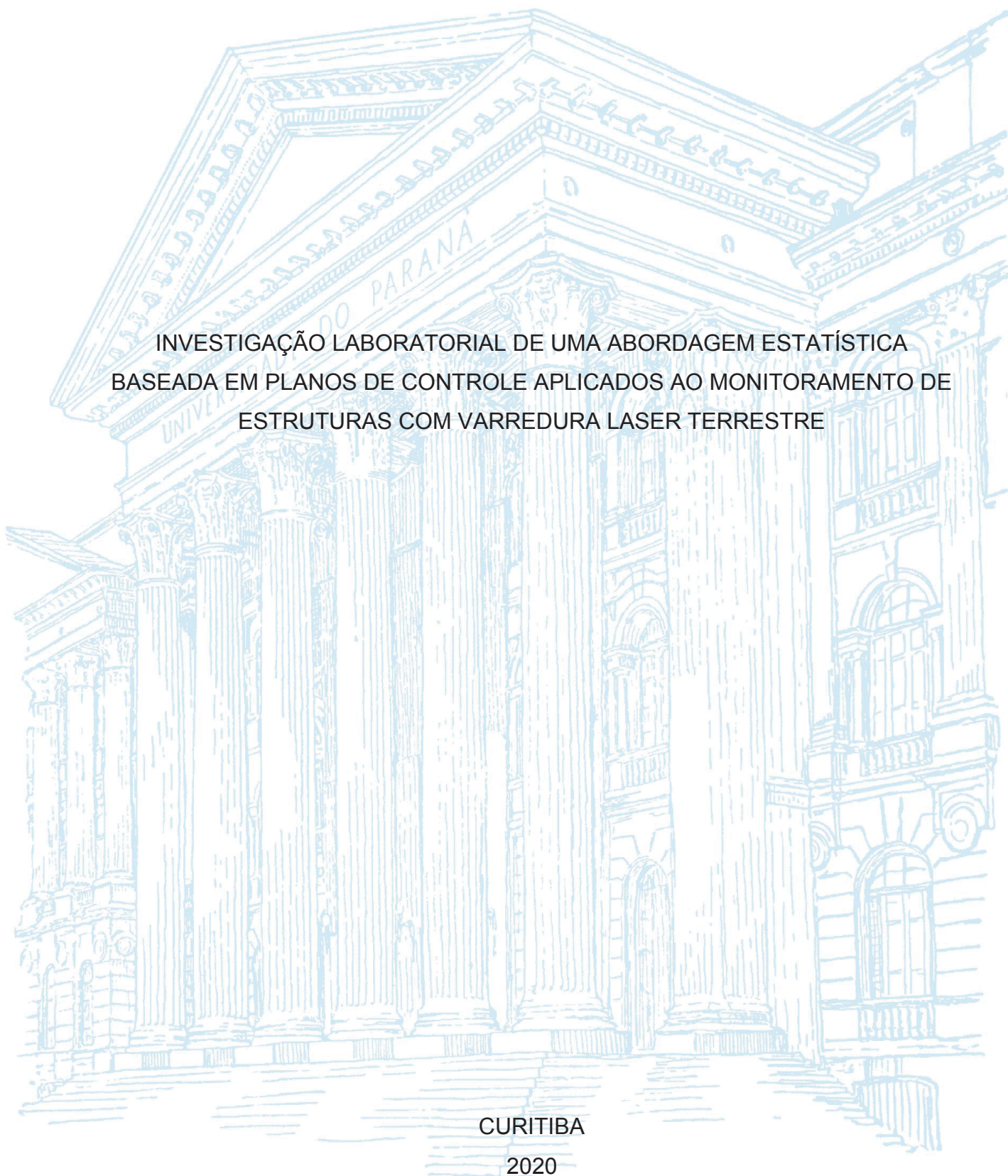
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SAMIR DE SOUZA OLIVEIRA ALVES

INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL DE UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA
BASEADA EM PLANOS DE CONTROLE APLICADOS AO MONITORAMENTO DE
ESTRUTURAS COM VARREDURA LASER TERRESTRE

CURITIBA

2020



SAMIR DE SOUZA OLIVEIRA ALVES

INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL DE UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA
BASEADA EM PLANOS DE CONTROLE APLICADOS AO MONITORAMENTO DE
ESTRUTURAS COM VARREDURA LASER TERRESTRE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga

Coorientador: Prof. Dr. Ivandro Klein

CURITIBA

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

A474i

Alves, Samir de Souza Oliveira

Investigação laboratorial de uma abordagem estatística baseada em planos de controle aplicados ao monitoramento de estruturas com varredura laser terrestre [recurso eletrônico]/ Samir de Souza Oliveira Alves. Curitiba, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga

Coorientador: Prof. Dr. Ivandro Klein

1. Laser. 2. Sistemas de varredura. 3. Monitoramento geodésico. I. Veiga, Luís Augusto Koenig. II. Klein, Ivandro. I. Título.

CDD 621.3678

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **SAMIR DE SOUZA OLIVEIRA ALVES** intitulada: **INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL DE UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA BASEADA EM PLANOS DE CONTROLE APLICADOS AO MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS COM VARREDURA LASER TERRESTRE**, 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 mestre 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, 19 de Fevereiro de 2020.

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

LUÍZ GUIMARÃES BARBOSA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO)

DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e bênçãos que me ajudaram a ter forças para seguir um caminho nunca imaginado por mim antes.

Ao prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga pela orientação, paciência, por me incentivar a crescer, me ajudar a saber que posso explorar mais de mim, pelas oportunidades únicas e todo apoio.

Ao prof. Dr. Ivandro Klein pela co-orientação, pela disposição e paciência para a solução de dúvidas, pelo apoio na determinação de caminhos para o desenvolvimento da pesquisa.

A minha família, minha mãe Rosilene, meus avós Yolanda e Ângelo, meus irmãos Victor e Debora, minha tia Rosangela e toda a família Souza que acreditaram em mim e sempre estão dispostos a me apoiar no crescimento pessoal e profissional, apesar das distâncias e saudades.

Aos meus amigos mais que especiais Ana Paula, Barbara Maciel, Barbara Silveira, Beatriz, Caroline, Érica, Letícia, Manuela, Mariane, Marina, Mirelle, Ramiro, Rayna, Thayana, Thomaz e Yuri que nunca hesitaram em mostrar que sou capaz de enfrentar todos os desafios que o mundo venha a me oferecer.

Ao programa de pós-graduação de Ciências Geodésicas da Universidade Federal de Paraná e a seus professores, em especial prof. Dr. Pedro e prof. Dr. Alex, também a seus funcionários Monica Kleuser, Tanea e Mariney.

A Capes pela bolsa de estudos.

Aos companheiros do GEENG (Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia) Ana, Dayane, Felipe, José, Leandro e Lívia pelas trocas, parcerias e companhias que fizeram toda a diferença para a minha caminhada.

Aos amigos do CPGCG, em especial Darlan, Elias, Fabiano, Joyce, Natália, Niedja, Samuel, Sergio e Tulio pela companhia e ajudas que fizeram toda diferença.

Aos amigos e professores que a Rural me presenteou Ana, Camila, Fernando, Grasielle, profa. Dra. Alessandra Baptista, profa. Dra. Alessandra Palmeiro, profa. Dra. Claudia e prof. Msc. Ricardo Neves.

“(...) a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem. O que Deus quer é ver a gente aprendendo a ser capaz de ficar alegre a mais, no meio da alegria, e ainda mais alegre ainda no meio da tristeza!”. (JOÃO GUIMARÃES ROSA, 1994, 448 p.)

RESUMO

A varredura laser terrestre é um método de levantamento que permite a obtenção de dados pontuais sobre superfícies por meio das observações de ângulos horizontais, verticais e medições eletrônicas de distâncias. Estes produtos, denominados por nuvens de pontos, podem ser elaborados a partir de varreduras com estações totais ou os equipamentos definidos por Laser Scanner Terrestre (LST). Atualmente, tem sido avaliada a utilização dos LST nas atividades de monitoramento geodésico de estruturas, uma vez que estes equipamentos podem fornecer uma quantidade de pontos maior em curto espaço de tempo, quando comparados as varreduras realizadas por estações totais. Neste trabalho, investigou-se em laboratório a viabilidade da utilização de planos de controle ao monitoramento geodésico, explorando a tendência atual de parametrização das nuvens de pontos. A partir da elaboração de um protótipo contendo uma superfície plana, foram realizadas varreduras simultâneas com LST e a estação total (empregando-se irradiação tridimensional) em diferentes inclinações do plano de controle, tanto no modo de varredura frontal (mínima de $0,89^\circ$ e máxima de $3,47^\circ$) quanto no modo oblíquo ($1,16^\circ$). Seguida a segmentação e o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados, aplicando-se o modelo combinado, os parâmetros referentes a cada posição dos planos de controle puderam ser comparados, seguido da detecção das diferenças entre estes a partir do teste Qui-Quadrado. O teste indicou que as diferenças dos planos ajustados em relação a posição de referência são estatisticamente significativas aos níveis de significância de 5% e 1%, tanto para o LST quanto para a estação total em ambos os modos de varredura (frontal e oblíquo). A partir dos valores dos parâmetros, também foi proposta uma metodologia para testar a significância do ângulo de inclinação estimado do plano em relação a posição de referência. Os resultados demonstraram que é possível confirmar que os ângulos obtidos foram estatisticamente significantes. Porém, tanto a posição de varredura com LST quanto o nível de significância adotado podem afetar a conclusão desta análise.

Palavras-chave: Nuvem de pontos. Parametrização. MMQ. Laser Scanner Terrestre. Estação total. Testes estatísticos. Monitoramento geodésico.

ABSTRACT

The terrestrial laser scan is a survey method that allows obtaining point data on surfaces through the observation of horizontal and vertical angles and electronic distance measurements. The result of these observations are named point cloud and it can be obtained from scans with total stations or using the Terrestrial Laser Scanner (TLS). Currently, the use of TLS in structural geodetic monitoring activities has been evaluated, since this equipment can provide a greater number of points in a shorter period, when compared to scans performed by total stations. In this research, the feasibility of using control plans for geodetic monitoring was investigated in laboratory, exploring the current trend of parameterization of point clouds. From the development of a prototype containing a flat surface, simultaneous scans with LST and total station were carried out at different slopes of the control plane, both in the frontal scan mode (minimum of 0.89° and maximum of 3.47°) and in the oblique mode ($1,16^\circ$). After segmentation and adjustment by the Least Squares Method, applying the Gauss-Helmert model, the parameters for each position of the control surface (plane) could be compared, followed by the detection of differences between them from the Chi-square test. The test indicated that the differences in the adjusted planes in relation to the reference position are statistically significant at the 5% and 1% significance levels, both for the LST and for the total station in both scanning modes (frontal and oblique). From the parameter values, a methodology was proposed to test the significance of the estimated angle of inclination of the plane in relation to the reference position. The results showed that it is possible to confirm statistically that the angles obtained were statistically significant, but that the scanning position with LST can interfere in the determination of these data for monitoring purposes. However, both the scanning position with LST and the level of significance adopted may affect the conclusion of this analysis.

Keywords: Point cloud. Parameterization. Least Squares Estimation. Terrestrial Laser Scanner. Total station. Statistical tests. Geodetic monitoring.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - APLICAÇÕES DO LASER SCANNER	29
FIGURA 2 - OBSERVAÇÕES REALIZADAS POR UM LASER SCANNER TERRESTRE	30
FIGURA 3 - DIFERENCIAÇÃO ENTRE OS CAMPOS DE VISÃO DE UM LST.....	32
FIGURA 4 - MENSURAÇÃO POR INTERVALO DE TEMPO	33
FIGURA 5 - DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS POR DIFERENÇA DE FASE.....	35
FIGURA 6 - ÂNGULO DA DIFERENÇA DE FASE DO SINAL RECEBIDO	35
FIGURA 7 - EFEITO DE BORDA NO FEIXE LASER.....	37
FIGURA 8 - SUPERFÍCIE SEMITRANSARENTE COM REFRAÇÃO E DUPLA REFLECTÂNCIA DO FEIXE LASER	38
FIGURA 9 - EFEITO FOOTPRINT DO LASER INCIDENTE.....	40
FIGURA 10 - ESPALHAMENTO DO LASER EMITIDO	41
FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DOS PARÂMETROS A, B E C DE UM PLANO α	45
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	53
FIGURA 13 - CAMPOS DE VARREDURA DO LASER SCANNER TERRESTRE BLK 360	55
FIGURA 14 - PROTÓTIPO DO PLANO DE CONTROLE EXPERIMENTAL.....	56
FIGURA 15 - MOVIMENTAÇÃO DO PLANO DE CONTROLE EXPERIMENTAL	56
FIGURA 16 - DETERMINAÇÃO DA ALTURA DO PONTO DE INCIDENCIA DA BARRA DE PARALAXE.....	57
FIGURA 17 - DESLOCAMENTO E INCLINAÇÃO DO PLANO	58
FIGURA 18 - POSIÇÃO DOS INSTRUMENTOS NA PRIMEIRA ETAPA DO EXPERIMENTO	60
FIGURA 19 - POSIÇÃO DOS INSTRUMENTOS NA SEGUNDA ETAPA DO EXPERIMENTO	61
FIGURA 20 - ETAPAS DE OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS DAS NUVENS DE PONTOS.....	62
FIGURA 21 - LEVANTAMENTO EM GRID COM A ESTAÇÃO TOTAL TS15.	63
FIGURA 22 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE PÓS-PROCESSAEMNTO.....	63

FIGURA 23 - FLUXOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DA ETAPA DE DETECÇÃO DO DESLOCAMENTO.....	68
FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS 3D DOS PONTOS AJUSTADOS DO LEVANTAMENTO FRONTAL COM O LST	76
FIGURA 25 - DISTRIBUIÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS 3D DOS PONTOS AJUSTADOS LEVANTAMENTO OBLÍQUO COM O LST	77
FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS 3D DOS PONTOS AJUSTADOS DO LEVANTAMENTO FRONTAL COM A ESTAÇÃO TOTAL	78
FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS 3D DOS PONTOS AJUSTADOS LEVANTAMENTO OBLÍQUO COM A ESTAÇÃO TOTAL	79

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DA CONSEQUÊNCIA DE RUPTURA DE BARRAGENS.....	20
QUADRO 2 - TOTAL DE BARRAGENS NO BRASIL CATEGORIZADAS QUANTO AO USO	21
QUADRO 3 - PARÂMETROS INFLUENCIADORES DA QUALIDADE DE DADOS DERIVADOS DE UM LASER SCANNER TERRESTRE.....	36
QUADRO 4 - TESTES REALIZADOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE DESLOCAMENTO ENTRE PLANOS	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CONFIGURAÇÕES DE ESCANEAMENTO DO BLK 360.....	54
TABELA 2 - QUANTIFICAÇÃO DOS DESLOCAMENTO DO PLANO DE CONTROLE EXPERIMENTAL.....	74
TABELA 3 - PARÂMETROS AJUSTADOS COM AS NUVENS DE PONTOS DO LST	75
TABELA 4 - PARÂMETROS AJUSTADOS COM AS NUVENS DE PONTOS DA ESTAÇÃO TOTAL	77
TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS DISCREPÂNCIAS 3D DOS DADOS	80
TABELA 6 - AVALIAÇÃO DO FATOR DE VARIÂNCIA <i>A POSTERIORI</i> DE CADA AJUSTAMENTO PARA AS VARREDURAS COM O LST	80
TABELA 7 - AVALIAÇÃO DO FATOR DE VARIÂNCIA <i>A POSTERIORI</i> DE CADA AJUSTAMENTO PARA AS VARREDURAS COM A ESTAÇÃO TOTAL	81
TABELA 8 - VALORES DAS ESTASTISTICAS PARA O TESTE QUI-QUADRADO DOS DADOS DAS VARREDURAS LASER COM O LST	82
TABELA 9 - VALORES DAS ESTASTISTICAS PARA O TESTE QUI-QUADRADO DOS DADOS DAS VARREDURAS LASER COM A ESTAÇÃO TOTAL	82
TABELA 10 - INCLINAÇÕES DAS POSIÇÕES DO PLANOS DE CONTROLE EXPERIMENTAL	83
TABELA 11 - PRECISÃO DAS INCLINAÇÕES DETERMINADAS PELAS VARREDURA LASER.....	83
TABELA 12 – VALORES DAS ESTATÍSTICAS $\chi_{calculado2}$ PARA OS TESTES DE SIGNIFICÂNCIA DAS INCLINAÇÕES	84
TABELA 13 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS $\chi_{calculado2}$ DE COMPARAÇÃO DAS INCLINAÇÕES	85

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

CCD	- <i>Charge-Coupled Device</i>
CMOS	- <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
FoV	- <i>Field of View</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite Systems</i>
LIDAR	- <i>Light Detection And Ranging</i>
LST	- <i>Laser Scanner Terrestre</i>
MMQ	- <i>Método dos Mínimos Quadrados</i>
MVC	- <i>Matriz variância-covariância</i>
PSD	- <i>Position Sensing Detector</i>
RGB	- <i>Red Green Blue</i>
SHM	- <i>Structural Health Monitoring</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS	20
2.2 ESTADO DA ARTE EM MONITORAMENTO GEODÉSICO	22
2.2.1 Monitoramento Geodésico	22
2.2.2 Varredura Laser Terrestre Aplicada ao Monitoramento Geodésico	24
2.3 SISTEMA LASER SCANNER TERRESTRE.....	28
2.3.1 Princípios de Funcionamento e Composição	30
2.3.1.1 Modo de levantamento	31
2.3.1.2 Campo de varredura.....	32
2.3.1.3 Princípios de medição de distância	32
2.3.1.3.1 <i>Time-of-flight</i>	33
2.3.1.3.2 Diferença de fase	34
2.3.1.3.3 Triangulação.....	36
2.3.2 Erros de aquisição de dados.....	36
2.3.2.1 Erros instrumentais.....	37
2.3.2.2 Erros sobre objeto	38
2.3.2.3 Erros ambientais.....	39
2.3.2.4 Erros provocados pela posição do equipamento LST no momento da varredura.....	39
2.3.3 Nuvem de Pontos	41
2.3.3.1 Segmentação	41
2.3.3.2 Registro e Georreferenciamento	41
2.3.3.3 <i>Softwares</i> e Armazenamento de dados.....	43
2.4 AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES DE UM PLANO	44
2.4.1 Modelo Combinado	47
2.5 TESTE QUI-QUADRADO GENERALIZADO APLICADO AO MONITORAMENTO	

3 MATERIAL E MÉTODOS	53
3.1 INSTRUMENTOS UTILIZADOS.....	53
3.1.1 Estação Total TS15.....	54
3.1.2 Laser Scanner Terrestre BLK360.....	54
3.1.3 Plano de Controle Experimental.....	55
3.2 AQUISIÇÃO DA AMOSTRA SOBRE O PLANO DE CONTROLE.....	58
3.3 PÓS-PROCESSAMENTO DA NUVEM DE PONTOS.....	63
3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PLANO	64
3.5 IDENTIFICAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS ENTRE PLANOS	67
4 RESULTADOS.....	74
4.1 PARÂMETROS DOS PLANOS AJUSTADOS.....	74
4.2 IDENTIFICAÇÃO DAS DIFERENÇAS ENTRE AS POSIÇÕES DO PLANO	81
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE A – SCRIPT DO AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES DO LST EM UM PLANO PELO MODELO COMBINADO	94
APÊNDICE B – DERIVADAS DAS EQUAÇÕES DE INCLINAÇÃO DO PLANO COM BASE NOS PARÂMETROS.....	96
APÊNDICE C – HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES OBTIDAS COM LST	97
APÊNDICE D – HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES OBTIDAS COM ESTAÇÃO TOTAL.....	100

1 INTRODUÇÃO

Diversos métodos de levantamentos geodésicos são utilizados no âmbito do monitoramento de estruturas. Dentre os quais, tem-se a triangulação, a triangulateração, a poligonação e o nivelamento geométrico. Nestes, utilizam-se instrumentos como as estações totais, níveis e, posteriormente, com emprego parcial ou exclusivo de práticas abrangidas pela tecnologia *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) (NADAL et al., 2017).

Atualmente, com o advento das tecnologias de medição remota, é possível a aquisição de numerosos pontos tridimensionais (3D) em curto espaço de tempo por meio de instrumentos como os lasers scanners, instalados em plataformas aéreas ou terrestres. Estes se destacam por serem sistemas capazes de fornecerem uma densa quantidade de dados tridimensionais, com alta precisão (PETRIE; TOTH, 2018).

O Laser Scanner Terrestre (LST) vem sendo amplamente explorado quanto ao seu emprego no monitoramento estrutural, como túneis, pontes, barragens e torres de concreto. O monitoramento possibilita a mitigação da ocorrência de fenômenos na estrutura, como a deformação e/ou deslocamento entre diferentes épocas, causados por fatores externos e internos (LOVAS et al. 2008; SCHNEIDER, 2006; LENARTOVICZ, 2013; WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014).

A prática de monitoramento geodésico de estruturas requer, além da periodicidade, confiabilidade nas informações determinadas, uma vez que as falhas de operação ou mesmo o colapso de grandes estruturas podem gerar impacto social, econômico e ambiental. De acordo com Ogundare (2016), o desenvolvimento do LST nos últimos anos vem permitindo a determinação de deslocamentos estruturais na mesma ordem de magnitude das medições realizadas com estações totais, as quais podem apresentar precisões nominais superiores às dos LST.

O uso do LST para o monitoramento geodésico de estruturas permite diferentes abordagens quanto à manipulação e o tratamento dos dados 3D, podendo fornecer, além da densa quantidade de informação, alta confiabilidade. Conforme Lindenbergh e Pietrzyk (2015), os desafios do monitoramento de estruturas estão vinculados às grandezas, quanto ao deslocamento que se deseja investigar, as quais podem ter dimensões próximas às precisões nominais dos LST empregados. Atualmente, considerando a maior parte de equipamentos disponíveis no mercado, a ausência de dispositivos de centragem forçada e de possibilidade de orientação do

equipamento ocasiona a não obtenção de observações sobre o mesmo local, em épocas diferentes (como ocorre nos outros métodos de monitoramento), o que distingue a aplicação deste instrumento dos métodos tradicionais de monitoramento (VOSSSELMAN; MAAS, 2010).

Além disso, sabe-se que a realização de observações sobre determinadas grandezas não está isenta de erros derivados das mais diversas fontes, como as imperfeições instrumentais e a influência dos fatores ambientais de mensuração, como temperatura, pressão e umidade. A avaliação e o gerenciamento/tratamento dos erros, também definidos como propriedades das observações (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015) são uma das principais atividades desenvolvidas pelos engenheiros agrimensores e cartógrafos.

Em decorrência disto, um viés de investigação considera o aproveitamento de feições e/ou elementos naturais da própria estrutura ou artificiais para manipulação dos dados das varreduras com LST. A discretização da estrutura empregando elementos geométricos como planos, vem sendo investigada como um elemento potencial para o tratamento de dados tridimensionais e para efeitos de comparação entre épocas, como o aumento das precisões dos parâmetros calculados frente as próprias precisões das coordenadas tridimensionais.

Uma das propostas de detecção de deslocamentos com análises estatísticas, a partir de levantamentos geodésicos, foi sugerida por Aydin (2014). Em seu trabalho, o autor indica a utilização do teste nomeado por *Testing Whole Network-Method*, baseado no Teste Global do ajustamento e na distribuição Qui-Quadrado, para a detecção de deformações em redes geodésicas. Usualmente, o Teste Global é aplicado na detecção de erros grosseiros e erros sistemáticos nas observações utilizadas em um ajustamento, além de erros nas injunções, no modelo estocástico, entre outros (KLEIN, 2011).

Entretanto, apesar de alguns trabalhos de monitoramento estrutural apresentarem resultados satisfatórios em relação a qualidade posicional alcançável, quando os dados derivados das varreduras com LST são ajustados em elementos geométricos (LINDENBERGH; PFEIFER, 2005; SCHNEIDER, 2006; JAAFAR, MENG E SOWTER, 2017; BARBARELLA et al., 2017), ainda cabem estudos em laboratórios que investiguem o uso de um método que possibilite a detecção dos deslocamentos entre os elementos testados, com base em um nível de confiança estipulado. Simultaneamente, essa avaliação deve ponderar alguns desafios relacionados a

parametrização, como a influência das posições das estações de varredura e do modelo matemático aplicável que contenha parâmetros eficientes para a detecção dos deslocamentos desconhecidos (HOLST; KUHLMANN, 2016).

Neste trabalho, investiga-se a proposta de uma abordagem de monitoramento de estruturas por meio de elementos planos, sendo estes determinados a partir de varreduras laser terrestre e pelos cálculos dos parâmetros definidores dos planos com ajustamento das nuvens de pontos levantadas. Os deslocamentos, simulados em laboratório, foram avaliados com a identificação da mudança dos parâmetros em diferentes épocas, baseado no teste Qui-Quadrado generalizado (AYDIN, 2014), a determinação da inclinação entre os planos e a avaliação de sua significância estatística. Ressalta-se que esta metodologia de determinar o ângulo de inclinação entre duas épocas e testar a sua diferença estatística é uma abordagem inédita dentro do contexto de monitoramento geodésico de estruturas.

1.1 OBJETIVOS

Nos itens a seguir serão abordados o objetivo geral e específicos propostos para o desenvolvimento deste trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o uso de planos obtidos a partir de um protótipo e do ajustamento das observações derivadas das nuvens de pontos obtidas por LST e estação total para fins de monitoramento de estruturas.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Elaborar um protótipo com plano de controle experimental móvel;
- b) Determinar os parâmetros dos planos de controle em diferentes épocas;
- c) Avaliar o ajustamento dos planos de controle;
- d) Identificar a diferença entre os parâmetros dos planos de duas épocas;
- e) Desenvolver um procedimento estatístico para detecção da inclinação dos planos;
- f) Comparar os resultados obtidos com o LST e a estação total.

1.2 JUSTIFICATIVA

As estruturas projetadas e construídas pelo homem devem ser supervisionadas, tanto no decorrer da implantação destes projetos, bem como ao longo de sua vida. Tal prática se faz essencial em projetos de engenharia que resultem no alto impacto sobre o solo (quanto as cargas que as estruturas exercem sobre ele), visto que estas estruturas estão sujeitas à movimentação. Um exemplo deste caso pode ser observado nas construções de reservatórios de água, os quais resultam no aumento da carga sobre a região instalada, o que fomenta a necessidade de avaliação das decorrentes deformações (YONG-QI, 1983).

No Brasil, os grandes reservatórios para o abastecimento energético tem sido, historicamente, a principal fonte de geração do sistema elétrico brasileiro. A hidroeletricidade representa cerca de 60,2% da capacidade de produção instalada no país, com um empreendimento em construção e seis com construção não iniciada (BRASIL, 2019). Visando o aproveitamento dos recursos hídricos brasileiros para produção de energia, baseando-se na disponibilidade física, aspectos ambientais e sociais, o Ministério de Minas e Energia projetou, por meio da Nota Técnica PR 04/18, no horizonte 2050 um potencial hidrelétrico nacional de 176 GW. Destes, 108 GW estão em operação ou construção e 68 GW de potencial hidrelétrico está inventariado (BRASIL, 2018). Tais fatores favorecem tendência de continuidade do investimento nacional em grandes estruturas, como as barragens, para produção de tal recurso.

Eventos de rupturas parcial ou total em barragens evidenciam a importância de tais estruturas, devido ao alto impacto ambiental, social e econômico que podem causar. Exemplos desse tipo de ocorrência foram observados em janeiro de 2019 na barragem do Córrego Feijão, em Brumadinho, e em novembro de 2015 nas barragens de Santarém e do Fundão, em Mariana, ambas no estado de Minas Gerais. Este último acontecimento citado foi considerado o maior desastres da história relacionado às barragens, no qual 45 milhões de m³ de lama e rejeitos foram despejados (O GLOBO, 2019).

Estes fatos reforçam a importância da necessidade do monitoramento estrutural, não apenas nas fases preliminares de execução dos projetos, mas também no monitoramento contínuo da segurança que estas estruturas fornecem (GONZÁLEZ-AGUILERA; GÓMEZ-LAHOZ; SÁNCHEZ, 2008).

Dentro do campo de monitoramento de estruturas, Mukupa et al. (2017) ressaltam a grande potencialidade do LST em tais atividades, indicando que as investigações, quanto ao aprimoramento e adaptação de técnicas na detecção de deslocamentos, vêm alcançando resultados satisfatórios em relação à qualidade posicional dos dados obtidos, que alcançam precisões milimétricas e submilimétricas.

A avaliação estrutural, adotando-se um modelo de superfície específico para investigação, pode ser limitante em relação ao próprio modelo adotado e a confiabilidade fornecida por ele. Além disso, comparações entre épocas (campanhas de levantamentos), através de modelos, como Modelos Digitais de Elevação (MDE), podem resultar em comparações 1D (MONSERRAT; CROSETTO, 2008). Como alternativa, a investigação de deslocamentos a partir de planos pode ser realizada por meio da determinação dos parâmetros definidores do mesmo para cada época e cálculo das inclinações.

Deste modo, seguindo os avanços tecnológicos dos instrumentos passíveis de aplicação à prática de monitoramento, a possibilidade do aumento de projetos civis voltados ao aumento do potencial hidrelétrico e considerando a obrigatoriedade do monitoramento previsto pela Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010), cabe a investigação de novas abordagens que viabilizem o melhoramento de metodologias existentes na investigação da saúde estrutural destes projetos de engenharia.

Neste contexto, será investigado em ambiente laboratorial o emprego do LST no monitoramento geodésico de estruturas, comparando os resultados obtidos entre o LST e a estação total. Embora as estações totais, em geral, possuam melhor precisão nominal do que os LST, a maior quantidade de dados coletados com o LST pode fornecer resultados mais precisos dentro do âmbito do ajustamento de observações, justificando a realização de pesquisas neste sentido.

Além disto, também será proposto um procedimento de teste estatístico para detecção da inclinação de planos obtidos em diferentes épocas, seja com dados de LST ou com dados de estação total, contribuindo com o atual estado da arte no monitoramento geodésico de estruturas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas as revisões sobre os principais conceitos que norteiam o estudo proposto, relacionados ao monitoramento de estruturas, bem como as metodologias e equipamentos que englobam o tema. As características e aplicações dos Lasers Scanners Terrestres também são exploradas.

2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS

De acordo com Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2013), as barragens são caracterizadas como obstáculos artificiais com a capacidade de reter água, rejeitos ou detritos, para fins de armazenamento ou controle, podendo ser destinadas ao abastecimento de água, fornecimento de energia hidrelétrica, controle de cheias, irrigação, dentre outras atividades. A primeira barragem hidrelétrica no mundo construída em 1882 está localizada em Appleton, Wisconsin, nos Estados Unidos (OLIVEIRA, 2018).

Barragens são estruturas de alta complexidade, tanto pelas características estruturais de projeto, quanto pelo impacto que tais empreendimentos podem causar em seu local de implantação. A categorização quanto ao impacto de um evento de ruptura em uma barragem pondera as consequências quanto a perda de vidas e fatores econômicos, sociais e danos ambientais (QUADRO 1).

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DA CONSEQUÊNCIA DE RUPTURA DE BARRAGENS

Consequência de Ruptura	Perda de Vidas	Econômico, Social e Danos Ambientais
Muito alta	Significativa	Dano excessivo
Alta	Alguma	Dano substancial
Baixa	Nenhuma	Dano moderado
Muito baixa	Nenhuma	Dano mínimo

FONTE: Adaptado de Ministro da Integração Nacional (2012).

No Brasil, os projetos de barragens iniciaram-se na segunda metade do século XIX com a construção da Barragem de Cedros, no Ceará (ANDRIOLO, 2015). O primeiro empreendimento hidrelétrico voltado para compor especificamente a matriz energética brasileira ocorreu em 1883, com a implantação da Barragem de Ribeirão

do Inferno, em Minas Gerais (OLIVEIRA, 2018). Em 2015, o país contabilizava um total de 13.529 barragens, distribuídas conforme o QUADRO 2:

QUADRO 2 - TOTAL DE BARRAGENS NO BRASIL CATEGORIZADAS QUANTO AO USO

Múltiplos Usos	11.748	87%
Hidrelétricas	1.261	9%
Rejeitos de Mineração	264	2%
Rejeitos Industriais	256	2%
Total	13.259	

FONTE: Adaptado de Andriolo (2015).

Segundo o Ministério da Integração Nacional (2012), as barragens, assim como outras estruturas que apresentam potenciais riscos no aspecto social, ambiental, estrutural e econômico, devem ser inspecionadas periodicamente a fim de serem avaliadas características e comportamentos que podem apontar eventuais incidentes e acidentes. A segurança pode ser garantida pela reparação de imperfeições previstas ou constatadas, operação segura com manutenção e inspeções contínuas e preparação adequada para emergências.

De acordo com Suci e Faggion (2012), as barragens são estruturas monitoradas a partir de métodos geodésicos e geotécnicos, sendo o primeiro caracterizado por permitir a obtenção de informações sobre um referencial global, enquanto o segundo é capaz de alcançar precisões melhores, mas sem estarem vinculadas a um sistema de referência fora da estrutura.

O desenvolvimento tecnológico vem permitindo o alcance de informações mais precisas quanto ao monitoramento de deslocamento estrutural, que, por sua vez, pode ser classificado em horizontal e vertical. O primeiro pode ser causado por forças externas, como efeitos térmicos e nível de água dos reservatórios. O movimento vertical pode indicar o assentamento da estrutura ou rotação, caso o deslocamento vertical tenha magnitudes diferentes entre dois pontos (SCAIONI et al., 2018).

Segundo Scaioni et al. (2018), não apenas as deformações devem ser investigadas na avaliação da saúde de barragens, mas também a casos de infiltração, corrosão e intemperismo com uma taxa de aquisição de informações compatíveis com o desenvolvimento do fenômeno. Os autores ainda destacam, como tendência de investigação, a integração de diferentes sensores e suas observações no

monitoramento, possibilitando o aumento da redundância de dados sobre a estrutura como um todo.

2.2 ESTADO DA ARTE EM MONITORAMENTO GEODÉSICO

O monitoramento de estruturas pode ser caracterizado como a realização de atividades de controle de parâmetros relativos a estruturas, utilizando-se de técnicas e equipamentos precisos. Para tal, são realizadas atividades de observações como os deslocamentos horizontais e verticais, movimentos de juntas, temperatura e deformação do concreto (JERKE, 2019).

Os efeitos de forças externas e internas (como o próprio peso da estrutura), resultam em deslocamentos das mesmas. Tais deslocamentos podem ser caracterizados conforme a perspectiva de observação do deslocamento: deslocamento relativo e deslocamento não relativo. O deslocamento relativo (deslocamento do corpo rígido), representa translação e rotação e depende da posição de onde são realizadas as observações. Enquanto o não relativo caracteriza-se como independente da posição do observador, representando mudança de forma, isto é, a deformação na estrutura (AYDIN, 2014).

Do mesmo modo, tais fenômenos podem ser identificados e observados nas barragens. Jerke (2019) considera as atividades de monitoramento destes empreendimentos como uma ferramenta de diagnóstico da saúde da barragem, possibilitando intervenções preventivas e corretivas, visando a minimização a probabilidade da ocorrência de acidentes, preservando a segurança estrutural, ambiental e humana.

Marsella e Scaioni (2018) ressaltam a importância do monitoramento de deformação em grandes estruturas e destacam os avanços nas pesquisas crescentes envolvendo a integração de diferentes sensores, além da tendência de comunicação sem fio entre instrumentos utilizados nesta prática.

2.2.1 Monitoramento Geodésico

O monitoramento de deslocamento é uma das atividades aplicáveis pela geomática para a sociedade como um todo, possibilitando dados confiáveis que permitem a avaliação de risco, tanto para estruturas naturais como estabilidade de

solos e geleiras, quanto para as artificiais como barragens e túneis. Os avanços tecnológicos e o desenvolvimento de pesquisas como LST e radar interferométrico vêm permitindo a contribuição da geomática no campo interdisciplinar do Monitoramento da Saúde Estrutural (*Structural Health Monitoring* – SHM) (WIESER; CAPRA, 2017).

Nas atividades de monitoramento de grandes estruturas de engenharia podem ser destacados o levantamento com GNSS, levantamento gravimétrico, nivelamento geométrico de primeira ordem, irradiações e triangulações como os principais métodos de levantamentos geodésicos aplicáveis (SIGUEL, 2013).

De acordo com Mukupa et al. (2017), a investigação quanto a deformação de estruturas, os métodos tradicionais de levantamento por pontos ainda são os mais empregados. Quanto à movimentação vertical de estruturas, costuma-se aplicar o nivelamento de primeira ordem, e no deslocamento por técnicas de levamento pontuais, estações totais (LOVAS et al. 2008) e GNSS. O monitoramento geodésico em túneis pode ser realizado com diferentes instrumentos, como extensômetros, LST, estações totais e câmeras, além da própria integração destes (WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014).

Jerke (2019) utilizou a técnica de levantamento GNSS pelo método relativo na determinação das coordenadas de pilares na rede de monitoramento, os quais foram empregados posteriormente como referência para o método da irradiação com estação total na determinação das coordenadas de 62 pontos de monitoramento, localizados sobre a estrutura da barragem.

Nadal et al. (2017) apresentam a utilização de estações totais robotizadas ao monitoramento de barragens. Por meio de elaboração de interface de comunicação, os autores demonstraram que a abordagem para levantamentos pontuais permite o não contato físico direto entre operador e equipamento a longo do processo de mensuração.

Mukupa et al. (2017) destacam que, no monitoramento, deve ser levado em consideração a possível magnitude de prováveis deformações na estrutura. Este fato esbarra nas precisões alcançáveis com a metodologia adotada para o levantamento e, conseqüentemente, na precisão das observações realizadas para análise de deformação em estruturas. Os autores descrevem três métodos de análise de deformação que podem ser adotadas a partir do registro de nuvens de pontos:

- Avaliação ponto-a-ponto (*Point-to-point-based deformations*) – Normalmente realizada com técnicas de levantamento pontual, como estações totais e levantamentos GNSS. No caso do laser scanner, a aleatoriedade da amostra dificultaria a avaliação ponto a ponto, sendo dependente do processamento dos dados;
- Avaliação ponto-a-superfície (*Point-to-surface-based deformations*) – A alta densidade da varredura laser favorece a determinação de superfícies por diferentes métodos, como ajustamento e interpolação. Estas podem ser confrontadas com pontos de uma segunda varredura;
- Avaliação superfície-a-superfície (*Surface-to-surface-based deformations*) – A comparação consiste na aquisição de nuvens em diferentes épocas, seguida do ajustamento de cada uma em uma superfície escolhida (separadamente) e, por fim, a comparação entre ambas.

2.2.2 Varredura Laser Terrestre Aplicada ao Monitoramento Geodésico

A prática de monitoramento a partir da tecnologia LST vem fornecendo a possibilidade de uma nova abordagem de aquisição de dados sobre estruturas. Os objetos de investigação passaram a ser tratados com uma densa quantidade de pontos levantados (coordenadas tridimensionais). Em relação as atividades de detecção e avaliação de deslocamentos, a alta redundância 3D fornecida pelas ferramentas LST é a principal vantagem para que estes trabalhos sejam realizados utilizando varreduras lasers. A capacidade da aquisição à longo alcance permite aplicações geológicas e geotécnicas, como, por exemplo, o monitoramento de deslizamentos de terra (MONSERRAT; CROSETTO, 2008), reduzindo o contato físico direto entre o operador e o meio avaliado.

Esses e outros fatores fomentam a crescente exploração de LST em uso na detecção de alterações e no monitoramento de deformações de diferentes obras de engenharia, como barragens, pontes, túneis, tubulações, torres, viadutos, dentre outras estruturas. Entretanto, alguns desafios precisam ser investigados, como a aplicação do laser scanner ao monitoramento de estruturas altas (exemplo: prédios), e os efeitos ambientais sobre as observações adquiridas, por exemplo. Cabe ressaltar, também, que a utilização do LST não substitui técnicas clássicas de

monitoramento, mas sim em conjunto, buscando obter melhores resultados (MUKUPA et al., 2017).

Do ponto de vista da relação entre quantidade de pontos levantados e tempo para obtenção destes, os métodos clássicos da Geodésia exigem tempo superior de execução em relação ao levantamento com LST e, dependendo do método de levantamento geodésico, há necessidade de sinalização prévia ou permanente para identificação e investigação do comportamento destes pontos ao longo do tempo. No caso de levantamentos empregando-se LST, a ausência de pontos sinalizados e a não ocorrência de pontos idênticos entre duas épocas, resulta na busca pela deformação da estrutura a partir da parametrização de área. Este processo acarreta em alguns desafios, como (HOLST; KUHLMANN, 2016):

- definição da estação do LST e a densidade de pontos;
- determinação da parametrização capaz de ser eficiente na detecção de deformação desconhecidas;
- consideração dos erros do modelo e das simplificações adotados sobre o objeto;
- investigação de métodos para correlacionar as observações com LST; e
- influência dos erros sistemáticos do LST nas observações.

Previamente à aquisição de dados por LST em levantamentos geodésicos, a finalidade das observações realizadas determinará a precisão necessária na representação do objeto a ser verificado e a resolução espacial (distância entre os pontos), sendo interferidos pelos erros associados à própria utilização do instrumento. Dependendo das condições ambientais, a precisão média dos pontos pode variar de ± 2 à ± 25 mm. Estas grandezas podem ser minimizadas com técnicas no levantamento, como a repetição de varreduras mantendo-se a estação do laser (MUKUPA et al., 2017; WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014).

Um dos primeiros estudos direcionados a avaliação da tecnologia LST aplicado ao monitoramento, Gordon, Lichti e Stewart (2001) quantificaram a deformação de nuvens de pontos em épocas distintas. A superfície teste foi deslocada -8,5 mm, -17 mm e -25,5 mm no eixo vertical em épocas distintas. A detecção do deslocamento foi realizada por meio da determinação do centro de 25 alvos. Os resultados demonstraram que foi possível a detecção do deslocamento, mas com

magnitudes de -10,9 mm, -21,2 mm e -29,6 mm, próximas ao deslocamento aplicado, mas para estudos de monitoramento as diferenças encontradas podem ser significativas e mascarar deformações reais na estrutura.

Lindenbergh e Pfeifer (2005) utilizaram LST no monitoramento de uma eclusa marítima, visando a avaliação de deslocamentos da estrutura com a fixação da posição do instrumento. Inicialmente, os autores realizaram segmentações automáticas dos planos em duas épocas distintas e, em seguida, o ajustamento com base na equação do plano em cada amostra. A investigação da ocorrência de deslocamento entre as duas épocas se deu pela determinação de um plano intermediário entre a primeira e a segunda varredura e a detecção de deslocamentos por meio da estatística Qui-Quadrado em relação ao plano intermediário. Os resultados indicaram a possibilidade de detecção de deformação na ordem de 9 mm com nível de confiança de 95%. Para Monserrat e Crosetto (2008) a principal vantagem deste método está na capacidade de detectar deformação abaixo da precisão nominal.

Schneider (2006) explorou métodos de uso do LST no monitoramento da deformação de uma torre de televisão, a qual foi seccionada em N planos nos quais circunferências puderam ser ajustadas. A partir do centro da circunferência, o autor determinou a linha de flexão entre duas épocas, detectando diferenças de 13 mm. Anteriormente, o autor investigou o ajuste de uma nuvem de pontos obtidos sobre uma placa de metal de 1m², com teste em ambiente fechado (30 m de distância) e externo (50 e 900 m de distância). Os resultados apontaram desvio-padrão inferior a 10 mm à curta distância e de 18 mm à longa distância.

Lovas et al. (2008) utilizaram o LST na detecção e deformação, comparando-o a outras técnicas de medições, como nivelamento de primeira ordem transdutores de alta precisão em uma ponte e laboratório. A precisão dos dados obtidos com o laser não superou ao nivelamento, mas destacou-se a alta correlação dos dados de deslocamento fornecido pelo LST e as técnicas tradicionais, além da possibilidade de aquisição de dados em diferentes pontos da estrutura com curto espaço de tempo quando comparado aos métodos tradicionais. Entretanto, ressalta-se a importância do planejamento prévio dos locais de estação do instrumento.

Com base em um algoritmo de registro, fundamentado na correspondência de superfície 3D por mínimos quadrados, Monserrat e Crosetto (2008) estimaram parâmetros de deformação em um experimento com alvos de diferentes superfícies,

a 100 m e 200 m. Conforme esperado, os erros encontrados para alvos mais próximos foram menores que na detecção da deformação a longa distância, obtendo-se resultados inferiores a 1 cm.

Lenartovicz (2013) explorou a potencialidade do LST na identificação de deslocamentos de uma barragem antes e depois da formação do reservatório, com apoio de uma estação total para o posterior georreferenciamento dos dados laser. A partir da amostra de pontos, elaboraram-se malhas de modelagem da superfície. As comparações ponto-superfície e superfície-superfície foram aplicadas na detecção de deslocamento na estrutura entre épocas. Observou-se que os resultados mais confiáveis foram obtidos nas regiões centrais do escaneamento (maior densidade de pontos), enquanto nas regiões periféricas de escaneamento os resultados estão influenciados por erros provocados pelo ângulo de incidência do feixe.

Walton, Delaloye e Diederichs (2014) apresentaram um algoritmo para aprimorar a detecção de deformações em túneis circulares com LST, destacando que para túneis em montanhas são aceitáveis pequenas deformações (na ordem de centímetros), enquanto em áreas urbanas as deformações devem ser tratadas de forma mais rigorosa, devida a alta capacidade de colapso na estrutura. Este fato evidencia a necessidade de serem utilizados instrumentos que viabilizem a determinação de deformação com alta precisão.

Visando a investigação de deformações em estruturas históricas sem conhecimento prévio, Jaafar, Meng e Sowter (2016) desenvolveram uma metodologia para o monitoramento de ruínas, baseado em medições com LST e a técnica estatística Análise Procrustes Generalizada (APG) para determinar modelos de deformação. Com isso, foram obtidos vetores e estimativa probabilística de deformação, com capacidade de identificação desses fenômenos em níveis milimétricos para medições até 10 m e de 1 a 2 cm para 25 m.

Jaafar, Meng e Sowter (2017) listam, como os principais desafios para o monitoramento de grandes estruturas o volume de dados gerados pelos sistemas e a dificuldade em lidar com eles; a impossibilidade de estacionar alguns modelos de LST na mesma estação de varredura, em épocas distintas de levantamento; a contaminação de ruídos. Os autores investigaram a qualidade posicional de LST, comparando as diferenças entre duas varreduras. Mantendo-se a posição do instrumento e de uma superfície experimental, o par de nuvem foi comparado pela abordagem ponto-a-ponto e ponto-superfície (ajustando-se planos na nuvem), sendo

os erros encontrados na segunda abordagem 50 vezes menores que na primeira, indicando que a segunda técnica minimiza os efeitos dos ruídos, evitando-se a exclusão de pontos.

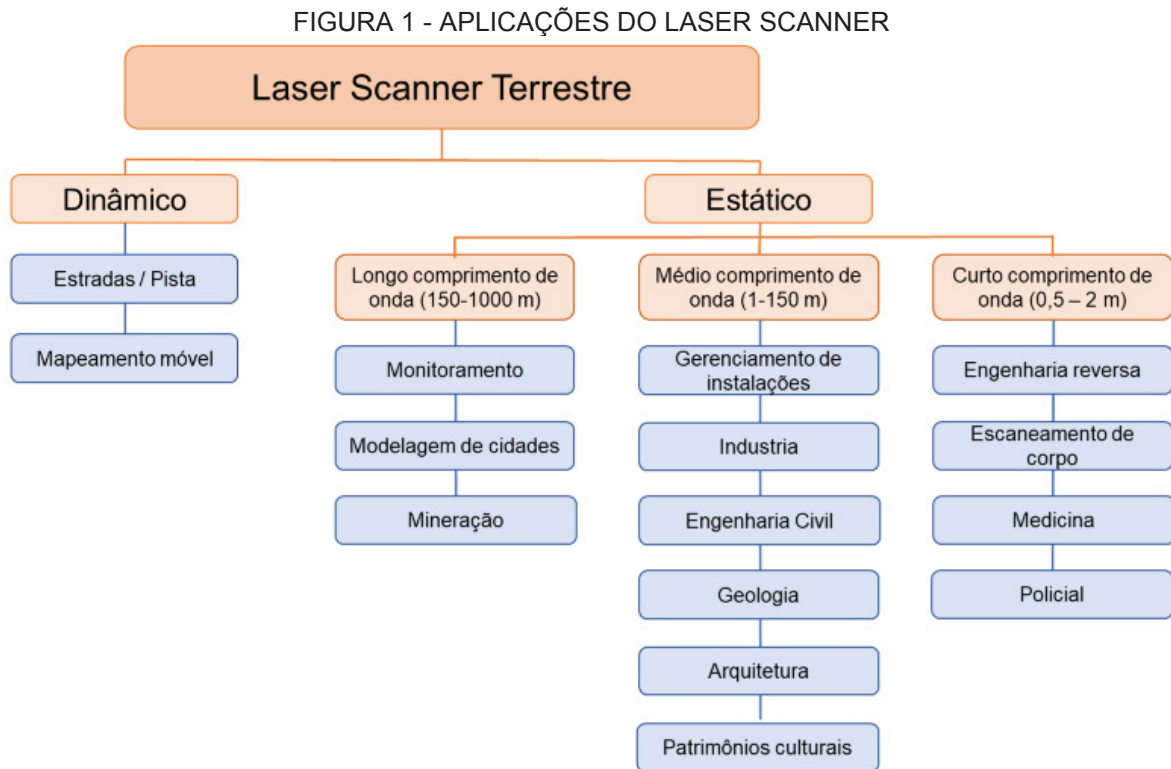
Barbarella et al. (2017) elaboraram uma técnica de avaliação da deformação do pavimento de um pátio (parte da pista) de um aeroporto usando LST. A partir da própria divisão em quadrantes do pátio, 24 planos foram ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) com as observações para cada subárea, com base na equação do plano. A avaliação foi realizada de forma relativa, comparando-se os 24 planos a um plano geral de referência e por meio de seções no para o cálculo dos desníveis entre os planos. Os autores destacam que o grande número de observações forneceu alta precisão para os parâmetros estimados e, conseqüentemente, os valores encontrados na comparação entre os planos é significativo.

Em um estudo voltado ao planejamento da geometria de uma rede de monitoramento a partir dos levantamentos com LST, Gonçalves e Veiga (2019) utilizaram as equações de propagações de erros e a precisão nominal do LST para avaliar as influências da densidade da nuvem, da distância entre o equipamento e o objeto a ser levantado e dos ângulos de incidência do feixe laser. Ponderando também as restrições dos locais de estação onde se encontra a barragem, os autores definiram as melhores localizações das estações de varredura. Para as diferentes configurações das estações de varreduras simuladas (denominadas por cenas pelos autores), e com base no equipamento adotado, foi demonstrado que as incertezas dos pontos crescem quanto mais próximos estes estão das extremidades das cenas. Outra consideração indica que a distância ideal entre as estações da rede e entre o instrumento e o objeto levantado foi de 20 m.

2.3 SISTEMA LASER SCANNER TERRESTRE

A tecnologia Laser Scanner caracteriza-se como uma técnica que visa a mensuração por métodos ativos e a determinação automática de centenas ou milhares de pontos amostrais. A varredura é realizada entorno da posição em que o instrumento foi instalado, com medidas de distâncias 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

(PETRIE; TOTH, 2018; SANTIBAÑEZ, 2010). As observações bidimensionais (2D) ou tridimensionais scaneadas podem ter as mais variadas aplicações, conforme ilustrado pela FIGURA 1.



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

As pesquisas relacionadas a medições com laser se iniciaram na década de 60. Contudo, a utilização efetiva para mensurações em campo se iniciou na década de 70, mas ainda como dispositivos independentes. Posteriormente, foram associados à instrumentos medidores de ângulos (teodolitos), associação que resultou no instrumento denominada por estação total. Todo este desenvolvimento, resultou nos atuais lasers scanners (PETRIE; TOTH, 2018).

Os produtos primários resultantes de um levantamento com LST são denominados por nuvens de pontos tridimensionais. Entretanto, no mercado atual, a diversidade de LST que podem ser encontradas, indicam as diferentes variações quanto aos princípios de funcionamento do mesmo. Conseqüentemente, na viabilidade de utilização do mesmo.

Fröhlich e Mettenleiter (2004) indicam como complexo o processo de classificação dos LST devido a gama de possibilidades que podem compor estes

sistemas como, por exemplo, os diferentes princípios de mensuração e campos de varredura laser que podem conter.

2.3.1 Princípios de Funcionamento e Composição

Os LST são sistemas compostos por elementos que visam, principalmente, a determinação de coordenadas tridimensionais. Estas se tratam de pontos referenciados em um sistema local do equipamento, com alta densidade, uma vez que os avanços tecnológicos vêm permitindo taxas de aquisição de dados superiores a um milhão de pontos por segundo (WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014).

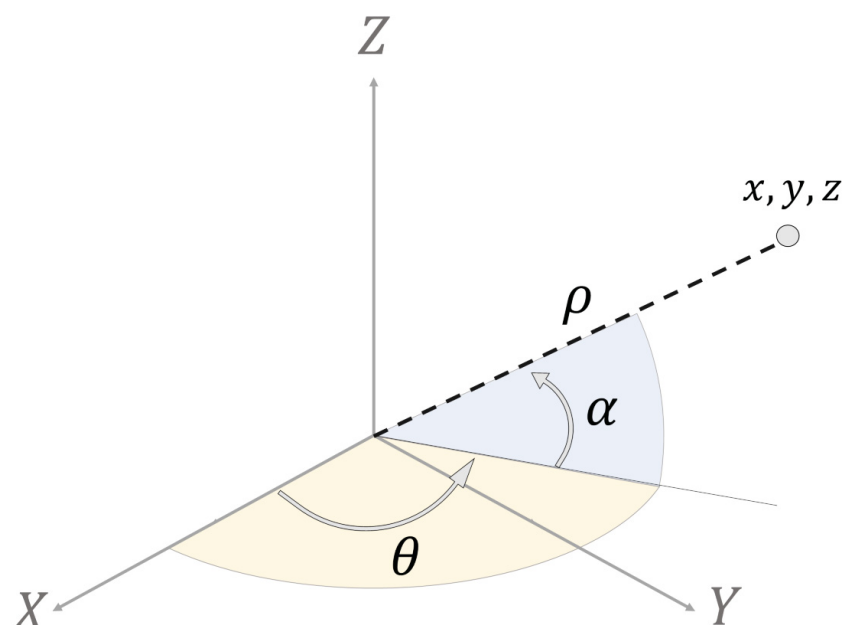
A aquisição dos dados é realizada a partir das leituras dos ângulos verticais (α), horizontais (θ) e da medição de distâncias inclinadas entre o centro do equipamento e o alvo (ρ). Essa relação é expressa nas equações (1), (2) e (3) (OGUNDARE, 2016) e os parâmetros demonstrados na FIGURA 2:

$$x = \rho \cdot \cos\theta \cdot \cos\alpha \quad (1)$$

$$y = \rho \cdot \sin\theta \cdot \cos\alpha \quad (2)$$

$$z = \rho \cdot \sin\alpha \quad (3)$$

FIGURA 2 - OBSERVAÇÕES REALIZADAS POR UM LASER SCANNER TERRESTRE



FONTE: O autor (2020).

Como demonstrado, o princípio de funcionamento é semelhante aos encontrados em estações totais. Por outro lado, Ogundare (2016) indica como desvantagens das varreduras com LST as incertezas na localização angular de uma medição devido ao diâmetro do feixe emitido e a impossibilidade de orientação em alvos pontuais de alguns modelos de LST. Já as estações totais podem apresentar precisões nominais dos medidores de distâncias e de ângulos superiores aos encontrados dos LST, podendo ser melhores do que $\pm (1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ e $\pm 1''$, respectivamente.

A diversidade de exploração, quanto as possibilidades de uso dos sistemas laser scanner, podem ser agrupados e classificados seguindo as abordagens aplicadas na utilização destes. De acordo com Petrie e Toth (2018) e Wutke (2006), os LST podem ser classificados conforme o modo de levantamento, dividido entre estático (fixo) e dinâmico, no qual o sensor está em movimento no momento da aquisição dos dados, podendo estar a bordo de veículos denominados terrestres. Em relação ao campo de varredura proporcionado pelo instrumento e pela técnica de medição utilizada no sistema, classificadas por Vosselman e Maas (2010) como *time-of-flight* (tempo de voo), Diferença de Fase ou Triangulação.

2.3.1.1 Modo de levantamento

Em modo estático, o LST realiza medições tridimensionais em torno da posição fixa ocupada pelo instrumento, determinando as distâncias percorridas por pulso laser emitido (baseado em princípios de medição distinto) e, simultaneamente, na determinação dos ângulos nos planos horizontal e vertical para cada pulso, por codificadores angulares. A origem do sistema coincide com o centro do instrumento (PETRIE; TOTH, 2018).

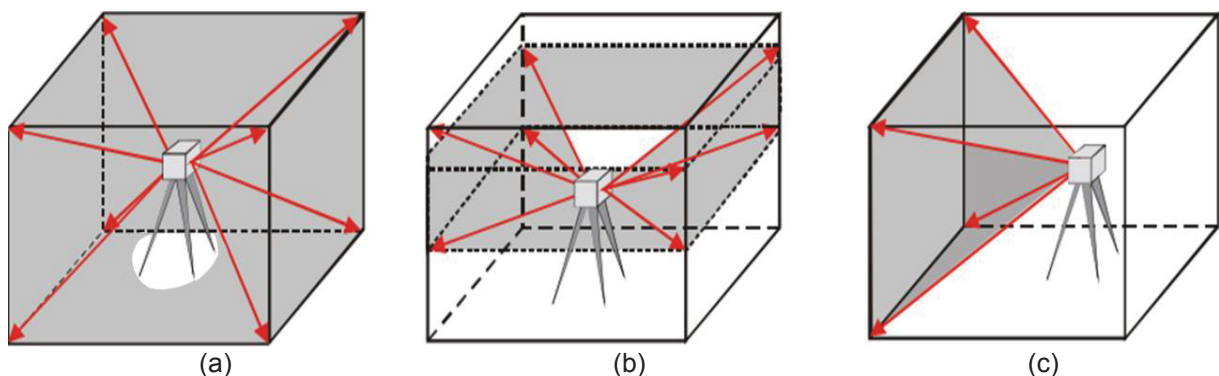
Os LST equipados em sistemas móveis de mapeamento terrestres caracterizam o modo de levantamento dinâmico, assemelhando-se a utilização do laser scanner em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), com a finalidade do aumento da produção com o equipamento. Estes equipamentos são integrados à um Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) e um Sistema de Navegação Inercial (*Inertial Navigation System* - INS) que auxiliam na determinação dos pontos e na qualidade do mesmo (PETRIE; TOTH, 2018; WUTKE, 2006).

2.3.1.2 Campo de varredura

Como decorrências das variadas composições existentes nos sistemas de LST, podem ser encontrados mecanismo de varredura distintos, resultando em diferentes padrões de varredura pelo laser. Conforme ilustrado da FIGURA 3, Staiger (2003) e Petrie e Toth (2018) dividiram os LST em três classes quanto ao campo de varredura dos instrumentos, sendo estes:

- scanners do tipo panorâmico (a) – o campo de varredura laser (*Field of View - FoV*) limitado apenas pela base do instrumento, sendo a cobertura angular de 360° na horizontal e mínima de 180° na vertical, aplicado em mapeamentos topográficos, instalações industriais, mineração, entre outras atividades;
- scanners híbridos (b) – um eixo realiza rotação completa e outro possui inclinação limitada, sendo comumente a cobertura angular horizontal de 360° e vertical geralmente de 50° e 60° , sendo este aplicado em trabalhos como levantamentos em pedreiras profundas e áreas urbanas; e
- scanners do tipo câmera (c) – o FoV possui faixa angular para varredura limitada, semelhante aos quadros de câmeras convencionais, frequentemente aplicado em levantamentos de fachadas.

FIGURA 3 - DIFERENCIAÇÃO ENTRE OS CAMPOS DE VISÃO DE UM LST



FONTE: Adaptado de Staiger (2003).

2.3.1.3 Princípios de medição de distância

Conforme mencionado anteriormente, um dos elementos que distinguem LST corresponde ao método de medição de distâncias presente no sistema. Habitualmente denominada por *time-of-flight* ou *Light Detection And Ranging (LIDAR)* (WUTKE,

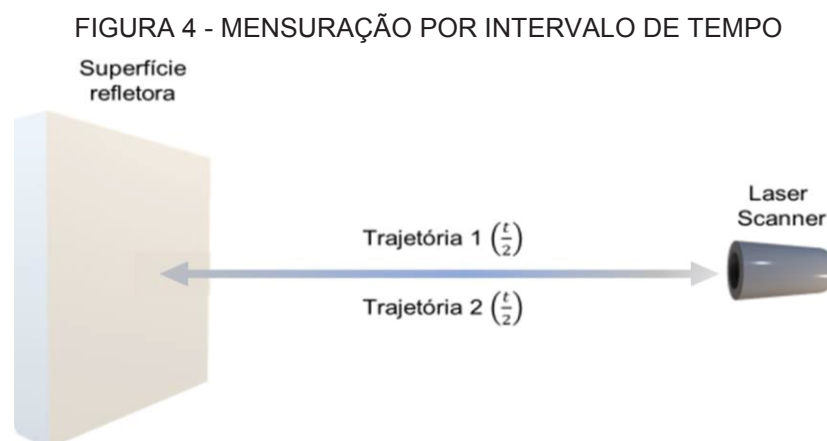
2006), a mensuração por intervalo de tempo baseia-se na propriedade fundamental de velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (VOSSSELMAN; MAAS, 2010). Este método diferencia-se dos demais em razão da capacidade de alcance na medição de distâncias, a qual pode chegar a milhares de metros (PETRIE; TOTH, 2018).

2.3.1.3.1 *Time-of-flight*

O método de mensuração de distância denominado por *time-of-flight*, ou tempo de voo, é o mais utilizado nos LST atuais. Conforme apresentado na FIGURA 4 e demonstrado na equação (4), considera-se o tempo médio entre duas trajetórias de um pulso, sendo a primeira considerada desde a emissão até a interação do mesmo com a superfície de interesse. A segunda trajetória caracteriza a ocorrência de um eco, o que corresponde ao percurso de retorno da onda ao LST.

$$\rho = \frac{c t}{n 2} \quad (4)$$

onde ρ corresponde à distância percorrida pelo pulso; c a velocidade de propagação da onda no vácuo ($c = 299\,792\,458\text{ m/s}$); t ao tempo total de percurso no meio; n fator de correção da refração no ar ($n \approx 1,00025$).



FONTE: O autor (2020).

De forma mais detalhada quanto ao princípio de funcionamento interno deste método, o dispositivo laser é comandado por um processador, iniciando com a geração de pulsos elétricos e, em seguida, transformado por um diodo em um curto

pulso de luz de alta potência. Neste momento, um temporizador preciso começa a contar o tempo desde a emissão do pulso pelo sistema óptico até o retorno da parte da energia refletida por uma superfície de contato. O sinal recebido é transformado por um semicondutor (*Avalanche Photodiode* - APD) num sinal elétrico e o temporizador é interrompido (NADOLINETS; LEVIN; AKHMEDOV, 2017).

Apenas é possível o registro dos pontos em que não há ocorrência de sobreposição entre ecos. Existem, ainda, diferentes métodos de determinação do intervalo de voo, como (VOSSELMAN; MAAS, 2010):

- detecção de pico (*peak detection*);
- limite ou detecção da borda (*threshold or leading edge detection*); e
- detecção de fração constante (*constant fraction detection*).

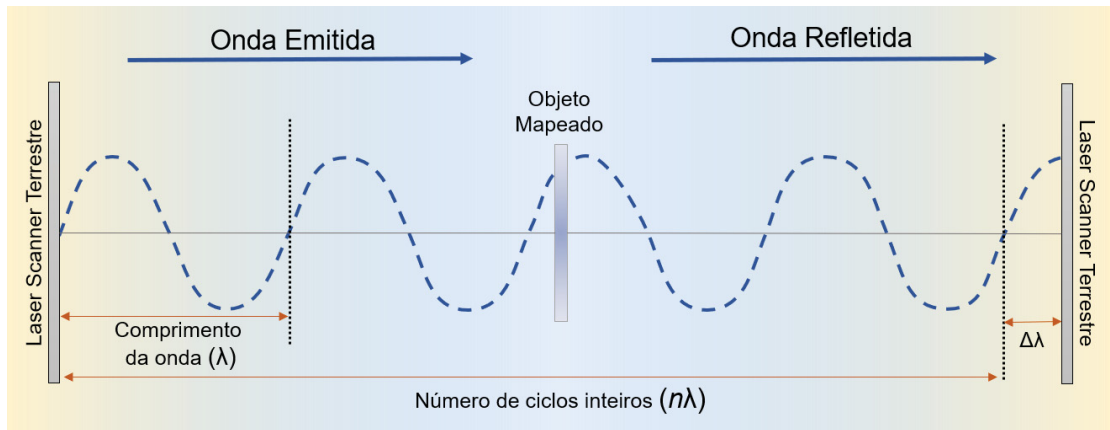
2.3.1.3.2 Diferença de fase

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*. Contudo, este método é limitado quanto a distância de operação, podendo ser limitado a dezenas de metros (PETRIE; TOTH, 2018; (WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014).

Conforme a equação (5) e a representação na FIGURA 5, a partir do comprimento (λ) da onda emitida continuamente, calcula-se a distância entre o sinal emitido pelo LST à superfície refletora (d) por meio da diferença de fase ($\Delta\lambda$) e pela contagem do número de comprimentos emitidos até o retorno do sinal ($n\lambda$) (PETRIE; TOTH, 2018).

$$d = \frac{(n\lambda + \Delta\lambda)}{2} \quad (5)$$

FIGURA 5 - DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS POR DIFERENÇA DE FASE

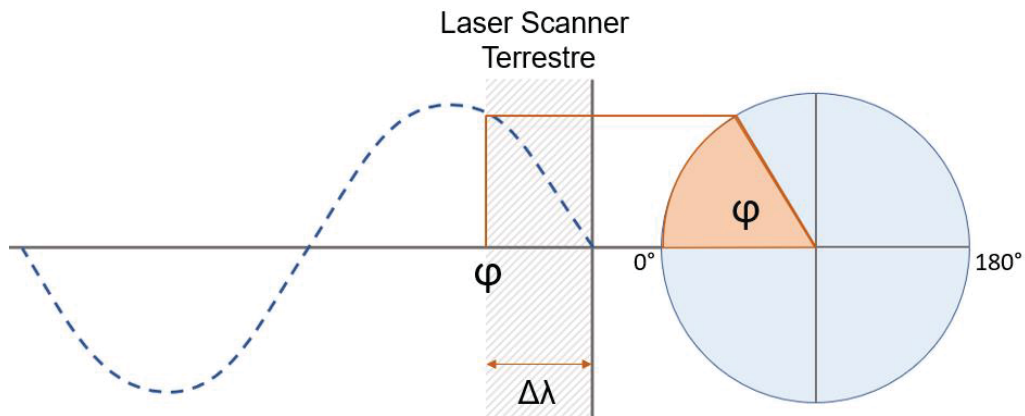


FONTE: Adaptado de Petrie e Toth (2018).

De acordo com a equação (6), a fração $\Delta\lambda$ é determinada a partir do ângulo de fase φ no momento de retorno do sinal ao instrumento, ilustrado pela FIGURA 6.

$$\Delta\lambda = \left(\frac{\varphi}{2\pi}\right) \lambda \quad (6)$$

FIGURA 6 - ÂNGULO DA DIFERENÇA DE FASE DO SINAL RECEBIDO



FONTE: O autor (2020).

Usualmente, sistemas elaborados com método de mensurações de distâncias curtas (menores que 5 m), utilizam a triangulação como mecanismo de medição. Instrumentos que adotam este princípio são comumente utilizados em aplicações industriais, pesquisas médicas, arquivamento de informações sobre objetos em museus, estudos arqueológicos, mapeamento *indoor*, entre outros (PETRIE; TOTH, 2018; VOSSSELMAN; MAAS, 2010).

2.3.1.3.3 Triangulação

O método de medição por triangulação se diferencia dos demais pela presença de sensores *Charge-Coupled Device* (CCD), *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS) ou *Position Sensing Detector* (PSD), além do próprio sistema laser. Neste método, o LST emite feixe laser com ângulo de saída (emissão) conhecido. A porção refletida sobre uma dada superfície é recebida no instrumento e, por triangulação simples, é determinada a distância entre o instrumento e a superfície refletora (LENARTOVICZ, 2013).

2.3.2 Erros de aquisição de dados

Baseando-se na impossibilidade de realização de observações com ausência de erro, sabe-se que os próprios instrumentos geodésicos podem ser considerados como fontes de erros na execução de levantamentos devido as imperfeições na elaboração e montagem dos equipamentos.

Além do instrumento, outras fontes de erros podem afetar a qualidade dos dados levantados por um LST. O QUADRO 3 apresenta parâmetros que influenciam na qualidade dos dados (STAIGER, 2005), como o número e a posição dos pontos ou elementos de ligação presentes em sobreposições de varreduras laser.

QUADRO 3 - PARÂMETROS INFLUENCIADORES DA QUALIDADE DE DADOS DERIVADOS DE UM LASER SCANNER TERRESTRE

Método de aquisição de dados	Densidade de pontos
	Número e posição de pontos de ligação
	Número e posição das estações de escaneamento
	Distância do objeto
	Referencial externo
Objeto	Tamanho
	Curvatura
	Orientação
	Superfície
Ambiente	Vibração
	Refração
	Perturbação óptica
Instrumento	Ângulo de varredura
	Distância de varredura
	Calibração
	Sincronização
Método de cálculo	Reconhecimento de alvos
	Registro
	Cálculo de elementos geométricos

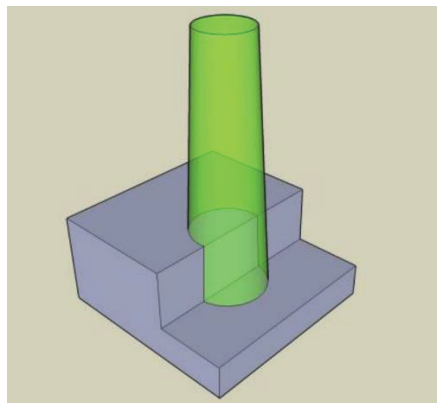
FONTE: Adaptado de Staiger (2005).

2.3.2.1 Erros instrumentais

Os erros nas medições das distâncias e dos ângulos estão relacionados ao afastamento e a posição relativa entre o LST e a superfície varrida, podendo ser minimizado com a posição otimizada do equipamento estacionado (WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014). Jaafar, Meng e Sowter (2017) citam como exemplos de fontes de erros que crescem nas incertezas os seguintes fatores:

- Divergência do feixe laser emitido (*Beam divergence*), considerada a maior fonte de erro;
- Efeito de borda (*Mixed edge*), resultado do parcelamento de um único feixe refletido sobre mais de uma superfície, influenciando na posição do ponto (FIGURA 7);
- 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.

FIGURA 7 - EFEITO DE BORDA NO FEIXE LASER



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

Os erros angulares estão vinculados às partes móveis dos instrumentos, como o eixo de rotação do espelho. O alinhamento não perfeito entre as componentes angulares e o manuseio errado provocam estes erros sistemáticos. Este fato fomenta a importância de calibração do LST, a qual permite determinar parâmetros de correção destes erros e a viabilidade de aplicação dos dados em demais projetos (JAAFAR; MENG; SOWTER, 2017; WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014; VOSSSELMAN; MAAS, 2010).

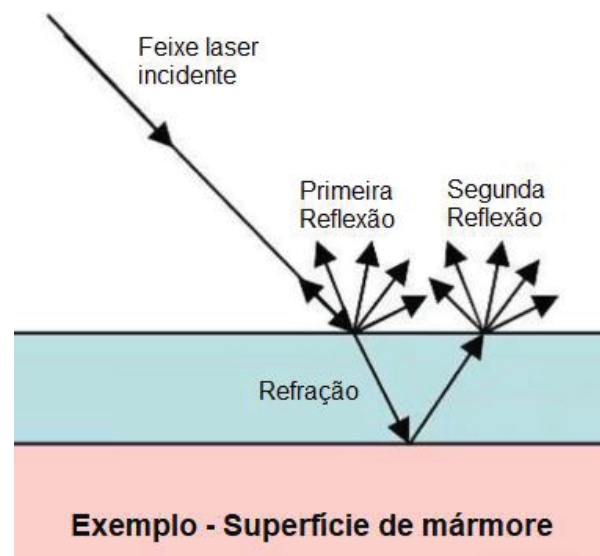
De acordo com Jaafar, Meng e Sowter (2017), os erros de carácter sistemático, ou seja, aqueles relativos ocasionados por fatores instrumentais (imperfeições de montagem do instrumento, por exemplo) podem ser detectados com a aferição do LST e, assim, os erros geométricos podem ser definidos como aleatórios.

2.3.2.2 Erros sobre objeto

Os materiais que compõem as superfícies varridas por levantamentos com LST também são considerados como fontes de erros externos ao instrumento, influenciando na qualidade posicional final dos dados. Como resultados de fatores como forma, material e cor do objeto levantado, a reflectância da superfície é considerada por Jaafar, Meng e Sowter (2017) como a principal FONTE de erro derivado do objeto.

A influência da cor e do material pode resultar em desenvolvimentos de ruídos, como no caso de superfícies muito escuras ou com alta reflectância. Além deste, Jaafar, Meng e Sowter (2017) destacam que podem haver objetos com superfícies semitransparentes, nas quais haverá refração e dupla reflectância, como apresentado na FIGURA 8.

FIGURA 8 - SUPERFÍCIE SEMITRANSARENTE COM REFRAÇÃO E DUPLA REFLECTÂNCIA DO FEIXE LASER



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

2.3.2.3 Erros ambientais

A temperatura interna, atmosfera, umidade, radiação externa e movimentos externos são parâmetros que influenciam na precisão dos pontos determinados. No caso da temperatura, tanto o valor da temperatura externa quanto a interna, provocada pelo aquecimento do equipamento ao longo do funcionamento, podem interferir na qualidade posicional das observações. Já a temperatura externa, em união com outros fatores como pressão e umidade caracterizam os efeitos atmosféricos no levantamento. A diferença de 10°C na temperatura ou de 35 hPa de pressão podem resultar em erros na grandeza de 1mm a cada 100 m (JAAFAR; MENG; SOWTER, 2017; VAN GENECHTEN et al., 2008).

Friedli, Presl e Wieser (2019), a partir de um experimento sobre uma área com deslizamento de terra, demonstraram como os efeitos da refração atmosférica, na casa dos decímetros, afetam a representação de superfícies em varreduras laser a longas distâncias (800 e 25000 m), principalmente em relação à componente ângulo vertical. Para demonstrar a variação nos ângulos verticais, leituras simultâneas ao LST foram realizadas com estações totais, demonstrando que a variação vertical no experimento chegou cerca de 30 cm ao longo de distâncias em torno de 2 km. A comparação entre varreduras próximas ao meio-dia e de noite, apresentaram discrepâncias de até 25 cm.

2.3.2.4 Erros provocados pela posição do equipamento LST no momento da varredura

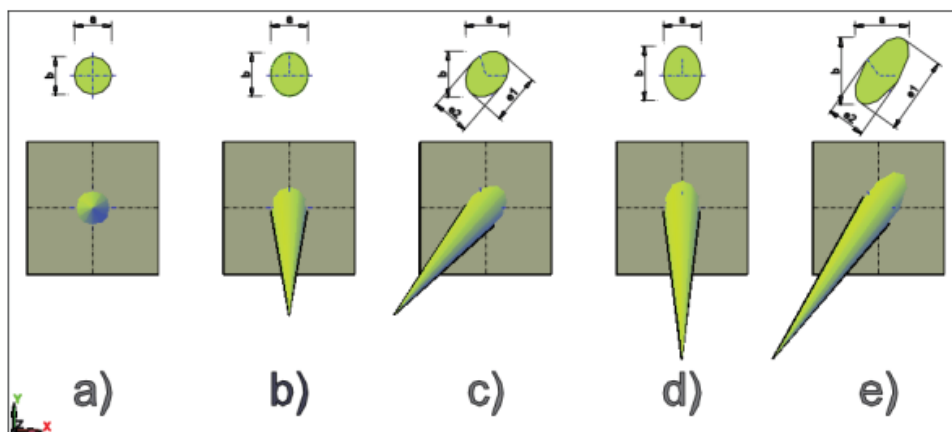
Característica do instrumento escolhido e a posição da estação do LST no momento da varredura são definidas como fontes de erros por Jaafar, Meng e Sowter (2017). Outros erros estão associados a pós-processamento dos dados de varredura, como os erros na medição de posicionamento do instrumento em campo, no registro e georreferenciamento das nuvens (WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014).

Para a aplicação em monitoramento, em alguns casos apenas o registro é aplicado aos dados, mas nos casos de grandes estruturas o georreferenciamento é aplicado e uma rede de controle (contendo erros) é utilizada (JAAFAR; MENG; SOWTER, 2017). No caso do georreferenciamento, segundo Santibañez (2010), este pode ser classificado:

- Direto - quando posição e orientação do LST são determinadas independentemente;
- Indireto – georreferenciamento baseado em alvos com coordenadas definidas.

A escolha da posição onde é instalado o LST deve ser baseada em algumas considerações, como a possibilidade de obstrução da superfície de interesse. Entretanto, o ângulo de incidência e a projeção do feixe laser em uma superfície pode resultar em fenômenos como o *footprint*, conforme ilustrado na FIGURA 9. Quanto mais oblíquos forem os ângulos de incidência do feixe laser (ângulo entre o eixo de incidência do feixe laser e a superfície levantada menores que 90°), pior será a reflexão do laser que sofrerá um espalhamento na superfície refletora, piorando a precisão dos pontos (VAN GENECHTEN et al., 2008). A FIGURA 9-a representa o caso ideal de interação entre o laser e a superfície, em que a projeção do laser configura uma forma circular. Nas demais representações (FIGURA 9-b, FIGURA 9-c, FIGURA 9-d e FIGURA 9-e), o contato do laser com a superfície configura uma forma elíptica, a qual sofre um aumento de área conforme o afastamento do equipamento e superfície (FIGURA 9-d e FIGURA 9-e).

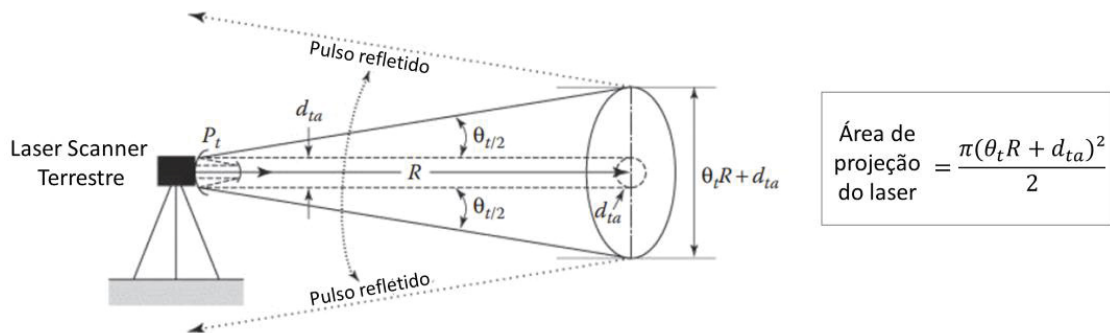
FIGURA 9 - EFEITO FOOTPRINT DO LASER INCIDENTE



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

Não apenas o ângulo de incidência, mas também a própria divergência do feixe emitido que terá a interação com a superfície de forma circular ou elíptica. A FIGURA 10 apresenta a geometria no percurso do laser emitido.

FIGURA 10 - ESPALHAMENTO DO LASER EMITIDO



FONTE: Adaptado de Petrie e Toth (2018).

onde θ é o ângulo de divergência do laser, d_{ta} o diâmetro de abertura e R o alcance do laser (PETRIE; TOTH, 2018).

2.3.3 Nuvem de Pontos

Os conjuntos de dados, com coordenadas tridimensionais definidas em um sistema cartesiano XYZ, são denominados como nuvem de pontos. Estes arquivos, originados a partir de LST, podem conter propriedades relativas a cada coordenada como o valor da intensidade de retorno do laser no ponto e valores RGB, quando os sistemas estão integrados com sensores passivos, como câmeras digitais (VAN GENECHTEN et al., 2008).

2.3.3.1 Segmentação

Em trabalhos que utilizam nuvens de pontos, uma das primeiras tarefas a serem desenvolvidas corresponde a segmentação dos dados, ou seja, a divisão ou repartição de um grupo de observações manual ou automática. Essas delimitações para realização da segmentação podem ser baseadas em critérios de acordo com o projeto e finalidade dos dados. Vosselman e Maas (2010) indicam que a utilização de primitivas como plano, cilindro e superfícies lisas são comumente utilizadas para realização da segmentação. Algoritmos, como o *Random Sample Consensus* (RANSAC), foram desenvolvidos visando a realização da segmentação por meio de elementos predeterminados.

2.3.3.2 Registro e Georreferenciamento

Tratando-se da reconstrução e/ou monitoramento de grandes estruturas, faz-se necessário o planejamento prévio quanto a posição do instrumento em relação as superfícies a serem levantadas. Isto está diretamente relacionado com o objetivo do projeto, a dimensão do objeto mapeado e os atributos do LST a ser empregado, como a técnica de medição, comprimento de onda do laser, a precisão dos medidores angulares. Entre outros aspectos, torna-se importante a definição de mais de uma posição do equipamento. Este fato resulta na necessidade de união das varreduras laser, procedimento denominado por registro ou alinhamento de nuvens de pontos.

Cada varredura com LST resulta em um sistema de referência próprio para as coordenadas. O registro entre nuvens transformará os dados para um sistema de referência local ou global. Segundo Pavan (2018), este processo envolve duas etapas, a identificação de primitivas homólogas em um par de nuvens e a estimativa dos parâmetros de transformação entre elas (rotação e translação). Para isso, deve-se conhecer a posição e orientação dos sistemas individuais. Van Genechten et al. (2008) e Ogundare (2016) caracterizam a realização do registro e georreferenciamento em duas técnicas:

- Direto – Posição, nivelamento e orientação do instrumento definidos com LST, com recursos semelhantes a estações totais nos casos de levantamentos sem refletores;
- Indireto – Utilização de recursos da própria superfície levantada, com alvos naturais ou artificiais que permitam estabelecer a relação entre as estações do laser, podendo ser com alvos, com algoritmos que identifiquem a sobreposição de pontos ou por geometrias da superfície varrida (exemplo: *Iterative Closed Point* – ICP).

As atividades de registro entre nuvens de pontos estão relacionadas a determinação dos parâmetros de transformações do corpo rígido 3D entre os dados, caso não haja diferença de escala, e a aplicação deste na transformação dos dados. O procedimento pode ser realizado pontualmente, através de alvos, ou por primitivas geométricas, como os planos, cilindros ou esferas (VOSSELMAN; MAAS, 2010).

Para Ogundare (2016), o caso específico do georreferenciamento tem papel importante nas atividades de monitoramento, uma vez que a precisão deste processo depende da distribuição dos pontos de referência usados, bem como a respectivas precisões de suas medições nos sistemas de referência ao qual pertencem. Sendo

assim, as incertezas derivadas desta etapa podem ser propagadas às nuvens de pontos e influenciar nas comparações entre varreduras de épocas distintas, inviabilizando a detecção de deslocamentos reais ou indicar falsos deslocamentos.

2.3.3.3 Softwares e Armazenamento de dados

O manuseio dos dados adquiridos por LST se torna uma tarefa complexa devido a densidade de dados medidos e armazenados em cada varredura do instrumento, exigindo um alto custo computacional. Algumas plataformas possibilitam a elaboração e criação de nuvem de pontos a partir de um conjunto de imagens de um mesmo objeto tiradas de diferentes pontos de exposição, como o Pix4Dmapper® e Agisoft Photoscan®, outras permitem a manipulação e extração destes dados, como o Leica *Cyclone Register*® e o CloudCompare®.

Van Genechten et al. (2008) aponta que alguns instrumentos armazenam os dados em coordenadas polares, enquanto outros fornecem dados de coordenadas cartesianas x, y e z, podendo, ainda, trazer informações adicionais, como cores (RGB), intensidade de retorno do sinal, o vetor normal de cada ponto, entre outros. A seguir são apresentados alguns formatos de armazenamento de varreduras laser (THOMSON, 2019; VAN GENECHTEN et al., 2008):

- OBJ – Arquivos utilizado em plataformas gráficas 3D, representando apenas geometrias 3D, normais, cores e textura, normalmente em versão *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII);
- DXF – Formato desenvolvido pela Autodesk para utilização em suas plataformas;
- PTX – Arquivos em formato texto desenvolvido pela Leica, contendo coordenadas x, y e z, entre outras informações adicionais facultativas (intensidade, cores e posição do scanner);
- PTS – Arquivos em formato texto, semelhante ao anterior, contendo coordenadas x, y e z, entre outras informações adicionais;
- XYZ – Arquivos do tipo ASCII sem padronização, contendo coordenadas x, y e z, entre outras informações adicionais;
- XYZRGB – Arquivos em formato texto contendo coordenadas x, y e z e, obrigatoriamente, valores de cores (RGB) para cada ponto;

- E57 – Arquivos neste formato também pode ser usado para armazenar imagens e metadados dos instrumentos, utilizando código binário e ASCII, podendo conter normais, cores e intensidade.

2.4 AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES DE UM PLANO

De acordo com Schneider (2006), pontos levantados por LST pertencentes a elementos geométricos (como planos e esferas) sobre a superfície de estruturas monitoradas, podem ser ajustados para parametrizar estes elementos. A comparação dos parâmetros das primitivas varridas em diferentes épocas permite tirar conclusões sobre a deformação (global e local) do objeto.

A alta densidade de observações LST, com alto grau de automação, pode compensar a possibilidade da baixa qualidade posicional dos pontos levantados quando observados isoladamente. Segundo Monserrat e Crosetto (2008), a quantidade de observações adquiridas favorece alta redundância para a estimativa de parâmetros dos elementos levantados, baseando-se no MMQ.

Para o registro automático entre nuvens, Pavan e Santos (2015) utilizaram superfícies planas detectadas pelo algoritmo RANSAC, seguido do ajustamento das observações segundo elemento plano pelo MMQ. A abordagem de superfície-superfície para estimar parâmetros de transformação resultou em precisões na ordem dos centímetros.

No caso específico do elemento plano, de acordo com Lima (2014) e Venture (2015), um determinado plano α (considerando um sistema tridimensional XYZ contido em um espaço 3D), pode ser definido conforme a equação (7), a partir de uma reta ortogonal a este (vetor normal n), contendo um ponto A de coordenadas A , B e C , tal que (LIMA, 2014):

“Afirmamos que existe um número real D tal que a equação do plano α é

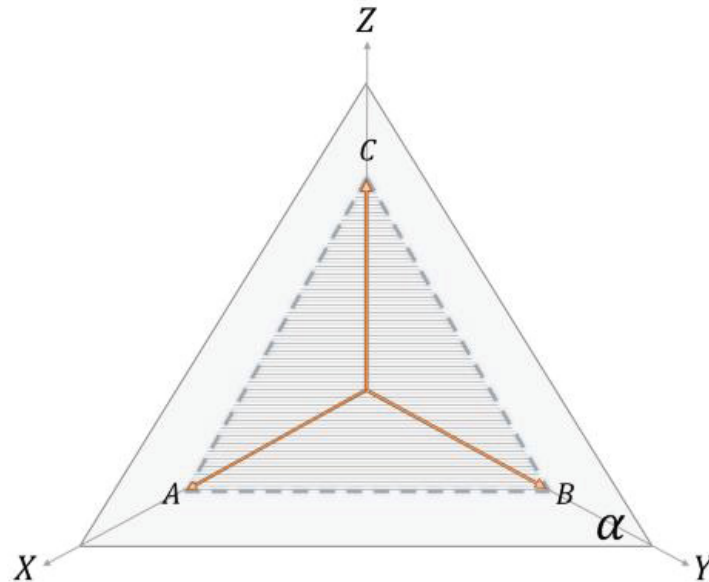
$$Ax + By + Cz = D \quad (7)$$

Isto é, o ponto $P = (x, y, z)$ pertence ao plano α se, e somente se, suas coordenadas satisfazem a relação acima.”

O elemento D não define o plano (ERDÉLYI, 2017), portanto, A , B e C são denominados parâmetros definidores dos planos α , podendo ser representados

geometricamente como vetores decomposição do vetor resultante normal ao plano nos eixos XYZ , representando também os pontos onde o plano secciona os eixos do sistema, conforme a FIGURA 11.

FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DOS PARÂMETROS A, B E C DE UM PLANO α



FONTE: O autor (2020).

Tal relação é definida como equação geral do plano (PAVAN, 2011), assumindo-se como verdadeira para todos os pontos contidos no plano. Considerando-se, ainda, um dado número real $k \neq 0$, assume-se como definidor do mesmo plano a equação (8) a seguir (LIMA, 2014):

$$kAx + kBx + kCz = kd \quad (8)$$

Segundo Ventura (2015), um plano pode ser definido, no espaço tridimensional, por meio de três abordagens distintas:

- por um ponto e por dois vetores;
- por dois pontos e por um vetor; e
- por três pontos não colineares.

Entretanto, sabe-se que a determinação de dados representativos sobre uma dada grandeza, a partir de múltiplas observações e suas inconsistências, é apenas viável por meio do ajustamento destes dados. Aplicando-se métodos que permitem a

minimização das incertezas contidas nas observações é possível fazer com que as observações atendam condições desejadas (GHILANI, 2018).

Portanto, na impossibilidade de serem realizadas mensurações exatas, considera-se que todas as observações adquiridas contêm erros (GHILANI, 2018). O MMQ visa o cálculo de um valor x representativo, tal que este torne mínima a soma dos quadrados dos resíduos, ou seja, a soma quadrática das n diferenças (v_i) entre x e os n valores observados será a menor possível, conforme apresentado na equação (9) (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \text{mínimo} \quad (9)$$

Uma alternativa para determinação dos parâmetros representativos do plano é a utilização de *softwares*, como a plataforma livre CloudCompare, desenvolvida para a edição e processamento de nuvens de pontos com muitas observações (acima de 10 milhões de pontos), como registro, segmentação, informações estatísticas, entre outros (CLOUDCOMPARE, 2015). Contudo, o desvio-padrão para cada parâmetro não é disponibilizado pelo software, o que restringe posteriores avaliações vinculadas a tais grandezas, como no teste Qui-Quadrado generalizado (AYDIN, 2014).

Ghilani (2018) destaca o ajustamento pelo MMQ como um método rigoroso, facilmente aplicável e que permite análises após a realização do ajustamento ou previamente aos levantamentos.

No ajustamento das observações indiretas, deseja-se estimar grandezas baseadas em observações. No que tange a representação paramétrica de superfícies, o MMQ permite calcular os coeficientes que definem uma determinada primitiva geométrica que melhor modela um conjunto de observações (SANTIBAÑEZ, 2010).

Conforme a equação do plano demonstrada acima, cada equação relaciona os parâmetros definidores do plano (A, B e C) e três observações cartesianas dos pontos contidos nele (x, y e z). Portanto, cabe a adoção de um ajustamento pelo modelo combinado, uma vez que, para o modelo paramétrico cada equação deveria estar ligada a uma única grandeza mensurável (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015).

2.4.1 Modelo Combinado

Conforme Gemael, Machado e Wandresen (2015), o ajustamento pelo modelo combinado pode ser considerado como a união do modelo paramétrico e do modelo dos correlatos, ou estes serem uma particularidade do modelo combinado. O primeiro considera que as observações ajustadas podem ser definidas como uma função explícita dos parâmetros não conhecidos (também ajustados), enquanto no segundo as observações são ajustadas com base em equações de condições impostas, sendo que os parâmetros não fazem parte deste sistema de equações (GHILANI, 2018; GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015).

No que tange o ajustamento combinado, o vetor das observações realizadas (L_b) e dos parâmetros que se deseja estimar (X_a), são definidos pelas relações expressas nas equações (10) e (11) (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$V = L_a - L_b \quad (10)$$

$$X = X_a - X_0 \quad (11)$$

onde:

- L_a – Vetor dos valores observados ajustados;
- V – Vetor dos resíduos;
- X_a – Vetor dos parâmetros ajustados;
- X – Vetor correção dos parâmetros iniciais X_0 .

Neste caso, os valores observados não serão expressos explicitamente pelos parâmetros ajustados, como no modelo paramétrico, mas sim através do ajustamento simultâneo com os parâmetros, conforme a equação (12) (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$F(L_a, X_a) = 0 \quad (12)$$

Substituindo a relação dada na equação (12) pelas equações (10) e (11), obtém-se a equação (13). Em seguida, a linearização da expressão por Série de Taylor, em relação ao vetor das observações e ao vetor dos parâmetros ajustados,

resulta na aproximação apresentada na equação (14) (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$F(X_a, L_a) = F(X_0 + X, L_b + V) \quad (13)$$

$$F(X_0 + X, L_b + V) \cong F(X_0, L_b) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0} (X_a - X_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial L_a} \right|_{L_b} (L_a - L_b) = 0 \quad (14)$$

$$A = \frac{\partial F}{\partial X_a} \quad (15)$$

$$B = \frac{\partial F}{\partial L_a} \quad (16)$$

$$AX + BV + W = 0 \quad (17)$$

em que a matriz A (equação (15)) consiste na matriz das derivadas parciais das r equações de condição em relação aos u parâmetros, a matriz B nas derivadas das r equações de condição em relação as n observações e $F(X_0, L_b) = W$ (equação (17)) o vetor erro de fechamento, ou seja, valores calculados a partir das r equações de condição considerando as observações realizadas (contendo erros) e os valores iniciais estimados para parâmetros (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015).

No modelo combinado, os graus de liberdade gl (equação (18)) é a condição para aplicação do modelo combinado (equação (19)):

$$gl = r - u \quad (18)$$

$$n > r - u \quad (19)$$

A matriz peso (P) está relacionada diretamente com o grau de confiabilidade de uma observação em relação as demais e ao tamanho da correção que será aplicada às observações no ajustamento, sendo definida como inversamente proporcional a variância. Em algumas situações, a matriz peso pode ser descrita como a inversa da matriz variância-covariância (Σ) (GHILANI, 2018), conforme as equações (20), (21) e (22):

$$Q = \frac{1}{\sigma_0^2} \Sigma \quad (20)$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{Lb1}^2 & \sigma_{Lb1Lb2} & \dots & \sigma_{Lb1Lbn} \\ \sigma_{Lb2Lb1} & \sigma_{Lb2}^2 & \dots & \sigma_{Lb2Lbn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{LbnLb1} & \sigma_{LbnLb2} & \dots & \sigma_{Lbn}^2 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$P = Q^{-1} = \sigma_0^2 \Sigma^{-1} \quad (22)$$

onde:

- Q – Matriz Cofator;
- σ_0^2 – Fator de variância *a priori* (arbitrário);
- Σ – Matriz variância-covariância;
- σ_{ij} – Covariância das observações i e j ;
- P – Matriz Peso.

Para que o vetor dos resíduos das observações e o vetor das correções dos parâmetros iniciais atendam a forma quadrática fundamental do MMQ, aplica-se a técnica lagrangiana. Com os multiplicadores de Lagrange, representados pelo vetor K na função ϕ (equação (23)), iguala-se a zero as derivadas parciais da função ϕ em relação as incógnitas V , K e X (equação (24), (25), (26)) (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$\phi = V^T P V - 2K^T (A X + B V + W) = \text{Mínimo} \quad (23)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial V} = 2P V - 2B^T K ; P V - B^T K = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial K} = -2(A X + B V + W) ; A X + B V + W = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial X} = -2A^T K ; A^T K = 0 \quad (26)$$

A resolução das equações normais pode ser representada pelo sistema apresentado a seguir, contendo hipermatrizes (matrizes cujos elementos são matrizes) (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$\begin{bmatrix} V \\ K \\ X \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} P & B^{-1} & 0 \\ B & 0 & A \\ 0 & A & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ W \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Desenvolvendo da resolução do sistema, tem-se:

$$V = P^{-1}B^TK \quad (28)$$

$$K = -M^{-1}(AX + W) \quad (29)$$

$$X = -(A^TM^{-1}A)^{-1}A^TM^{-1}W \quad (30)$$

em que M representa o produto matricial dado por $M = BP^{-1}B^T$. A partir da equação 30 é possível determinar o vetor dos parâmetros ajustados conforme a equação (11) (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015).

Para o cálculo das respectivas precisões dos parâmetros ajustados (Σ_{X_a}), determina-se a matriz variância-covariância dos mesmos a partir da lei de propagação na equação (30), em que são propagadas as variâncias e covariâncias das observações sobre os parâmetros ajustados (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$\Sigma_{X_a} = \hat{\sigma}_0^2 (A^TM^{-1}A)^{-1} \quad (31)$$

em que $\hat{\sigma}_0^2$ representa o fator de variância *a posteriori*, determinado por meio da relação $\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T PV}{gl}$ (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015).

Uma forma de avaliar o ajustamento e as precisões estimadas para as observações pode ser feita pela comparação dos valores de σ_0^2 e $\hat{\sigma}_0^2$, a partir do teste hipotético unilateral baseado na distribuição Qui-Quadrado, comparando o valor da estatística calculada (equação (34)) com o valor crítico (equação (35)). Os dois valores

podem ser considerados estatisticamente iguais quando a relação estabelecida pela equação (36) for obedecida, sendo α o nível de significância estipulado para o teste.

$$H_0: \hat{\sigma}_0^2 \leq \sigma_0^2 \quad (32)$$

$$H_A: \hat{\sigma}_0^2 > \sigma_0^2 \quad (33)$$

$$\chi_{calculado}^2 = \frac{V^T P V}{\sigma_0^2} \quad (34)$$

$$\text{Valor crítico de teste: } \chi_{gl,1-\alpha}^2 \quad (35)$$

$$\text{Aceita } H_0 \text{ se: } \chi_{calculado}^2 \leq \chi_{gl,1-\alpha}^2 \quad (36)$$

Cabe ressaltar que as matrizes A e B são elaboradas a partir do modelo funcional considerando os valores iniciais atribuídos aos parâmetros e obtidos nas observações, respectivamente. Entretanto, nos casos em que o modelo matemático a ser utilizado é não-linear, aplica-se a Série de Taylor para a sua linearização. A omissão de termos da Série de Taylor e adoções de valores iniciais implica na necessidade de realização de processo iterativo até um valor de convergência estipulado (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015).

2.5 TESTE QUI-QUADRADO GENERALIZADO APLICADO AO MONITORAMENTO

O Teste Global do ajustamento é uma metodologia usualmente utilizada na detecção de erros não aleatórios nas observações, assim como o procedimento *Data Snooping* para identificação de erros grosseiros (KLEIN, 2011). Entretanto, Aydin (2014) apresenta uma abordagem para detecção de deformação em redes geodésicas avaliando se as mudanças ocorridas nos pontos investigados foram significativas. A metodologia apresentada, nomeada por *Testing Whole Network-Method*, corresponde a teste Qui-Quadrado generalizado de significância e busca verificar a ocorrência de deslocamento na rede como um todo. Para tal, o vetor deslocamento Δ entre valores de grandezas estimadas em duas épocas distintas (vetores g_1 e g_2 , equação (32)), pode ser detectado por meio da rejeição da hipótese nula de ausência de deslocamento entre épocas (equação (34)), isto é, com a aceitação da hipótese alternativa de ocorrência de deslocamento entre épocas

(equação (35)), considerando ainda a soma das matrizes variância-covariância (MVC) de cada época (Σ_{g_1} e Σ_{g_2} , equação (33)):

$$\Delta = g_2 - g_1 \quad (32)$$

$$\Sigma_{\Delta} = \Sigma_{g_1} + \Sigma_{g_2} \quad (33)$$

$$H_0: E(\Delta) = 0 \quad (34)$$

$$H_A: E(\Delta) \neq 0 \quad (35)$$

Klein (2011) enfatiza que o teste unilateral é mais poderoso do que o teste bilateral, ou seja, apresenta maior probabilidade de correta rejeição da hipótese nula. Aydin (2014) indica como possibilidades a utilização da distribuição F ou a distribuição χ^2 (Qui-quadrado). Todavia, o autor indica que o teste χ^2 é mais poderoso, assumindo que os valores de Σ_{g_1} e Σ_{g_2} são conhecidos *a priori*.

Neste contexto, o teste Qui-Quadrado tem como objetivo avaliar se os planos ajustados em diferentes épocas são estatisticamente iguais ou não, ou seja, se a ocorrência de deslocamentos provocados sobre o plano pode provocar a mudança nos parâmetros que descrevem cada posição do plano.

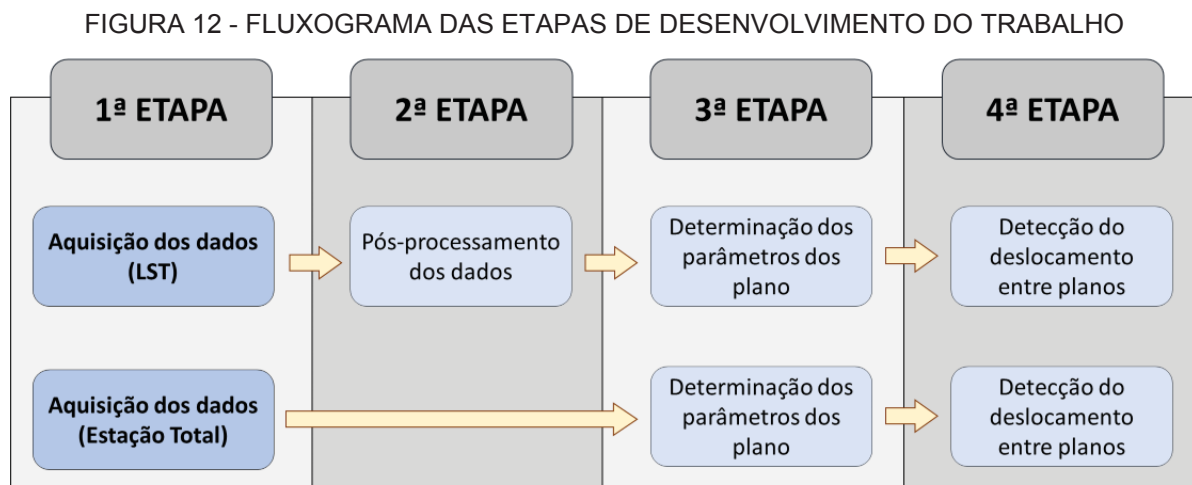
O teste é baseado nos resultados obtidos nos ajustamentos das observações em diferentes épocas. Sendo assim, a equação (36) apresenta, a partir do vetor deslocamento, da MVC e do sigma a-priori (σ_0^2) adotado, o valor da estatística calculada ($\chi_{calculado}^2$) a ser comparada com o valor crítico, com base nos graus de liberdade e no nível de significância adotado ($\chi_{teórico}^2$).

$$\chi_{calculado}^2 = \frac{\Delta^T \Sigma_{\Delta}^{-1} \Delta}{\sigma_0^2} \quad (36)$$

Se $\chi_{calculado}^2 \leq \chi_{teórico}^2$ então a hipótese nula é aceita, não havendo distinção dos parâmetros ajustados, a um nível de significância α . Mas se $\chi_{calculado}^2 > \chi_{teórico}^2$, rejeita-se a hipótese nula e aceita-se a hipótese alternativa, indicando que os parâmetros ajustados são distintos, ou seja, houve deslocamento do plano testado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordadas as características dos instrumentos utilizados na pesquisa, bem como a metodologia proposta na avaliação de detecção da movimentação do plano de controle. Conforme a FIGURA 12, o trabalho foi desenvolvido em 4 etapas. A primeira consistiu na aquisição das nuvens de pontos pelo LST e pela estação total. Em seguida, foi realizado o pós-processamento dos dados originados do LST, com a segmentação e transformação do formato dos dados brutos. Na terceira etapa foram realizados o ajustamento e determinação dos parâmetros de cada plano levantado. Por fim, a quarta etapa compreendeu a verificação do deslocamento relativo dos planos em diversos cenários de teste.



FONTE: O autor (2020).

3.1 INSTRUMENTOS UTILIZADOS

A obtenção das nuvens de pontos, sobre um plano de controle experimental, foi realizada a partir de duas abordagens: por irradiação tridimensional, empregando-se a estação total robótica TS15, e pelo levantamento de varredura laser, empregando-se o LST panorâmico BLK360, ambos produzidos pela empresa Leica Geosystems.

3.1.1 Estação Total TS15

A TS15 é uma estação total robotizada de alta precisão, com características técnicas de $\pm 1''$ de precisão nominal para medidas angulares e $\pm (1 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm})$ para medidas de distâncias em primas, com comprimento de onda de 658 nm. No caso de outras superfícies (sem prisma), a precisão na mensuração de distâncias é de $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$ (LEICA GEOSYSTEMS, 2015).

3.1.2 Laser Scanner Terrestre BLK360

O BLK 360 possui uma unidade laser Classe 1, com comprimento da onda 830 nm e um prisma rotativo vertical em base rotativa horizontal, viabilizando o campo de varredura laser do tipo panorâmico. Além disso, simultaneamente à varredura laser, o instrumento opera com três câmeras HDR com 150 megapixels, as quais permitem a obtenção de imagens esféricas (360°), e uma câmera termográfica, a qual possibilita a geração de imagens termográficas panorâmicas no intervalo de -10°C à 65°C (LEICA GEOSYSTEMS, 2018).

Ao longo de cada escaneamento, a taxa de aquisição pode chegar à 360 mil pontos por segundo, com alcance de varredura mínimo de 60 cm e máximo de 60 m até a superfície. A precisão nominal dos pontos tridimensionais, para o sistema laser, é de 4 mm a 10 m e 7 mm a 20 m, respectivamente. O sistema possibilita a realização do escaneamento em três modos, os quais influenciam no tempo de rastreamento e na precisão final dos pontos (TABELA 1).

TABELA 1 - CONFIGURAÇÕES DE ESCANEAMENTO DO BLK 360

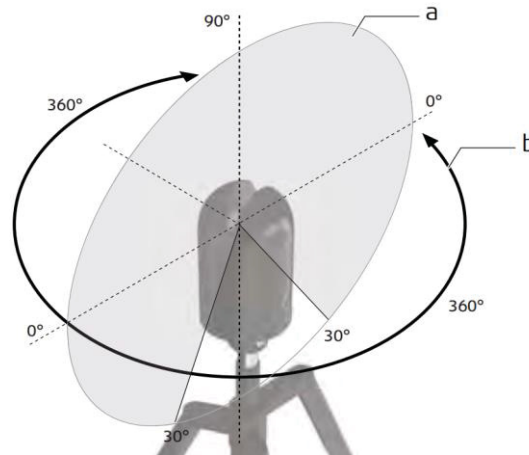
Modo de escaneamento	Precisão (mm/10m)	Duração do escaneamento (min)
Rápido	20	0,67
Padrão	10	1,83
Alta densidade	5	3,67

FONTE: Adaptado de Leica Geosystems (2018).

Na FIGURA 13 são apresentados os campos de varredura panorâmica vertical (a) e horizontal (b) de registro dos pontos, com varredura do laser de 300° e

360°, respectivamente. Cabe ressaltar que o BLK360 apenas realiza varreduras no modo panorâmico.

FIGURA 13 - CAMPOS DE VARREDURA DO LASER SCANNER TERRESTRE BLK 360



FONTE: Adaptador de Leica Geosystems (2018).

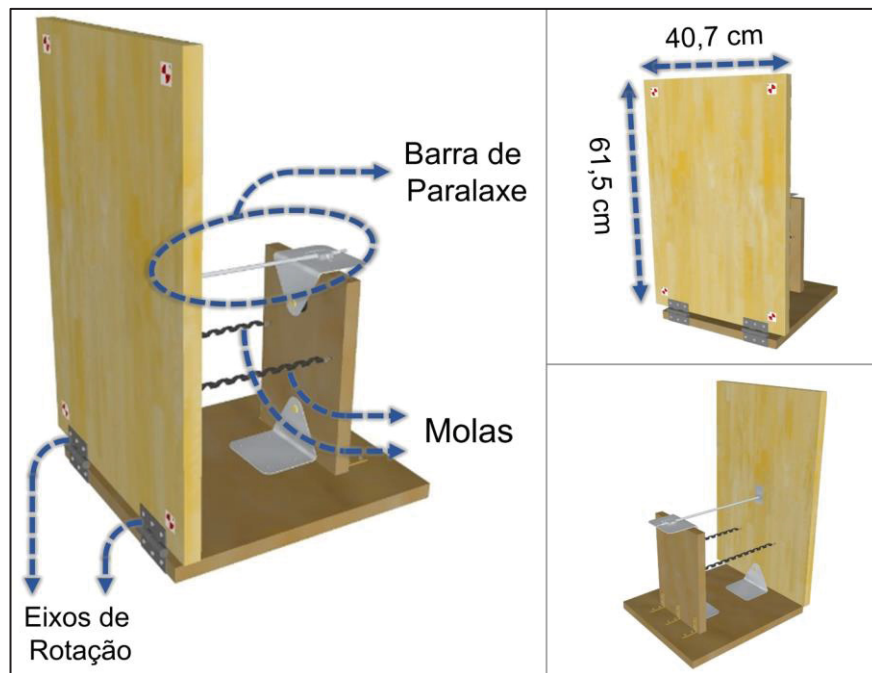
A comunicação do LST com equipamentos externos (Tablet e dispositivo de computação) segue a tendência atual de comunicação por conexão sem fio, utilizando a tecnologia Wi-Fi a partir de uma antena WLAN 360° presente na base do instrumento.

3.1.3 Plano de Controle Experimental

Para a investigação da metodologia proposta em laboratório, elaborou-se um protótipo contendo uma superfície plana experimental. Apenas os pontos amostrais (coordenadas tridimensionais) obtidos sobre tal superfície, denominada Plano de Controle Experimental (PCE), constituíram as observações aplicadas às posteriores avaliações.

O Plano de Controle Experimental é um sistema constituído por uma placa de madeira de 0,25 m², fixada à uma base horizontal por meio de duas dobradiças metálicas, viabilizando a movimentação do plano por uma barra de paralaxe. Esta barra possui uma gradação submilimétrica, o que permitiu a quantificação da movimentação da placa. A fim de se manter a movimentação do plano proporcional ao deslocamento da barra, foram fixadas molas na face posterior ao plano de controle (FIGURA 14).

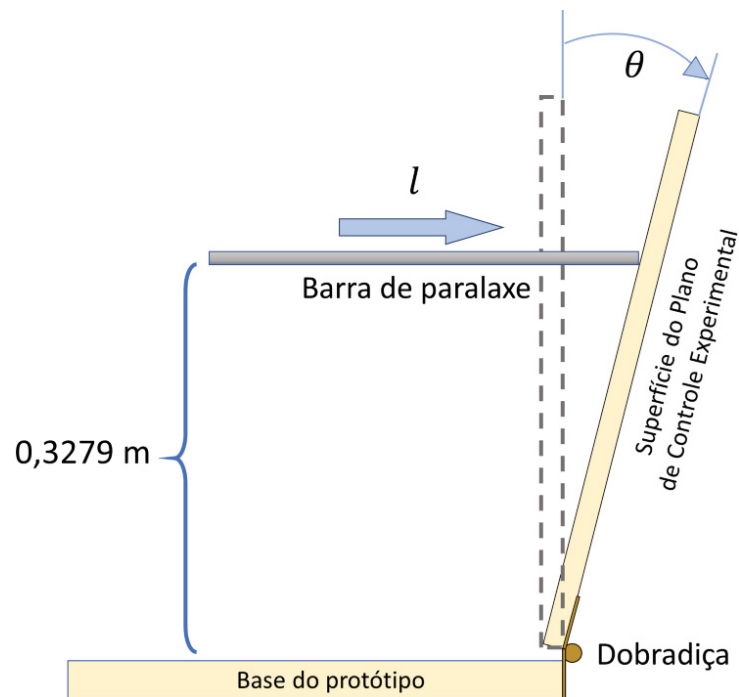
FIGURA 14 - PROTÓTIPO DO PLANO DE CONTROLE EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2020).

Conforme apresentado na FIGURA 15, a movimentação da superfície plana ocorre a partir da rotação (θ) das dobradiças, fixadas na base do protótipo, impulsionadas pela movimentação horizontal de uma barra de parallaxe (l).

FIGURA 15 - MOVIMENTAÇÃO DO PLANO DE CONTROLE EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2020).

A altura entre o eixo de rotação da placa e o ponto de incidência da barra de paralaxe foi medida em 0,3279 m. Conforme a FIGURA 16-a, esta determinação foi realizada empregando-se nivelamento geométrico de 1º ordem com o nível DNA03 da Leica Geosystems, no qual a mira foi posicionada na base do PCE e sobre a barra da hasta de paralaxe, descontando-se a distância entre a base do protótipo e o eixo de rotação da dobradiça (FIGURA 16-b) e a diferença entre a parte superior da barra de paralaxe (onde a mira foi apoiada) e do ponto de incidência no plano, sendo estas duas grandezas medidas com um paquímetro. A barra foi fixada paralelamente à base do sistema e encontra-se perpendicular ao plano quando este também está perpendicular à base do protótipo.

FIGURA 16 - DETERMINAÇÃO DA ALTURA DO PONTO DE INCIDENCIA DA BARRA DE PARALAXE



(a)



(b)

FONTE: O autor (2020).

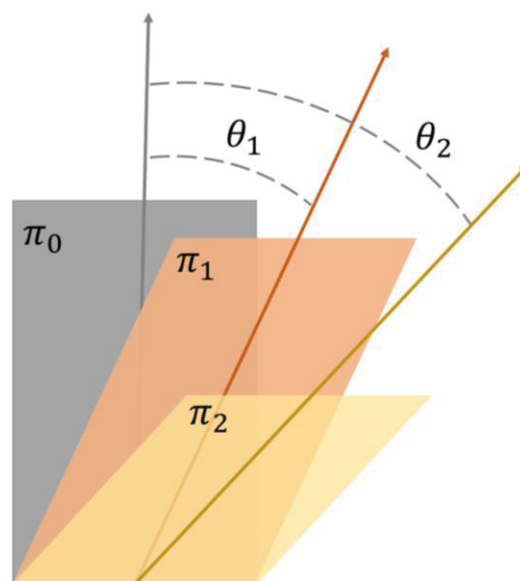
Visto que neste trabalho é proposta uma avaliação com aplicação de análise estatística nos resultados para o monitoramento de estruturas, as variações aplicadas em d , ou seja, na barra de paralaxe e que configuram o cateto horizontal a partir do triângulo retângulo formado pela inclinação do plano, foram inferiores, próximas e

superiores as grandezas de 10 e 15 milímetros. Estes valores foram adotados por Jerke (2019) como as variações máximas toleráveis, horizontal e vertical respectivamente, em seu trabalho de monitoramento tridimensional a partir do levantamento dos alvos fixados a jusante de uma barragem pelo método de irradiação utilizando estações totais robotizadas de diferentes precisões.

3.2 AQUISIÇÃO DA AMOSTRA SOBRE O PLANO DE CONTROLE

O experimento foi realizado no Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG), no campus Politécnico da Universidade Federal do Paraná, de modo que os levantamentos fossem realizados de forma controlada a fim de que fatores ambientais e possíveis erros instrumentais fossem minimizados. Sendo assim, visou-se a detecção dos deslocamentos do elemento plano em diferentes épocas, conforme ilustra a FIGURA 17. Nesta, o plano π_0 , utilizado como referencial, sofre um deslocamento por meio de uma rotação na base do plano, ocasionando as posições indicadas como π_1 e π_2 . O resultado dos deslocamentos são as inclinações demonstradas como θ_1 e θ_2 , as quais podem ser determinadas a partir dos parâmetros definidores do plano para cada posição levantada.

FIGURA 17 - DESLOCAMENTO E INCLINAÇÃO DO PLANO



FONTE: O autor (2020).

O experimento foi realizado com a aquisição de pontos tridimensionais a partir do levantamento por meio de grades regulares com a estação total TS15 e por

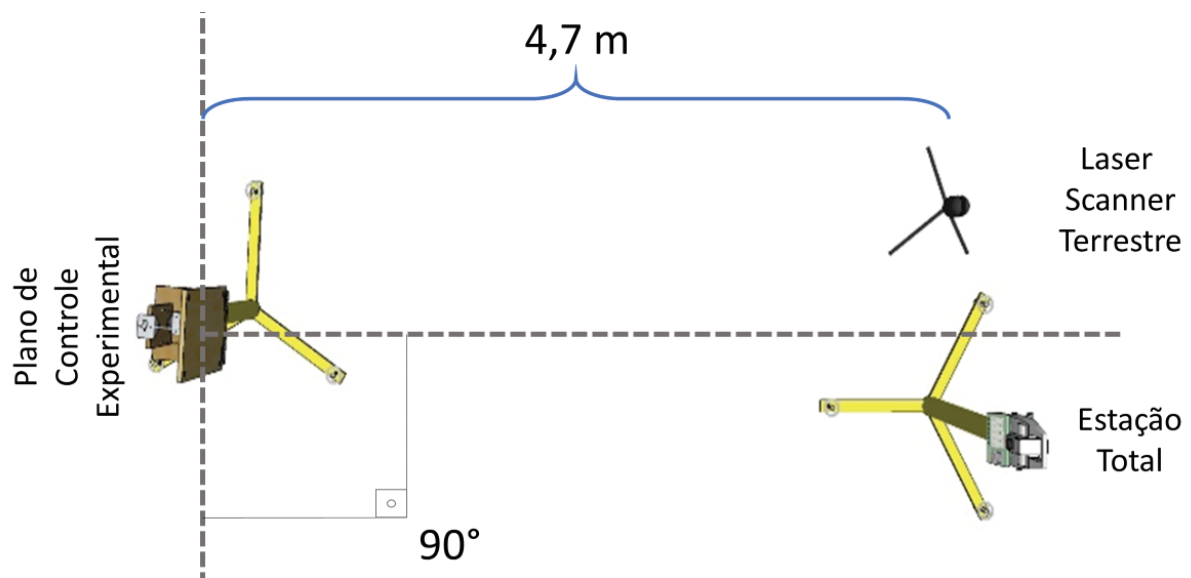
varreduras laser com o BLK360. A estação total foi orientada em um referencial arbitrário, sendo mantido ao longo do experimento, uma vez que o referencial utilizado não interfere na determinação dos parâmetros dos planos, desde que este fosse o mesmo na comparação dos planos para detecção dos deslocamentos. Cabe ressaltar que, além das amostras sobre os planos, foram mensurados os deslocamentos ocasionados com a barra de paralaxe e calculadas as inclinações no protótipo decorrentes destes movimentos, a partir das dimensões do protótipo e da graduação da barra.

As varreduras com laser BLK360 foram realizadas simultaneamente com a estação total. Como LST utilizado não permite a orientação do equipamento para o levantamento dos dados, a posição do equipamento não foi alterada nas respectivas etapas do experimento, abordadas a seguir. Esta característica do experimento permitiu a dispensa do processo de registro das nuvens de pontos para um mesmo referencial, uma vez que esta etapa acrescentaria erros nos dados a serem testados.

O processo de aquisição foi dividido em duas etapas, as quais se diferenciaram quanto as posições dos instrumentos em relação ao plano de controle. Para cada etapa, a posição dos equipamentos foi mantida, visando a manutenção do referencial em cada posição do plano, viabilizando a identificação da inclinação entre épocas distintas.

De acordo com a FIGURA 18, o protótipo foi instalado em um tripé industrial e os equipamentos mantidos a mesma distância dele. Na primeira etapa foram realizados levantamentos de modo que os ângulos de incidência dos feixes lasers sobre o plano fossem próximos à 90° .

FIGURA 18 - POSIÇÃO DOS INSTRUMENTOS NA PRIMEIRA ETAPA DO EXPERIMENTO

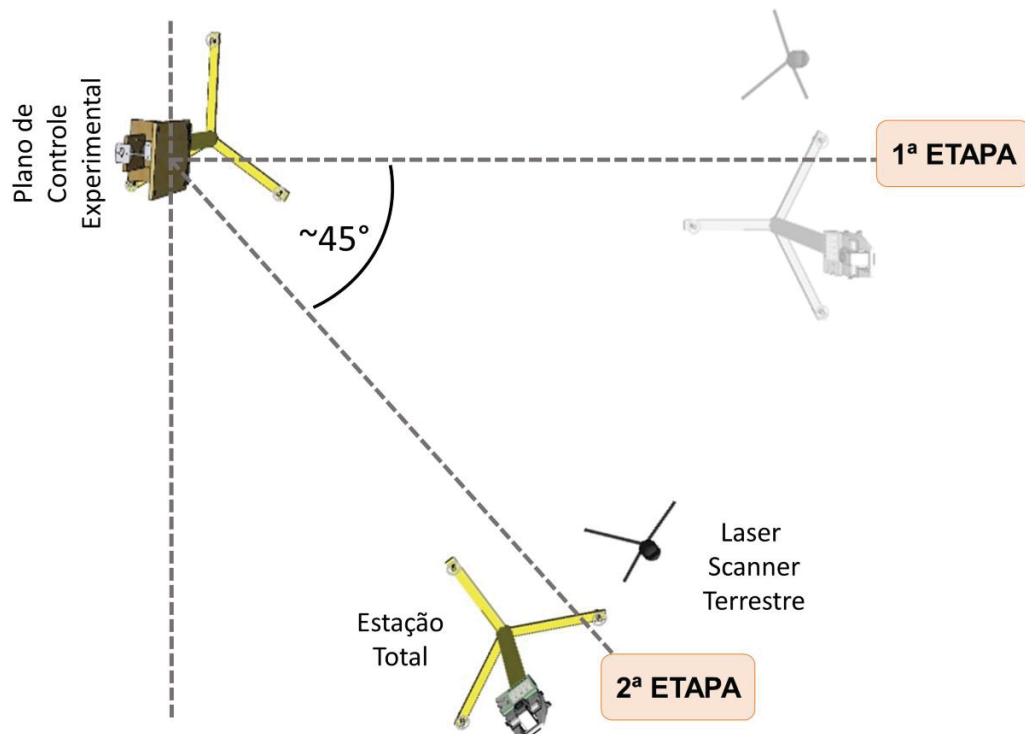


FONTE: O autor (2020).

A distância entre os instrumentos e o protótipo foi de aproximadamente 4,7 m. Visto que não é possível se obter a posição central do eixo do LST na estação de levantamento, a distância entre o instrumento e o plano não pode ser medida de forma direta.

Na segunda etapa, os instrumentos foram deslocados a fim de serem realizadas varreduras com ângulo de incidência próximo de 45° em relação ao eixo ortogonal ao plano, como na primeira etapa. Busca-se investigar, neste experimento, a influência das posições dos instrumentos e conseqüentemente do ângulo de incidência do feixe laser sobre a superfície medida na aplicação do método proposto (FIGURA 19).

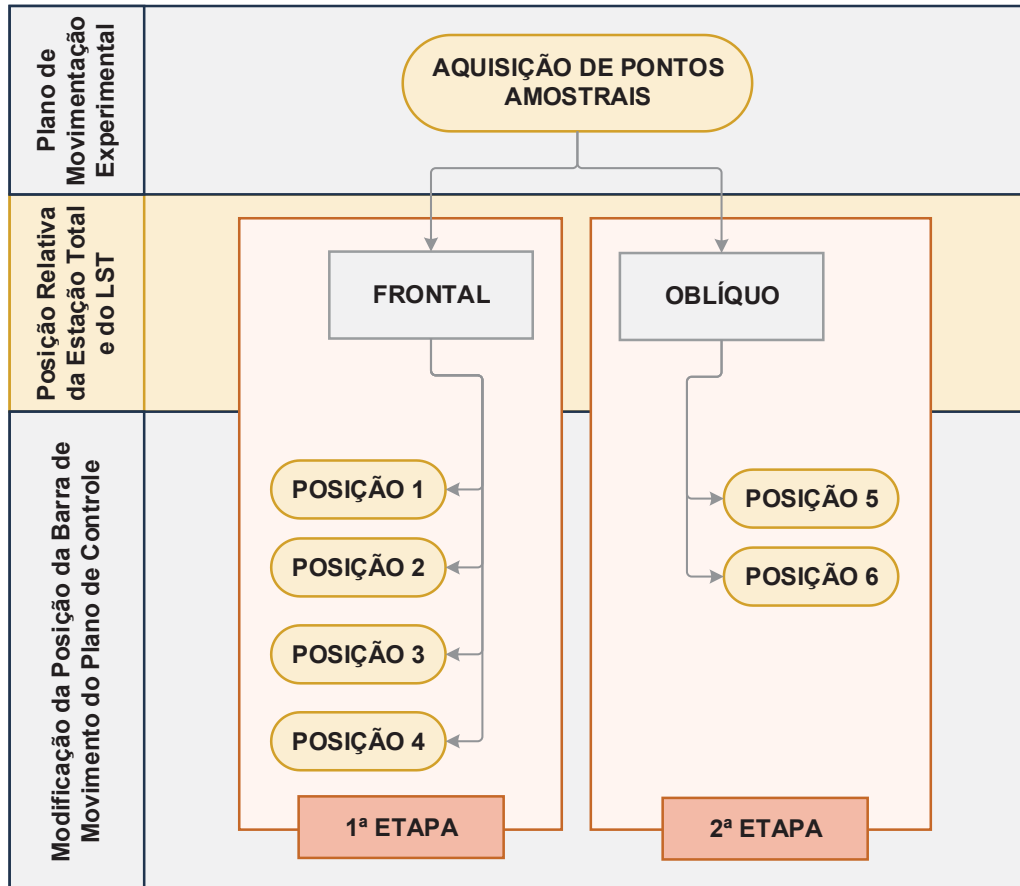
FIGURA 19 - POSIÇÃO DOS INSTRUMENTOS NA SEGUNDA ETAPA DO EXPERIMENTO



FONTE: O autor (2020).

Cabe ressaltar que se preveniu a realização do experimento em um longo período de tempo, evitando-se as influências das variações dos fatores ambientais sobre as medições, como as altas variações de temperaturas (LEICA, 2018). Cada conjunto de observações simultâneas foi realizado dentre do período de 7 minutos. Conforme apresentado na Figura 20, 6 posições distintas do plano foram levantadas simultaneamente pelo BLK360 e pela TS15 variando-se a barra de paralaxe em quatro épocas, modificando a inclinação do plano de controle com a força exercida por esta na parte posterior da superfície.

FIGURA 20 - ETAPAS DE OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS DAS NUVENS DE PONTOS

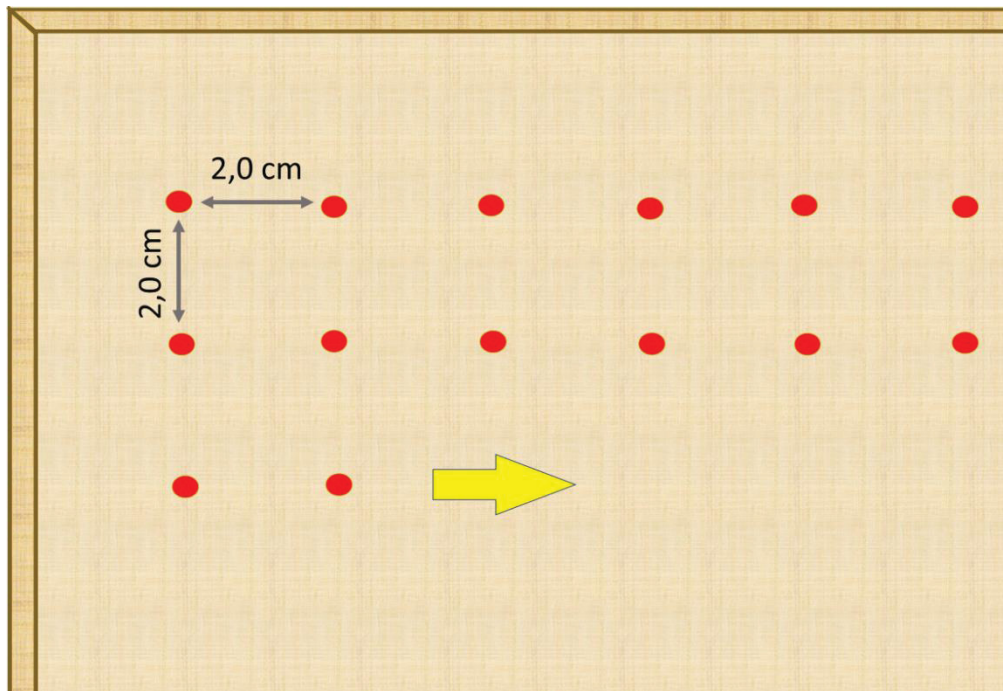


FONTE: O autor (2020).

Posteriormente, as comparações para detecção do movimento foram feitas de forma relativa. Portanto, em relação à primeira etapa, a Posição 1 foi considerada como o referencial para as demais posições no modo de levantamento frontal. Similar a esta, a Posição 5 foi considerada a referência para detecção de deslocamento no modo oblíquo. Tanto na Posição 1, quanto na Posição 5, o protótipo foi nivelado, mantendo-se também o plano de controle na posição vertical em relação a base de apoio com o auxílio de um esquadro com ângulo de 90°.

O LST foi configurado para realizar levantamento em densidade alta de pontos, a fim de ser obtida uma amostra abundante de pontos com a melhor precisão fornecida pelo equipamento, como visto na TABELA 1. A estação total TS15 permite o levantamento de nuvem de pontos em forma de *grid*. Sendo assim, os pontos foram levantados com espaçamento uniforme de 2,0 cm, conforme apresentado na FIGURA 21.

FIGURA 21 - LEVANTAMENTO EM GRID COM A ESTAÇÃO TOTAL TS15.

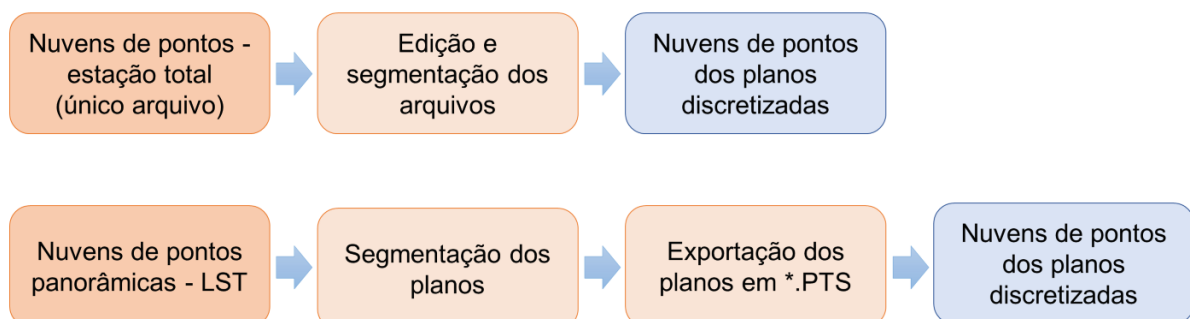


FONTE: O autor (2020).

3.3 PÓS-PROCESSAMENTO DA NUVEM DE PONTOS

A FIGURA 22 apresenta o fluxograma de desenvolvimento da etapa de pós-processamento dos dados brutos obtidos, para, posteriormente, serem obtidos os parâmetros relativos a cada posição do plano levantada. Os arquivos dos pontos levantados pela estação total e pelo LST seguem princípios de armazenamento distintos e, assim, abordagens de tratamentos distintas tiveram que ser realizadas.

FIGURA 22 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE PÓS-PROCESSAMENTO



FONTE: O autor (2020).

Os dados obtidos a partir do levantamento em posição direta com a estação total foram armazenados pelo instrumento em único arquivo (formato *.TXT), contendo

a identificação (nomenclatura) de cada ponto, seguido das coordenadas cartesianas x , y e z . De posse deste arquivo e das anotações em laboratório, foram criados novos arquivos de texto contendo apenas as nuvens correspondentes a cada posição varrida pela estação.

As nuvens provenientes do LST foram importadas individualmente no *software* Cyclone Register, o qual permite a manipulação dos dados brutos, bem como a exportação destes em demais formatos, compatíveis com outras plataformas de processamento de nuvem de pontos.

O laser BLK360 realiza varreduras apenas no modo panorâmico. Dessa forma, foi necessária a segmentação do plano experimental, a fim de serem derivadas nuvens apenas com os pontos de interesse. Assim, as nuvens de pontos foram segmentadas manualmente em cada posição de varredura, com a exclusão dos pontos da nuvem que não foram levantados sobre o plano de interesse no Cyclone Register. A partir da identificação visual do plano experimental, com o auxílio da informação RGB, os demais pontos foram excluídos, derivando-se novas nuvens de pontos.

Outra operação realizada foi a exclusão dos pontos sobre as dobradiças fixadas no plano. Para tal, utilizou-se a informação da intensidade registrada nos pontos, uma vez que estes itens poderiam induzir a erros nas etapas seguintes por serem observações realizadas fora do plano de controle.

As nuvens segmentadas foram exportadas no formato *.PTS, possibilitando a utilização dos dados em outras plataformas. Em seguida, os arquivos foram salvos no formato *.TXT para utilização dos mesmos para o ajustamento no MATLAB.

Visto que neste trabalho pretendeu-se avaliar a viabilidade e confiabilidade de uma metodologia para detecção do deslocamento de um plano de controle, optou-se por não realizar a segmentação automática, o registro ou georreferenciamento das nuvens. Estes processos propagam erros inevitáveis sobre as informações (VOSSSELMAN, MAAS, 2010).

3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PLANO

Após a delimitação e segmentação das nuvens de pontos 3D, relativos a cada posição do plano, calcularam-se os parâmetros A , B e C e suas respectivas precisões a partir do ajustamento das observações, utilizando o modelo combinado na

linguagem de programação MATLAB. Deste modo, o número de parâmetros do ajustamento u é igual a três e o número de equações de condição r condiz com o número de pontos levantados sobre o plano para cada varredura. O *script* desenvolvido para o ajustamento está disponível no APÊNDICE A.

Para realização do ajustamento, a equação paramétrica do plano apresentada na equação (7) foi simplificada. Com base na indicação de Lima (2014) de igualdade de planos multiplicados por um fator $k \neq 0$, a equação (7) foi dividida pelo parâmetro $-D$, uma vez que este representa apenas um fator de escala e não define espacialmente o plano. Assim, conforme o desenvolvimento a seguir, os parâmetros foram renomeados por a, b e c , adotando-se a equação (41) para o ajustamento:

$$Ax + By + Cz = D \quad (37)$$

$$Ax + By + Cz - D = 0 \quad (38)$$

$$\frac{A}{-D}x + \frac{B}{-D}y + \frac{C}{-D}z + 1 = 0 \quad (39)$$

$$\frac{A}{-D} = a; \quad \frac{B}{-D} = b; \quad \frac{C}{-D} = c \quad (40)$$

$$ax + by + cz + 1 = 0 \quad (41)$$

Neste caso, a equação (41) apresenta três observações para cada ponto, as coordenadas x , y e z . Além disso, o modelo funcional é linear em relação as observações e em relação aos parâmetros, não necessitando de iterações. O vetor das observações para o ajustamento foi elaborado com as coordenadas dos n pontos levantados pelas varreduras lasers, como demonstrado na equação (42). Conseqüentemente, o número de linhas do vetor corresponderá ao número de pontos sobre o plano vezes 3:

$$L_b = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} \quad (42)$$

A matriz peso do ajustamento foi elaborada com base na precisão nominal do instrumento e a distância entre o LST e o plano de controle experimental. Com base nas precisões nominais 4 mm a 10 m e 7 mm a 20 m indicadas no item 3.1.2, definiu-se a equação reduzida da reta, para as duas precisões, por Regressão Linear no *software* Excel. Assim, foi elaborada a equação (43) para determinação da qualidade dos pontos, de acordo com a distância entre instrumento e a superfície:

$$DP = (0,0003 * s) + 0,001 \quad (43)$$

onde:

- DP – Desvio-padrão do ponto levantado;
- s – Distância entre o instrumento e a superfície levantada.

Cabe ressaltar que o georreferenciamento da nuvem de pontos e a determinação exata da posição do laser poderia fornecer a distância entre os pontos levantados e o LST. Todavia, esta técnica também ocasionaria na inserção de novos erros nas observações (WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014). Sendo assim, neste trabalho, optou-se por mensurar e utilizar uma distância única entre o instrumento e o plano de controle para todos os levantamentos.

Com base na equação (43) e na distância (s) de 4,7 m entre o BLK360 e o plano de controle, o desvio-padrão calculado (DP), com base na precisão nominal, foi de 0,00241 m (2,41 mm). Considerando que este valor estimado corresponde a precisão 3D do ponto e que o ajustamento é aplicado sobre as coordenadas x , y e z , o inverso da variância ($variância = DP^2$) foi dividido por 3, compondo a matriz diagonal da matriz-peso do ajustamento.

De forma similar, a matriz peso para as observações derivadas da estação seguiram a mesma metodologia anterior, porém utilizando a precisão nominal da TS15. Para a distância de varredura, a precisão das observações foi de 0,002 m (2,00 mm), sendo a variância ($2,00^2 \text{ mm}^2$) dividida por 3 no cálculo da matriz P.

Ressalta-se que a rigor, existe correlação entre as coordenadas x , y e z de cada ponto, em função destas serem obtidas pelos mesmos dados, conforme indicam as equações (1), (2) e (3). Entretanto, como neste trabalho não se utilizou os valores de ρ , θ e α , as correlações entre x , y e z foram negligenciadas, sendo a sua influência sobre os resultados do ajustamento uma sugestão para investigações futuras.

3.5 IDENTIFICAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS ENTRE PLANOS

Considerando a Posição 1 e a Posição 5 do plano como referências para as demais, no QUADRO 4 são apresentadas as sequências de testes para detecção da ocorrência de deslocamentos relativos entre os planos. Ao todo, 2 grupos de testes foram realizados: o primeiro consistiu em um grupo de 4 testes referentes aos planos ajustados a partir dos dados levantado com a varredura do LST e o segundo contemplando 4 testes com a nuvens originadas a partir da estação total.

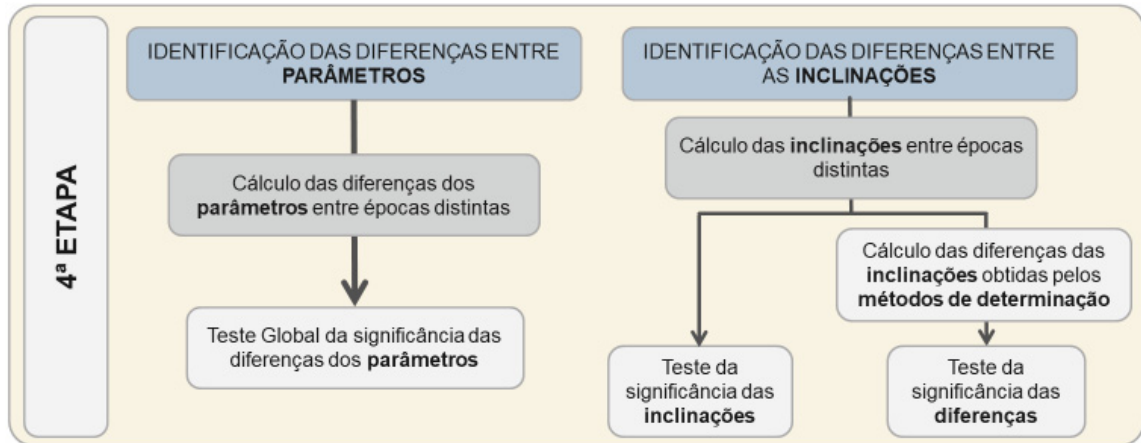
QUADRO 4 - TESTES REALIZADOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE DESLOCAMENTO ENTRE PLANOS

TESTES PARA DETECÇÃO DE DESLOCAMENTO			
Dados do LST		Dados da Estação Total	
Posição Frontal		Posição Frontal	
Teste 1	Posição 1 x Posição 2	Teste 1	Posição 1 x Posição 2
Teste 2	Posição 1 x Posição 3	Teste 2	Posição 1 x Posição 3
Teste 3	Posição 1 x Posição 4	Teste 3	Posição 1 x Posição 4
Posição Oblíqua		Posição Oblíqua	
Teste 4	Posição 5 x Posição 6	Teste 4	Posição 5 x Posição 6

FONTE: O autor (2020).

Conforme indicado na Figura 12, a 4ª etapa do desenvolvimento deste trabalho contemplou a detecção dos deslocamentos do plano. A Figura 23 apresenta as duas linhas de investigação aplicadas sobre os testes indicados no Quadra 4. A primeira linha visou a identificação de diferenças diretas entre os parâmetros entre os pares das posições avaliadas. O segundo seguimento buscou avaliar os deslocamentos no protótipo por meio das inclinações dos planos, analisando a significância dos ângulos obtidos, bem como a comparação dos resultados calculados a parti do protótipo e das nuvens de pontos levantadas com a estação total e com o LST.

FIGURA 23 - FLUXOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DA ETAPA DE DETECÇÃO DO DESLOCAMENTO



FONTE: O autor (2020).

Os deslocamentos efetuados no plano foram investigados inicialmente pelas possíveis diferenças calculadas entre os parâmetros que descrevem os planos relativos a cada posição. Sendo assim, neste trabalho, obtiveram-se os vetores das diferenças Δ_{t_0t} conforme a equação (44):

$$\Delta_{t_0t} = \begin{bmatrix} a_t - a_{t_0} \\ b_t - b_{t_0} \\ c_t - c_{t_0} \end{bmatrix} \quad (44)$$

onde a_t , b_t e c_t representam os parâmetros dos planos sobre os quais se avaliou a diferença, na época t , enquanto a_{t_0} , b_{t_0} e c_{t_0} configuram os parâmetros do plano na posição de referência, na época t_0 .

A MVC aplicada no teste resultou da soma dos elementos σ_{ij} das MVC obtidas pelo ajustamento dos dados na época t_0 (Σ_{t_0}) e na época t (Σ_t), ou seja, de cada posição investigada no teste, como apresentado na equação (45):

$$\Sigma_{t_0} + \Sigma_t = \Sigma_{\Delta_{t_0t}} = \begin{bmatrix} \sigma_{a_{t_0}}^2 + \sigma_{a_t}^2 & \sigma_{a_{t_0}b_{t_0}} + \sigma_{a_t b_t} & \sigma_{a_{t_0}c_{t_0}} + \sigma_{a_t c_t} \\ \sigma_{a_{t_0}b_{t_0}} + \sigma_{a_t b_t} & \sigma_{b_{t_0}}^2 + \sigma_{b_t}^2 & \sigma_{b_{t_0}c_{t_0}} + \sigma_{b_t c_t} \\ \sigma_{a_{t_0}c_{t_0}} + \sigma_{a_t c_t} & \sigma_{b_{t_0}c_{t_0}} + \sigma_{b_t c_t} & \sigma_{c_{t_0}}^2 + \sigma_{c_t}^2 \end{bmatrix} \quad (45)$$

Neste trabalho, a aplicação do teste Qui-Quadrado, segundo Aydin (2014), foi dada conforme a equação (46), arbitrando-se a variância *a priori* da unidade peso (σ_0^2) igual a 1:

$$X_{\Delta_{t_0 t}}^2 = \frac{\Delta_{t_0 t}^T \Sigma_{\Delta_{t_0 t}}^{-1} \Delta_{t_0 t}}{\sigma_0^2} \quad (46)$$

O valor crítico ($X_{gl,\alpha}^2$) referente a distribuição Qui-Quadrado foi determinado com u graus de liberdade que, neste caso, correspondeu ao número de parâmetros testados, ou seja, $u = 3$. Este valor foi confrontado com $X_{\Delta_{t_0 t}}^2$ para níveis de significância de 5% e 1%.

Posteriormente a identificação das diferenças entre os planos, os deslocamentos promovidos no protótipo foram avaliados por meio das inclinações do plano, as quais decorreram da movimentação da barra de paralaxe e da rotação das dobradiças fixadas na base do plano. Para tal, determinaram-se os valores destes ângulos a partir de três abordagens: pelas dimensões dos protótipos em casa posição, pelas nuvens de pontos levantadas com a estação total e as nuvens levantadas com o LST.

Conforme mencionado anteriormente, a barra de paralaxe permitiu a quantificação do deslocamento linear na direção da barra. Assim, considerando a altura da barra de paralaxe, a perpendicularidade entre esta e o plano e entre o plano e a base do protótipo, nas posições de referência dos testes (Posição 1 e Posição 5), calcularam-se os ângulos de inclinação a partir das dimensões do protótipo. Conforme a Figura 15, a equação (47) forneceu os ângulos θ a partir da h da barra de paralaxe em relação a base do protótipo e os deslocamentos l da barra de paralaxe.

$$\text{tg } \theta = \frac{l}{h} \quad (47)$$

Os cálculos das inclinações a partir das nuvens de pontos se deu por meio do produto vetorial das normais do par de planos que formam a inclinação, ou seja, os planos respectivos as posições do protótipo que estão sendo avaliadas.

Considerando os planos $\pi_1: a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0$ e $\pi_2: a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0$ e os respectivos vetores normais $n_1(a_1, b_1, c_1)$ e $n_2(a_2, b_2, c_2)$, os ângulos θ formados entre estes dois planos é o menor ângulo ($0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$) determinado entre os

vetores normais n_1 e n_2 . Assim, com produto interno dos vetores n_1 e n_2 , têm-se as relações das equações (48) e (49) (STEINBRUCH; WINTERLE, 1987).

$$\cos \theta = \frac{|\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2|}{|\vec{n}_1| \cdot |\vec{n}_2|} \quad (48)$$

$$\cos \theta = \frac{|a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2|}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \quad (49)$$

Um teste para verificar se os valores dos ângulos das inclinações são significativos foi proposto, baseado na comparação das dimensões mensuradas para cada ângulo e das respectivas variâncias, na distribuição Qui-Quadrado. Conforme a equação (50), a estatística χ^2 a ser testada é determinada com base nas diferenças entre as grandezas obtidas (o) em relação ao esperado (e) para as mesmas, em um total de k categorias (MAGALHÃES; LIMA, 2010).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \quad (50)$$

Neste trabalho, foi considerado que os ângulos calculados são significativos se estiverem fora do intervalo delimitado pelas respectivas precisões, ou seja, $\theta \notin \pm \sigma_\theta$. Desenvolvendo a expressão presente na equação (50), colocando como situação limite a igualdade das observações com as precisões ($o = e$), obtém-se que a expressão interna da fórmula seria igual a zero.

$$\frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} = 0 \quad (51)$$

$$\frac{o^2}{e} - \frac{2oe}{e} + \frac{e^2}{e} = 0 \quad (52)$$

Dividindo a equação (52) por e , como forma de simplificação, tem-se:

$$\frac{o^2}{e^2} - \frac{2oe}{e^2} + \frac{e^2}{e^2} = 0 \quad (53)$$

$$\frac{o^2}{e^2} - \frac{2o}{e} + 1 = 0 \quad (54)$$

Conforme indicado pela equação (54), para que a equação (51) seja verdadeira, a relação dada por $\frac{o}{e}$ deve ser igual a um. Entretanto, e representa a precisão avaliada, logo, admite apresentar valores negativo ou positivo. Elevando-se a fração ao quadrado $\left(\frac{o^2}{e^2}\right)$, a avaliação pode ser realizada com as respectivas variâncias dos ângulos.

Assim, elaboraram-se as hipóteses, nas quais foram testados se os ângulos são estatisticamente maiores do que a sua variância em módulo:

- H_0 : θ é estatisticamente nulo (não houve inclinação do plano);
- H_a : θ é estatisticamente significativa (houve inclinação do plano).

Para tal, foram obtidas as derivadas parciais de θ em relação aos parâmetros a_1, b_1, c_1, a_2, b_2 e c_2 . Aplicando-se a lei de propagação das covariâncias (equação (55)), foram calculadas as variâncias de θ em função das derivadas parciais indicadas anteriormente (GHILANI, 2018):

$$\sigma_{\theta}^2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial a_1} & \frac{\partial \theta}{\partial b_1} & \dots & \frac{\partial \theta}{\partial c_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{a_1}^2 & \sigma_{a_1 b_1} & \sigma_{a_1 c_1} & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{b_1 a_1} & \sigma_{b_1}^2 & \sigma_{b_1 c_1} & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{c_1 a_1} & \sigma_{c_1 b_1} & \sigma_{c_1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{a_2}^2 & \sigma_{a_2 b_2} & \sigma_{a_2 c_2} \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{b_2 a_2} & \sigma_{b_2}^2 & \sigma_{b_2 c_2} \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{c_2 a_2} & \sigma_{c_2 b_2} & \sigma_{c_2}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial a_1} \\ \frac{\partial \theta}{\partial b_1} \\ \frac{\partial \theta}{\partial c_1} \\ \frac{\partial \theta}{\partial a_2} \\ \frac{\partial \theta}{\partial b_2} \\ \frac{\partial \theta}{\partial c_2} \end{bmatrix} \quad (55)$$

As equações das respectivas derivadas utilizadas estão disponíveis no APÊNDICE B. A estatística de teste foi calculada conforme a equação (56):

$$\chi_{calculado}^2 = \frac{\theta^2}{\sigma_{\theta}^2} \quad (56)$$

O critério adotado para este teste foi de rejeição da H_0 se $\chi_{calculado}^2$ for maior que valor crítico tabelado ($\chi_{teórico}^2$) na distribuição Qui-Quadrado para um grau de liberdade e níveis de significância de 5% e 1%.

Por fim, foram realizadas comparações entre os ângulos obtidos a partir dos dados com estação total, LST e protótipo por meio de uma abordagem estatística, avaliando se os valores encontrados podem ser considerados semelhantes ou não. Sendo θ_{ET} as inclinações determinadas pelos levantamentos com a estação total, θ_{LST} com o LST e θ_P pelo protótipo, foram estabelecidas três hipóteses (equação (57), (58) e (59)):

$$\begin{cases} H_0: \theta_{LST} = \theta_P \\ H_a: \theta_{LST} \neq \theta_P \end{cases} \quad (57)$$

$$\begin{cases} H_0: \theta_{ET} = \theta_P \\ H_a: \theta_{ET} \neq \theta_P \end{cases} \quad (58)$$

$$\begin{cases} H_0: \theta_{LST} = \theta_{ET} \\ H_a: \theta_{LST} \neq \theta_{ET} \end{cases} \quad (59)$$

Neste caso, foi realizado o teste bilateral ao invés do teste unilateral, uma vez que o ângulo testado pode ser maior ou menor do que o ângulo de referência em cada teste de hipóteses. Com isso, as estatísticas de teste foram elaboradas conforme as equações (60), (61) e (62):

$$\chi_{\theta_{LST} \times \theta_P}^2 = \frac{(\theta_{LST} - \theta_P)^2}{\sigma_{\theta_{LST}}^2} \quad (60)$$

$$\chi_{\theta_{ET} \times \theta_P}^2 = \frac{(\theta_{ET} - \theta_P)^2}{\sigma_{\theta_{ET}}^2} \quad (61)$$

$$\chi_{\theta_{LST} \times \theta_{ET}}^2 = \frac{(\theta_{LST} - \theta_{ET})^2}{\sigma_{\theta_{LST}}^2 + \sigma_{\theta_{ET}}^2} \quad (62)$$

em que $\sigma_{\theta_{LST}}^2$ e $\sigma_{\theta_{ET}}^2$ são os valores das variâncias das respectivas inclinações estadas, para cada equipamento empregado e $\chi_{\theta_{LST} \times \theta_P}^2$, $\chi_{\theta_{ET} \times \theta_P}^2$ e $\chi_{\theta_{LST} \times \theta_{ET}}^2$ correspondem as estatísticas calculadas para as comparações dos valores obtidos com a LST e o protótipo, a estação total e o protótipo e, por fim, o LST e a estação total,

respectivamente. Neste estudo, a variância para a inclinação determinada com o protótipo foi considerada nula, o que aumenta a probabilidade de rejeição da hipótese nula, ou seja, aumenta a probabilidade de indicar que os resultados obtidos entre diferentes instrumentos são estatisticamente diferentes.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos ajustamentos dos planos, a detecção da diferença entre planos de diferentes épocas, a detecção da inclinação dos planos entre diferentes épocas e ainda a detecção da diferença da inclinação estimada dos planos entre os diferentes instrumentos utilizados.

4.1 PARÂMETROS DOS PLANOS AJUSTADOS

No levantamento das observações, os deslocamentos do plano relativos as Posições 1 e 5 foram quantificados. A TABELA 2 apresenta os resultados dos deslocamentos gerados com a movimentação da barra de paralaxe e o ângulo de inclinação θ do plano com base nas posições 1 e 5 de referência.

TABELA 2 - QUANTIFICAÇÃO DOS DESLOCAMENTO DO PLANO DE CONTROLE EXPERIMENTAL

Posição de Varredura	Nuvem de Pontos	Deslocamento da Barra de Paralaxe (cm)	Inclinação θ do plano
Frontal	Posição 1	0,000	0°
	Posição 2	0,516	0°53'
	Posição 3	0,918	1°35'
	Posição 4	2,015	3°28'
Oblíquo	Posição 5	0,000	0°
	Posição 6	0,672	1°09'

FONTE: O autor (2020).

As varreduras com LST foram realizadas simultaneamente à estação total. Para evitar que a variação dos fatores ambientais interferisse na avaliação metodológica, os testes foram realizados em laboratório, o que possibilitou a verificação da temperatura, as quais ficaram entre 18,8 °C e 19,3 °C.

As amostras obtidas sobre o plano experimental foram segmentadas manualmente e submetidas ao ajustamento pelo modelo combinado, como mencionado anteriormente. Na TABELA 3 são apresentados o total de pontos obtidos por plano a partir do LST, bem como os parâmetros e as respectivas precisões. Por conta da quantidade de observações, o tempo de processamento foi distinto, sendo

cerca de 24 minutos para as posições de varredura frontal e de 1h e 10min para as varreduras oblíquas.

TABELA 3 - PARÂMETROS AJUSTADOS COM AS NUVENS DE PONTOS DO LST

Posição de Varredura	Nuvem de Pontos	Laser Scanner Terrestre						
		Nº de Pontos	a	$\pm \sigma_a$	b	$\pm \sigma_b$	c	$\pm \sigma_c$
Frontal	Posição 1	7557	-0,04130	0,00017	-0,03370	0,00017	-0,00020	0,00016
	Posição 2	7549	-0,04130	0,00017	-0,03370	0,00017	-0,00100	0,00016
	Posição 3	7615	-0,04130	0,00017	-0,03370	0,00017	-0,00160	0,00016
	Posição 4	7612	-0,04120	0,00017	-0,03370	0,00017	-0,00340	0,00016
Oblíquo	Posição 5	10841	-0,04810	0,00020	-0,03690	0,00025	-0,00002	0,00016
	Posição 6	10511	-0,04810	0,00019	-0,03690	0,00024	-0,00150	0,00016

FONTE: O autor (2020).

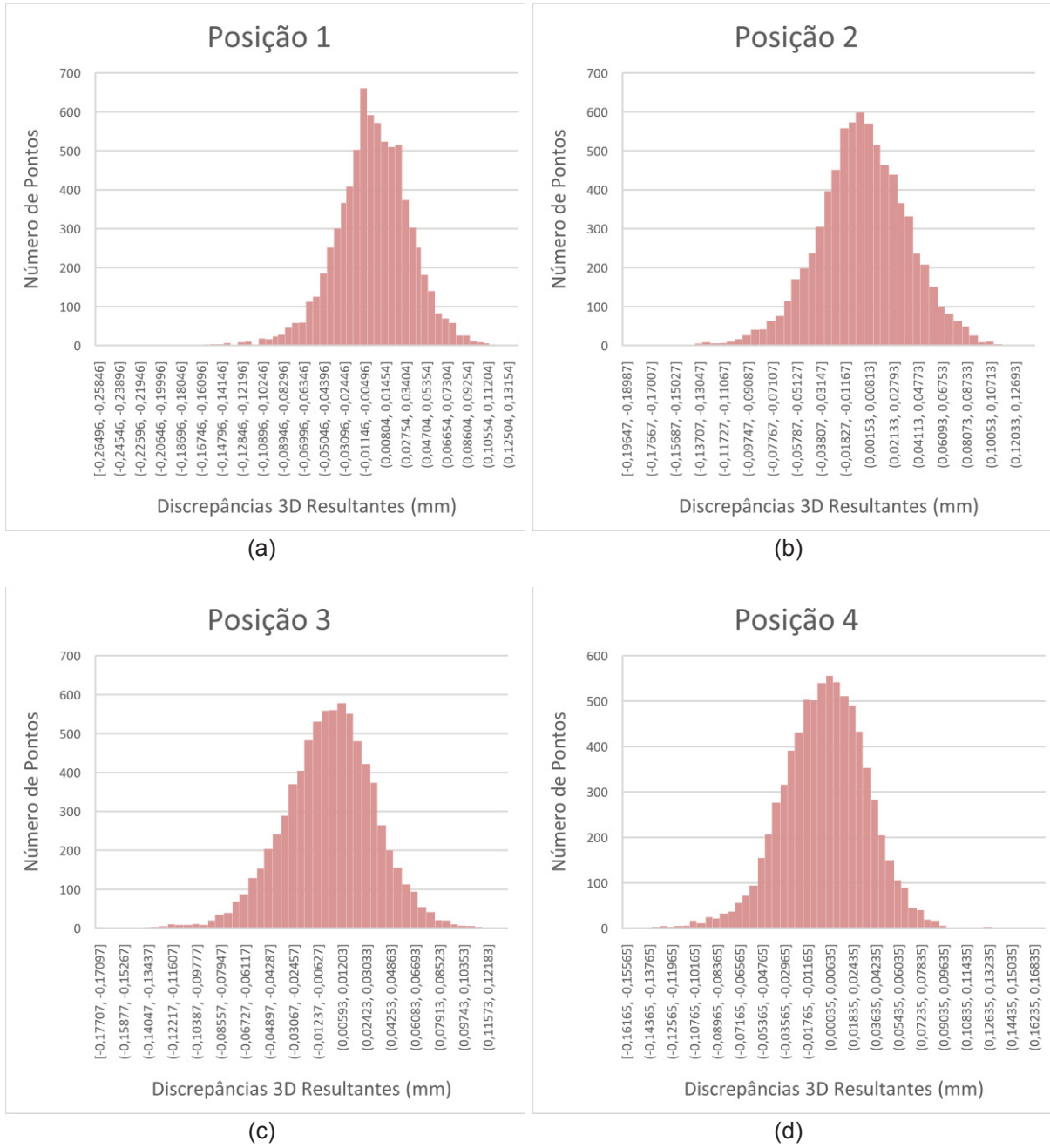
Como observado para cada posição levantada, os valores adimensionais encontrados para os parâmetros definidores do plano variaram, o que pode indicar, de forma preliminar, a ocorrência da não igualdade entre as posições do plano provocadas pelo deslocamento do protótipo.

Ainda em relação as precisões alcançadas, no caso dos parâmetros a e b, as posições oblíquas apresentaram maiores valores em relação as obtidas nos levantamentos frontais, sinalizando que a posição relativa entre o plano e o equipamento pode interferir na qualidade do ajuste do plano.

Como forma de visualizar a relação entre os dados levantados e os planos ajustados a partir dos dois métodos de levantamentos realizados, foram elaborados histogramas de representação da distribuição das discrepâncias 3D resultantes. Estes valores foram calculados a partir das diferenças entre os pontos levantados, a partir das varreduras lasers, e os pontos homólogos contidos no plano (obtidos após o ajustamento).

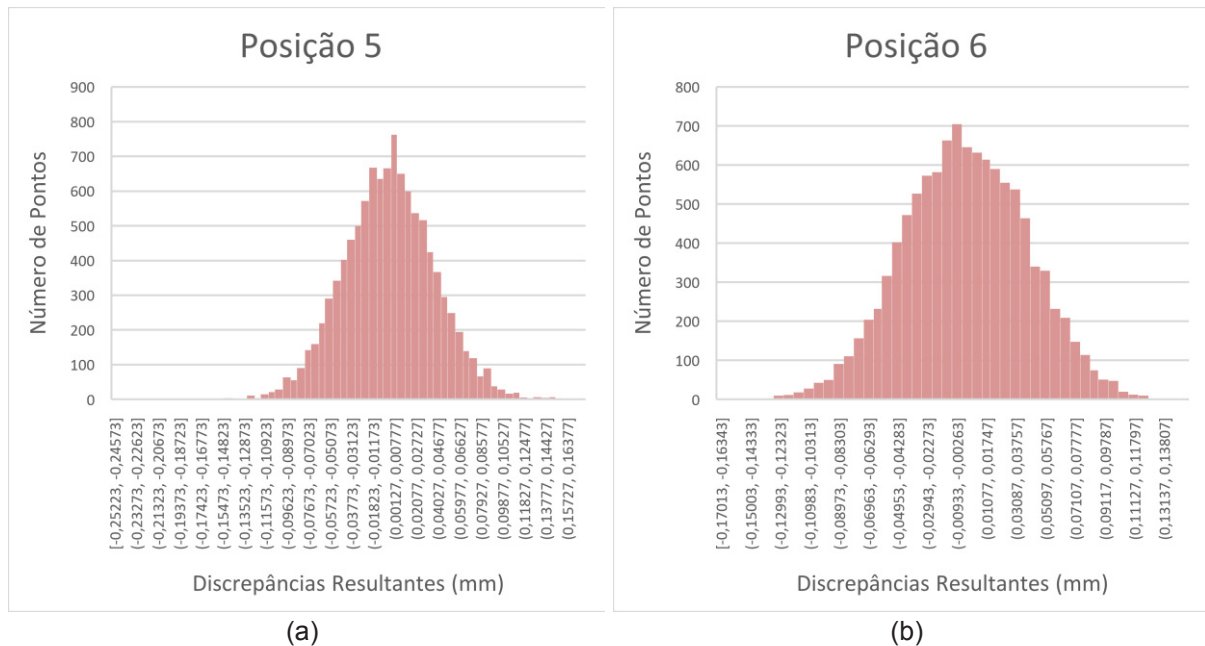
Portanto, estas diferenças corresponderam as distâncias dos vetores resultantes das coordenadas x , y e z de cada ponto levantado e os vetores resultantes dos pontos homólogos obtidos após o ajustamento. A FIGURA 24 apresenta tais diferenças provenientes dos levantamentos com LST para as posições frontais. Na FIGURA 25, por sua vez, são apresentados os resíduos provenientes das varreduras na posição oblíqua. Os mesmos gráficos podem ser visualizados de forma ampliada no APÊNDICE C.

FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS 3D DOS PONTOS AJUSTADOS DO LEVANTAMENTO FRONTAL COM O LST



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 25 - DISTRIBUIÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS 3D DOS PONTOS AJUSTADOS LEVANTAMENTO OBLÍQUO COM O LST



FONTE: O autor (2020).

Observando os gráficos acima, pode-se deduzir que o comportamento das discrepâncias 3D acompanhou uma distribuição normal, definida também como função densidade de probabilidade de uma variável aleatória normal (GHILANI, 2018). Isto pode indicar a existência de apenas erros aleatórios nas amostras.

Na TABELA 4 são apresentados o total de pontos, os parâmetros dos planos e as respectivas precisões a partir das observações adquiridas pela varredura com a estação total TS15. Para estas amostras, por conta do número de amostras inferior ao teste anterior, o tempo para determinação dos parâmetros também foi inferior, sendo de 1 a 2 segundos para todas as posições levantadas.

TABELA 4 - PARÂMETROS AJUSTADOS COM AS NUVENS DE PONTOS DA ESTAÇÃO TOTAL

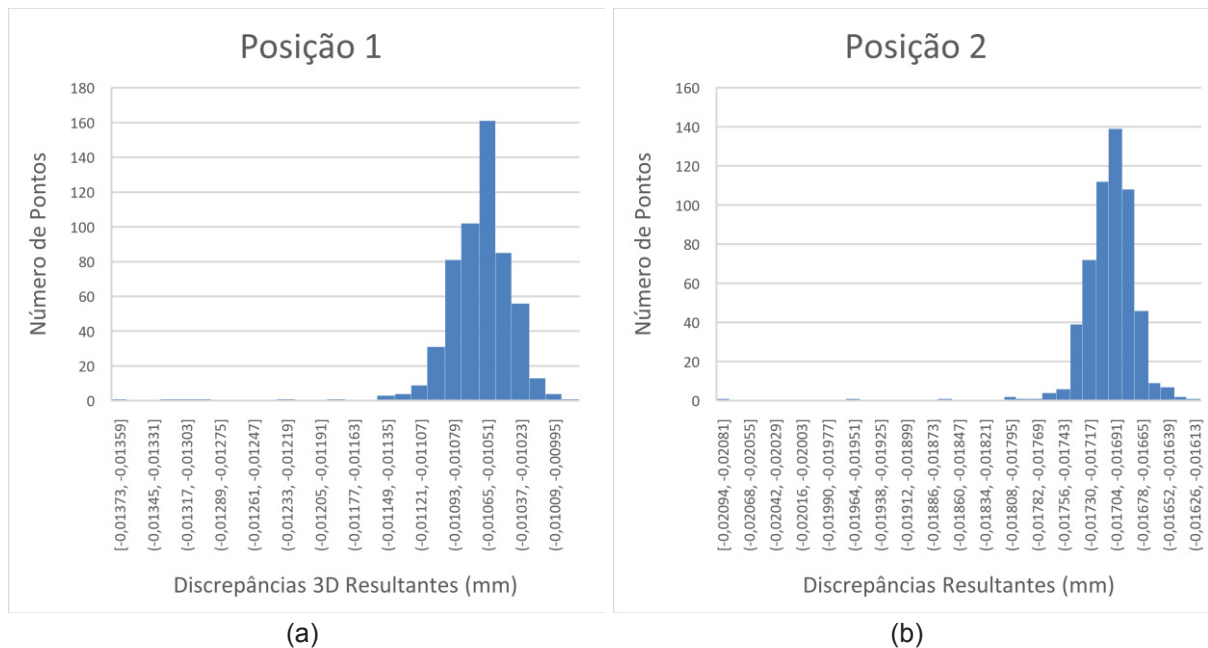
Posição de Varredura	Nuvem de Pontos	Estação Total						
		Nº de Pontos	a	$\pm \sigma_a$	b	$\pm \sigma_b$	c	$\pm \sigma_c$
Frontal	Posição 1	556	0,00030	0,00077	-0,49890	0,00039	-0,00240	0,00050
	Posição 2	552	0,00040	0,00078	-0,49860	0,00039	-0,00940	0,00051
	Posição 3	552	0,00100	0,00078	-0,49850	0,00039	-0,01570	0,00051
	Posição 4	552	0,00100	0,00078	-0,49770	0,00039	-0,03270	0,00040
Oblíquo	Posição 5	617	0,00200	0,00070	-0,49980	0,00035	-0,00040	0,00045
	Posição 6	670	0,00210	0,00064	-0,49920	0,00032	-0,01250	0,00042

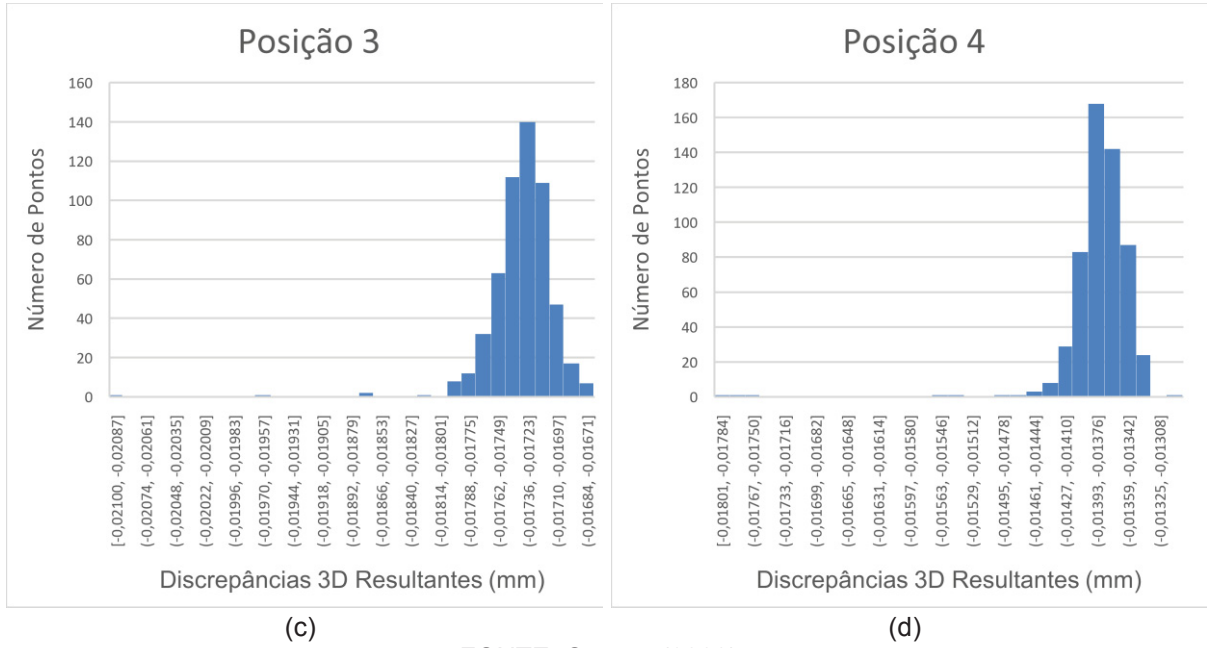
FONTE: O autor (2020).

Assim como indicado na TABELA 3, os parâmetros obtidos pela varredura com a estação total variaram conforme a inclinação do plano, o que reforça a hipótese da eficiência de avaliação de deslocamentos a partir dos parâmetros. Entretanto, as precisões destes dados foram maiores do que os resultados obtidos com as varreduras pelo LST, sinalizando que, apesar da precisão nominal ligeiramente melhor da estação total neste caso, a amostragem maior do LST resultou em menores desvios-padrão dos parâmetros ajustados. Em contraponto ao caso anterior, os desvios-padrão para os levantamentos oblíquos com a estação foram menores do que para as varreduras frontais.

Os histogramas de representação da distribuição das discrepâncias 3D foram elaborados para os dados adquiridos a partir da estação total. Na FIGURA 26 são apresentados os resultados para os levantamentos frontais e na FIGURA 27 para os levantamentos oblíquos. Os gráficos também podem ser visualizados de forma ampliada no APÊNDICE D.

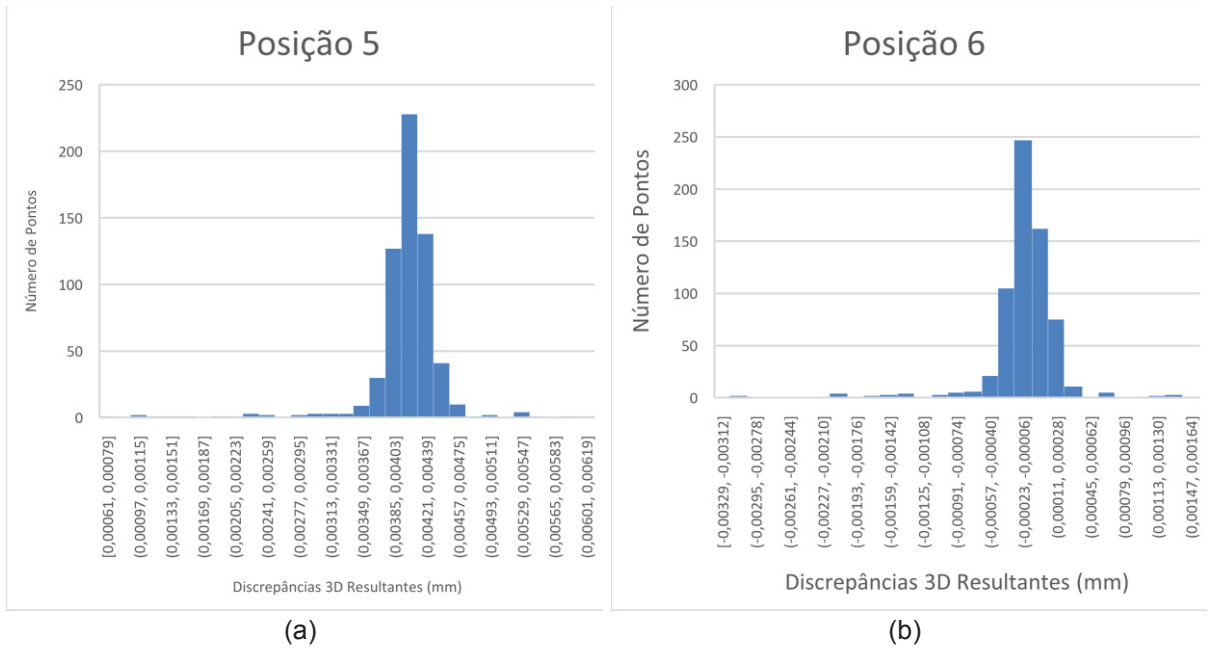
FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS 3D DOS PONTOS AJUSTADOS DO LEVANTAMENTO FRONTAL COM A ESTAÇÃO TOTAL





FONTE: O autor (2020).

FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS 3D DOS PONTOS AJUSTADOS LEVANTAMENTO OBLÍQUO COM A ESTAÇÃO TOTAL



FONTE: O autor (2020).

Os sinais constantes dos gráficos acima indicaram a possibilidade de existência de erros grosseiros e/ou sistemáticos nas observações, apesar de apresentarem uma distribuição próxima à normal. Para avaliar as discrepâncias encontradas, a TABELA 5 apresenta os valores das estatísticas descritivas dos indicadores numéricos das médias e dos desvios-padrão para cada posição do plano, discretizados para os dados das varreduras com LST e com a estação total.

TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS DISCREPÂNCIAS 3D DOS DADOS

Nuvem de Pontos	Dados LST		Dados Estação Total	
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)
Posição 1	-0,000002	0,036489	-0,01064	0,000333
Posição 2	0,000033	0,036928	-0,01703	0,000306
Posição 3	-0,000002	0,034535	0,01734	0,000299
Posição 4	-0,000002	0,033469	0,001381	0,000387
Posição 5	-0,000003	0,040983	0,004089	0,000449
Posição 6	-0,000003	0,042058	-0,00014	0,000432

FONTES: O autor (2019).

Os valores podem ser considerados satisfatórios por serem inferiores as precisões nominais dos instrumentos. As médias, por serem indicadores de tendência central, apontam que os dados estão distribuídos mais próximos ao valor zero para os dados da varredura com LST quando comparados com os derivados do levantamento com a estação total.

Entretanto, ressalta-se que as discrepâncias 3D, em geral, se situam na ordem de centésimos ou milésimos de mm, devendo estarem mais relacionadas ao processo de cálculo numérico dos ajustamentos do que a qualidade dos dados com LST ou estação total.

Dando continuidade a avaliação dos ajustamentos, nas TABELA 6 e TABELA 7 são apresentados os valores dos fatores de variância *a posteriori*, com base nos graus de liberdade (gl) de cada posição e com nível de significância de 5% para os dados derivados da varredura com LST e com a estação total, respectivamente.

TABELA 6 - AVALIAÇÃO DO FATOR DE VARIÂNCIA A POSTERIORI DE CADA AJUSTAMENTO PARA AS VARREDURAS COM O LST

Nuvem de Pontos	Dados LST				
	σ a priori	σ a posteriori	$\chi^2_{calculado}$	gl	$\chi^2_{teórico}$
Posição 1	1,0	0,0007	5,1228	7.554	7.757,31
Posição 2		0,0007	5,2948	7.546	7.749,20
Posição 3		0,0006	4,6901	7.612	7.816,08
Posição 4		0,0006	4,3623	7.609	7.813,04
Posição 5		0,0009	9,0802	10.838	11.081,30
Posição 6		0,0009	9,8631	10.508	10.747,58

FONTES: O autor (2020).

TABELA 7 - AVALIAÇÃO DO FATOR DE VARIÂNCIA *A POSTERIORI* DE CADA AJUSTAMENTO PARA AS VARREDURAS COM A ESTAÇÃO TOTAL

Nuvem de Pontos	Dados Estação Total				
	σ a priori	σ a posteriori	$\chi^2_{calculado}$	gl	$\chi^2_{teórico}$
Posição 1	1,0	0,0001	0,0473	553	608,82
Posição 2		0,0002	0,1202	549	604,62
Posição 3		0,0002	0,1246	549	604,62
Posição 4		0,0001	0,0790	549	604,62
Posição 5		0,0000	0,0078	614	672,75
Posição 6		0,0000	0,0001	667	728,19

FONTE: O autor (2020).

A partir dos valores críticos expostos, a hipótese nula de igualdade entre σ_0^2 e $\hat{\sigma}_0^2$ foi aceita, ao nível de significância de 5% para todos os casos, uma vez que os valores para $\chi^2_{calculado}$ foram menores que os valores críticos determinados.

Ressalta-se que o fator de variância *a posteriori* é significativamente menor do que a unidade em todos os casos, ou seja, os resíduos (em geral da ordem de centésimos ou milésimos de mm) estão muito menores do que os valores esperados (na ordem de décimos de mm para cada coordenada). Provavelmente, este padrão ocorreu devido a distância muito curta deste experimento laboratorial, inferior a 5 m, devendo-se enfatizar que para distâncias maiores, bem como, em ambientes com maior influência de fatores externos como temperatura e pressão, o fator de variância *a posteriori* deve apresentar valores mais significativos.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DAS DIFERENÇAS ENTRE AS POSIÇÕES DO PLANO

Após a etapa do ajustamento das varreduras sobre o plano de controle experimental e da determinação dos parâmetros para cada posição, seguiu-se a avaliação da detecção dos deslocamentos impostos no protótipo. Aplicou-se o teste Qui-Quadrado generalizado em relação as diferenças entre os parâmetros de cada posição. A TABELA 8 e a TABELA 9 apresentam as estatísticas de teste calculadas e os valores críticos correspondentes aos níveis de significância de 5% e 1%, a partir dos dados derivados das varreduras laser com o LST e com a estação total, respectivamente.

TABELA 8 - VALORES DAS ESTADÍSTICAS PARA O TESTE QUI-QUADRADO DOS DADOS DAS VARREDURAS LASER COM O LST

Posição Frontal			
	$\chi^2_{calculado}$	$\chi^2_{teórico}$ ($\alpha=5\%$)	$\chi^2_{teórico}$ ($\alpha=1\%$)
Teste 1	202,64	7,81	11,34
Teste 2	624,62		
Teste 3	643,57		
Posição Oblíqua			
	$\chi^2_{calculado}$	$\chi^2_{teórico}$ ($\alpha=5\%$)	$\chi^2_{teórico}$ ($\alpha=1\%$)
Teste 4	41,76	7,81	11,34

FONTE: O autor (2020).

TABELA 9 - VALORES DAS ESTADÍSTICAS PARA O TESTE QUI-QUADRADO DOS DADOS DAS VARREDURAS LASER COM A ESTAÇÃO TOTAL

Posição Frontal			
	$\chi^2_{calculado}$	$\chi^2_{teórico}$ ($\alpha=5\%$)	$\chi^2_{teórico}$ ($\alpha=1\%$)
Teste 1	95,418	7,81	11,34
Teste 2	1 986 307,169		
Teste 3	338 459,343		
Posição Oblíqua			
	$\chi^2_{calculado}$	$\chi^2_{teórico}$ ($\alpha=5\%$)	$\chi^2_{teórico}$ ($\alpha=1\%$)
Teste 4	25 271,25	7,81	11,34

FONTE: O autor (2020).

Conforme os valores das Tabelas 8 e 9, para todos os testes com os dados adquiridos, o valor crítico $\chi^2_{teórico}$ foi inferior as estatísticas $\chi^2_{calculado}$, tanto para o nível de significância de 5% quanto para o nível de significância de 1%. Sendo assim, a hipótese nula de igualdade entre os parâmetros foi rejeitada, aceitando-se a hipótese alternativa de que há diferenças entre os parâmetros de cada posição do plano avaliado. Logo, os deslocamentos que provocaram as inclinações do plano resultaram em parâmetros estatisticamente distintos quando comparados com as posições de referência 1 e 5.

Analisando ainda os resultados, nota-se que, embora os parâmetros obtidos com LST tenham apresentado melhor precisão (menor desvio-padrão) do que os parâmetros obtidos com estação total, os planos estimados com a estação total se mostraram mais discrepantes aos planos de referência do que os planos estimados com o LST, uma vez que as estatísticas de teste com estação total são significativamente maiores em quase todos os casos, com exceção do Teste 1.

Com base nos parâmetros ajustados, calcularam-se as inclinações do plano em cada cenário de teste analisado, de acordo com a TABELA 10.

TABELA 10 - INCLINAÇÕES DAS POSIÇÕES DO PLANOS DE CONTROLE EXPERIMENTAL

	Inclinação pelo LST	Inclinação pela estação total	Inclinação pelo protótipo
Posição Frontal			
Teste 1	0°51'	0°48'	0°53'
Teste 2	1°30'	1°31'	1°35'
Teste 3	3°26'	3°29'	3°28'
Posição Oblíqua			
Teste 4	1°23'	1°23'	1°09'

FONTE: O autor (2020).

Observando os valores da Tabela 10, as inclinações dos planos obtidos com dados de LST e com a estação total apresentaram valores próximos, com diferença máxima de 3'. Contudo, ambas as amostras apresentaram diferenças maiores quando avaliadas em relação as inclinações determinadas com o protótipo, principalmente para os levantamentos oblíquos, nos quais a diferença encontrada foi de 14'.

A compatibilidade dos resultados derivados das nuvens de pontos indica, previamente, a eficiência de ambos os métodos aplicados na determinação do ângulo, por evidenciar a ocorrência dos deslocamentos do plano. Entretanto, as diferenças em relação aos valores do protótipo demonstram que, apesar do experimento ter sido realizado de forma controlada, a determinação das inclinações a partir das dimensões do protótipo e do deslocamento da barra de paralaxe devem ser avaliados e verificados com maior rigor.

Seguindo a avaliação das inclinações calculadas, aplicou-se a lei de propagação das variâncias, obtendo os valores dos desvios-padrão para cada teste realizado e para cada método de levantamento aplicado, conforme a TABELA 11.

TABELA 11 - PRECISÃO DAS INCLINAÇÕES DETERMINADAS PELAS VARREDURA LASER

	Precisão da inclinação pelo LST	Precisão da inclinação pela estação total
Posição Frontal		
Teste 1	0°15'	0°05'
Teste 2	0°15'	0°05'
Teste 3	0°15'	0°05'
Posição Oblíqua		
Teste 4	0°41'	0°04'

FONTE: O autor (2020).

Analisando os resultados da Tabela 11, pode ser destacado que embora as precisões dos parâmetros com LST sejam melhores, na propagação para o ângulo de inclinação a estação total forneceu melhor precisão, sendo 3,0 vezes maior nos casos frontais e 10,25 vezes maior no caso oblíquo. Estes resultados indicam que as varreduras tomadas de posição oblíquas com LST podem degradar a qualidade dos dados.

Para averiguar se as inclinações encontradas são estatisticamente significativas, na TABELA 12 são apresentados os valores do Qui-Quadrado.

TABELA 12 – VALORES DAS ESTATÍSTICAS $\chi^2_{calculado}$ PARA OS TESTES DE SIGNIFICÂNCIA DAS INCLINAÇÕES

	Qui-Quadrado calculado para o LST	Qui-Quadrado calculado para a estação total	$\chi^2_{teórico}$ ($\alpha=5\%$)	$\chi^2_{teórico}$ ($\alpha=1\%$)
Posição Frontal				
Teste 1	12,22	95,26	3,84	6,63
Teste 2	37,65	343,35		
Teste 3	195,40	1785,62		
Posição Oblíqua				
Teste 4	4,14	380,19	3,84	6,63

FONTE: O autor (2020).

A partir do valor crítico para um grau de liberdade e adotando 5% de nível de significância, rejeita-se a hipótese nula e aceita-se a hipótese alternativa em todos os casos, podendo-se inferir que houve inclinação do plano em todas as amostras analisadas.

Novamente, a estação total apresentou maiores valores de Qui-Quadrado em todos casos considerados. Apesar da escolha do nível de significância não fazer parte do escopo deste trabalho, ressalta-se que este poderia afetar a conclusão do teste, pois, considerando-se o nível de significância de 1%, o valor crítico para um grau de liberdade aumenta. Assim, o Teste 4 com LST não passaria na análise, aceitando-se a hipótese nula de que o ângulo de inclinação não é estatisticamente significativo. De forma geral, pode-se concluir que a estação total apresentou maior eficiência na detecção das inclinações em relação ao LST, especialmente com a aquisição de dados no modo oblíquo.

Por fim, comparações diretas entre os valores das inclinações foram realizadas, sendo os valores das estatísticas de testes apresentadas na TABELA 13.

TABELA 13 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS $\chi^2_{calculado}$ DE COMPARAÇÃO DAS INCLINAÇÕES

	LST x protótipo	Estação total x protótipo	Estação total x LST	$\chi^2_{teórico}$ ($\frac{5\%}{2}$)	$\chi^2_{teórico}$ ($1-\frac{5\%}{2}$)	$\chi^2_{teórico}$ ($\frac{1\%}{2}$)	$\chi^2_{teórico}$ ($1-\frac{1\%}{2}$)
Posição Frontal							
Teste 1	0,02	0,45	0,05	0,001	3,17	0,00004	7,88
Teste 2	0,11	0,10	0,01				
Teste 3	0,02	0,28	0,03				
Posição Oblíqua							
Teste 4	0,12	0,02	0,0002	0,001	3,17	0,00004	7,88

FONTES: O autor (2020).

Os valores críticos para o teste bilateral, com um grau de liberdade e 5% de nível de significância indicam a rejeição da hipótese nula (não há diferença entre inclinações) para o Teste 4 para a estação total x LST. Com a alteração do nível de significâncias para 1%, a região de aceitação da hipótese nula é ampliada e, neste caso, não há diferença significativa entre as inclinações. Ressalta-se que foram negligenciadas as variâncias do ângulo de inclinação obtido pelo protótipo, aumentando a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula em todos os casos testados.

Assim, observando de forma geral os resultados em relação a identificação das diferenças das posições do plano, tanto na avaliação direta a partir dos parâmetros, quanto considerando a inclinação do plano, as grandezas dos testes estatísticos indicaram como pior cenário os casos em que se utilizaram as nuvens de pontos das varreduras com LST.

Conforme apontado anteriormente, os fatores ambientais e as características da superfície levantada podem influenciar na precisão dos pontos obtidos com LST. Todavia, considerando que os testes avaliados neste trabalho foram realizados em laboratório, pode-se apontar a impossibilidade da elaboração e construção de instrumentos geodésicos com ausência de imperfeições como uma das principais fontes de erros nas varreduras adquiridas com LST.

Os erros sistemáticos provenientes dos elementos e características presentes nestes instrumentos, como o espelho rotativo e a sincronização quanto a rotação e observações angulares dos pontos, por exemplo, são uma das principais causas para a degradação das precisões dos dados levantados. Estas condições podem ter influenciado na pior confiabilidade de detecção nos testes a partir dos dados levantados com LST.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido visou a investigação de um método passível de ser aplicado ao monitoramento geodésico de estruturas, o qual visa a utilização de planos de controle, buscando avaliar a viabilidade de utilização de dados derivados de varredura laser terrestre a partir da comparação de resultados obtidos com levantamentos por meio da varredura de uma estação total robotizada.

O experimento realizado em laboratório foi precedido pela elaboração de um protótipo, o qual simulou o deslocamento de uma superfície plana. Além disso, o ambiente controlado permitiu a minimização das variações de fatores ambientais, como a temperatura, e a manutenção das posições dos equipamentos para as campanhas de levantamento. A adaptação de uma barra de paralaxe viabilizou a movimentação do plano de controle experimental na ordem milimétrica e centimétrica e, conseqüentemente, as inclinações do plano com ângulos pequenos, grandezas próximas ao esperado em estruturas reais.

A utilização do elemento plano foi considerada satisfatória, uma vez que a precisão dos parâmetros definidores dos planos foi maior do que a esperada para os dados advindos das varreduras laser. Esse fato confirma a tendência de maior confiabilidade na utilização de parâmetros derivados de nuvens de pontos nas atividades que visam o monitoramento de estruturas.

Entretanto, constatou-se que a posição do plano em relação ao local de estação dos equipamentos pode interferir na qualidade dos dados, visto que as precisões encontradas para os parâmetros do plano foram maiores nos levantamentos oblíquos com LST. Outro destaque observado foi de que a alta redundância dos dados alcançada pelas varreduras com os LST fez com que a precisão dos parâmetros fosse melhor do que as obtidas com a estação total, apesar da mesma possuir a precisão nominal melhor. Isto indica que o tamanho da amostra de pontos por parte do LST interfere significativamente na qualidade dos subprodutos extraídos das nuvens de pontos.

Empregando-se o teste Qui-Quadrado generalizado das nuvens de pontos levantadas, foi possível detectar se as diferenças entre as posições do plano eram significativas, o que demonstrou a viabilidade na identificação de mudanças de uma possível estrutura monitorada através de planos. Ao serem calculadas as inclinações dos planos por meio dos parâmetros, a avaliação estatística, baseada na propagação

das variâncias e na magnitude dos deslocamentos, foi possível verificar que para ambos os casos as inclinações obtidas pelas varreduras foram estatisticamente significativas. Contudo, a estatística calculada próxima do valor crítico do teste para o levantamento oblíquo com o LST evidencia que a posição do equipamento pode interferir significativamente nas atividades de monitoramento. Ressalta-se que esta abordagem e os resultados alcançados em laboratório são inéditos dentro do contexto de monitoramento geodésico de estruturas.

Os resultados estatísticos entre os valores das inclinações demonstraram que é viável, em condições laboratoriais, a utilização das nuvens de pontos derivadas das varreduras com LST na determinação das inclinações de um plano de controle. Entretanto, a aplicação de tal metodologia em campo implicaria na interferência de fatores sobre a determinação de tais resultados, como a influência de elementos ambientais (exemplo: temperatura) e o próprio planejamento da rede de estação varredura em campo.

Avaliando-se a utilização efetiva desta abordagem na atividade de monitoramento de estrutura em campo, salienta-se a possibilidade de etapas prévias no projeto que possam impactar nos resultados finais encontrados. A necessidade de realização de mais de uma estação de varredura e a efetuação de campanhas em diferentes épocas, para determinar a inclinação do plano, implicariam na prática do registro das nuvens de pontos adquiridas para união e orientação dos dados, o qual acrescentaria erros sobre os dados e, conseqüentemente, impactariam na determinação dos planos e dos ângulos de inclinação dos planos.

De forma geral, pode-se afirmar que, embora os parâmetros ajustados com LST apresentem melhor precisão (em função do maior volume de dados); os testes estatísticos para detectar diferenças entre os planos apresentaram melhores resultados com os dados da estação total. Além disso, o pior cenário para monitoramento geodésico foi obtido com o LST na posição oblíqua, o qual apresentou menores estatísticas de teste, ou seja, menor poder de detecção para tal abordagem, demonstrando que o LST é mais sensível a posição do equipamento do que a estação total. Ainda assim, os deslocamentos dos planos, em geral, foram detectados tanto com LST quanto com estação total, considerando níveis de significância de 5% e 1%.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para realização de trabalhos futuros, recomenda-se:

- A aplicação de teste para detecção de outliers na nuvem de pontos sobre o plano;
- Considerar as distâncias distintas entre cada ponto e o equipamento de varredura na elaboração da matriz peso do ajustamento das observações;
- Considerar as correlações entre as coordenadas x, y e z dos pontos na elaboração da matriz peso do ajustamento das observações;
- A utilização de algoritmos de segmentação automática de planos da extração automática do plano de controle experimental;
- Testar a influência da distância sobre a identificação de inclinações dos planos;
- Testar a metodologia em ambiente não laboratorial, com maiores distâncias entre o instrumento e a estrutura, ponderando ainda os efeitos atmosféricos;
- Ponderar a escolha do nível de significância para os testes estatísticos;
- Avaliar o valor do ângulo de inclinação mínimo passível de ser detectado para determinado equipamento em determinada localização em relação a estrutura, considerando a teoria de confiabilidade do ajustamento;
- Aplicar o procedimento para outras superfícies de ajuste, como, por exemplo, parábolas.

REFERÊNCIAS

- ANDRIOLO, Francisco Rodrigues. Aspectos sobre o uso do CCR em barragens brasileiras. 7th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams. China, 2015.
- AYDIN, Cüneyt. **Geodetic Deformation Analysis: Short Lecture Notes for Graduate Students**. 2014. Disponível em: <<https://avesis.yildiz.edu.tr/resume/downloadfile/caydin?key=fb2f19c5-4ff6-4b07-9fd0-bb68ae5f4f07>>. Acesso em: 25 de maio de 2019.
- BARBARELLA, Maurizio et al. Use of Terrestrial Laser Scanner for Rigid Airport Pavement Management. **Sensors**, v. 18, n. 2, p.44-65, 26 dez. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s18010044>.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. (Org.). **Capacidade de Geração do Brasil**. 2019. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 20 out. 2019.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. (Org.). **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte de 2050**. Rio de Janeiro, 2018. (Recursos Energéticos).
- CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. **Apresentação das Barragens**. 2013. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20das%20Barragens>>. Acesso em: 08 maio 2019.
- CLOUDCOMPARE: User manual. User manual. 2015. Disponível em: <<http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2019.
- ERDÉLYI, Ján et al. Automation of point cloud processing to increase the deformation monitoring accuracy. **Applied Geomatics**, v. 9, n. 2, p. 105-113, 2017.
- 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
- 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.

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.

GONZÁLEZ-AGUILERA, Diego; GÓMEZ-LAHOZ, Javier; SÁNCHEZ, José. A New Approach for Structural Monitoring of Large Dams with a Three-Dimensional Laser Scanner. **Sensors**, v. 8, n. 9, p.5866-5883, 24 set. 2008. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s8095866>.

GORDON, Stuart; LICHTI, Derek; STEWART, Mike. Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements. In: PROCEEDINGS OF 10TH INTERNATIONAL FIG SYMPOSIUM ON DEFORMATION MEASUREMENTS, 10., California, 2001. p. 19-22.

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>.

JAAFAR, Hasan A.; MENG, Xiaolin; SOWTER, Andrew. Health monitoring of historic ruins and heritage buildings using terrestrial laser scanning and Generalised Procrustes Analysis. In: 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HERITAGE AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT. 2016.

JAAFAR, Hasan Abdulhusein; 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>.

JERKE, Andreas. **Análise do Monitoramento Geodésico da Barragem da Usina Hidrelétrica Mauá com Equipamentos de Diferentes Precisões e Diferentes Softwares de Processamento**. 2019. 110 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

KLEIN, Ivandro. **Controle de Qualidade no Ajustamento de Observações Geodésicas**. 2011. 321 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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

LEICA. Leica Geosystems. **TS15 User Manual**. Suíça, 2015.

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.

LIMA, Elon Lages. **Geometria analítica e álgebra linear**. 1.ed. Rio de Janeiro: IMPA, 2014. 324 p.

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.

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, Pequim, p. 527–532.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. **Noções de Probabilidade e Estatística**. 7. ed. São Paulo: Edusp, 2010.

MARSELLA, Maria; SCAIONI, Marco. Sensors for Deformation Monitoring of Large Civil Infrastructures. **Sensors**, v. 18, n. 11, p.1-5, 14 nov. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s18113941>.

Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília, 2002. 148p.

MONSERRAT, O.; CROSETTO, M. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 63, n. 1, p.142-154, jan. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.07.008>.

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>.

NADAL, Marco Aurélio Debus et al. Emprego de estações totais robotizadas na automação, controle e aquisição de dados, voltado ao monitoramento de barragens. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 5, n. 1, p.16-28, 20 fev. 2017. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). <http://dx.doi.org/10.3895/rbgeo.v5n1.5509>.

NADOLINETS, Leonid; LEVIN, Eugene; AKHMEDOV, Daulet. **Surveying instruments and technology**. Description: Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017.

O Globo. **Infográfico: os maiores acidentes com barragens no mundo**. 2019. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/brasil/infografico-os-maiores-acidentes-com-barragens-no-mundo-23404340>>. Acesso em: 26 jan. 2019.

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

OLIVEIRA, Nathalia Capellini Carvalho. A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil. **Varia História**, v. 34, n. 65, p. 315-346, 2018.

PAVAN, Nadisson Luis. **Método Analítico de Alinhamento Global de Dados de Varredura Laser Terrestre Usando Superfícies Planas**. 2018. 88 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

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>.

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

SANTIBAÑEZ, Sebastian Alfredo Fuentes. **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, 87f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.

SCAIONI, Marco et al. Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring. **Sensors**, v. 18, n. 11, p.1-25, 29 out. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s18113682>.

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

SIGUEL, Alyne Raminelli. **Monitoramento da barragem da usina hidrelétrica Mauá utilizando irradiação tridimensional**. 2013. 171f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

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

STEINBRUCH, Alfredo; WINTERLE, Paulo. **Geometria Analítica**. 2. ed. São Paulo: Mcgraw-hill Artmed, 1987.

SUCI, Felipe Mendes; FAGGION, Pedro Luis. Análise da estabilidade da rede geodésica de monitoramento da UHE Salto Caxias a partir de dados GPS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 18, n. 4, p.564-582, dez. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702012000400004>.

THOMSON, Charles. **What are the most common 3D point cloud file formats and how to solve interoperability issues**. Disponível em: <<https://info.vercator.com/blog/what-are-the-most-common-3d-point-cloud-file-formats-and-how-to-solve-interoperability-issues>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

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

VENTURI, Jacir J. **Álgebra Vetorial e Geometria Analítica**. 10. ed. Curitiba: Gráfica Infante, 2015. 242 p. Disponível em: <<http://www.geometriaanalitica.com.br>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

VOSSSELMAN, 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>.

WIESER, Andreas; CAPRA, Alessandro. Special issue: deformation monitoring. **Applied Geomatics**, v. 9, n. 2, p.79-80, jun. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12518-017-0192-0>.

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.

YONG-QI, C. **Analysis of deformation surveys: a generalized method**. 262 f. Thesis (PhD) - Department of Surveying Engineering Technical, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1983.

APÊNDICE A – SCRIPT DO AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES DO LST EM UM PLANO PELO MODELO COMBINADO

```

%Ajustamento do Plano - nuvem 1

%Ler um arquivo no formato .TXT:

arquivo = load('nuvem_1.txt');
X=arquivo(:,1);
Y=arquivo(:,2);
Z=arquivo(:,3);

% Montagem Matriz das observações - Lb

XYZ = [X Y Z];
Tam = size(X);
Lb = zeros(Tam(1),1);
for k=1:Tam
    Lb(k*3-2,1) = XYZ(k,1);
    Lb(k*3-1,1) = XYZ(k,2);
    Lb(k*3,1) = XYZ(k,3);
end
Lb;

% Montagem a matriz das derivas dos parâmetros - A

for n=1:Tam
    Ann(n,1:3)=([Lb(3*n-2) Lb(3*n-1) Lb(3*n)]);
end
A=Ann;

% Montagem da Matriz Peso - Peso

Tam1=Tam(1)*3;
Peso=zeros(Tam(1)*3);
Peso = eye(Tam1)*(1/0.002415)^2;

% Solução inicial dos parâmetros a, b e c - Xo

Xo = [1;1;1];

% Matriz W

Wn=zeros(Tam(1),1);
for n=1:Tam
    Wn(n,1)=Xo(1)*Lb(3*n-2)+Xo(2)*Lb(3*n-1)+Xo(3)*Lb(3*n)+1;
end
W=Wn;

% Montagem da matriz B

Bn=zeros(Tam(1),Tam(1)*3);
for n=1:Tam(1)

```

```
Bn(n,3*n-2:3*n)=[Xo(1),Xo(2),Xo(3)];
end
B = Bn;

% Ajustamento e determinação dos parâmetros - Xa
M = B*inv(Peso)*B';
dX = -inv(A'*inv(M)*A)*A'*inv(M)*W;
Xa = Xo + dX;

% vetor dos lagrangianos
k = -inv(M)*(A*dX+W);

% vetor dos resíduos
v = inv(Peso)*B'*k;

% Matriz Variância-Covariância dos Parâmetros - MVC_Xa
MVC_Xa = inv(A'*inv(M)*A);
```

**APÊNDICE B – DERIVADAS DAS EQUAÇÕES DE INCLINAÇÃO DO PLANO
COM BASE NOS PARÂMETROS**

$$\frac{\partial \theta}{\partial a_1} = - \frac{\frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} - \frac{a_1(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2} (a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)^{3/2}}}{\sqrt{1 - \frac{(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)^2}{(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)(a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)}}}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial b_1} = - \frac{\frac{b_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} - \frac{b_1(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2} (a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)^{3/2}}}{\sqrt{1 - \frac{(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)^2}{(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)(a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)}}}$$

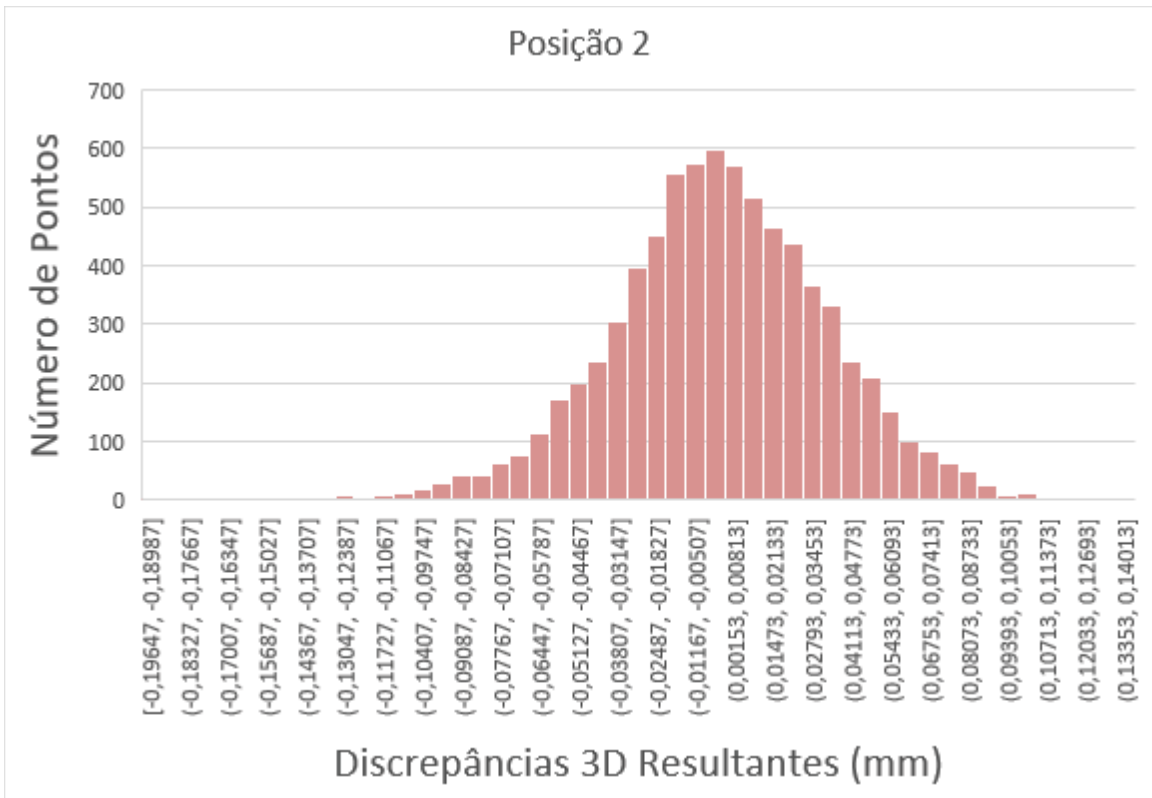
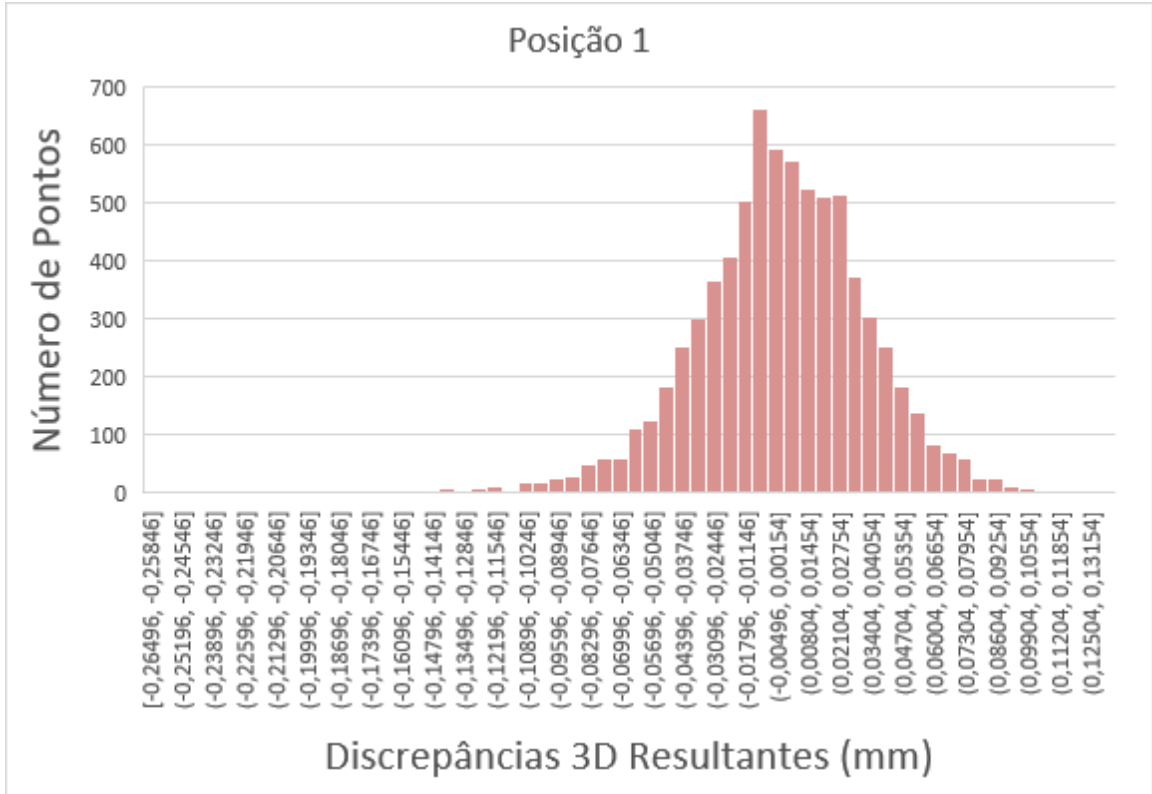
$$\frac{\partial \theta}{\partial c_1} = - \frac{\frac{c_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} - \frac{c_1(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2} (a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)^{3/2}}}{\sqrt{1 - \frac{(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)^2}{(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)(a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)}}}$$

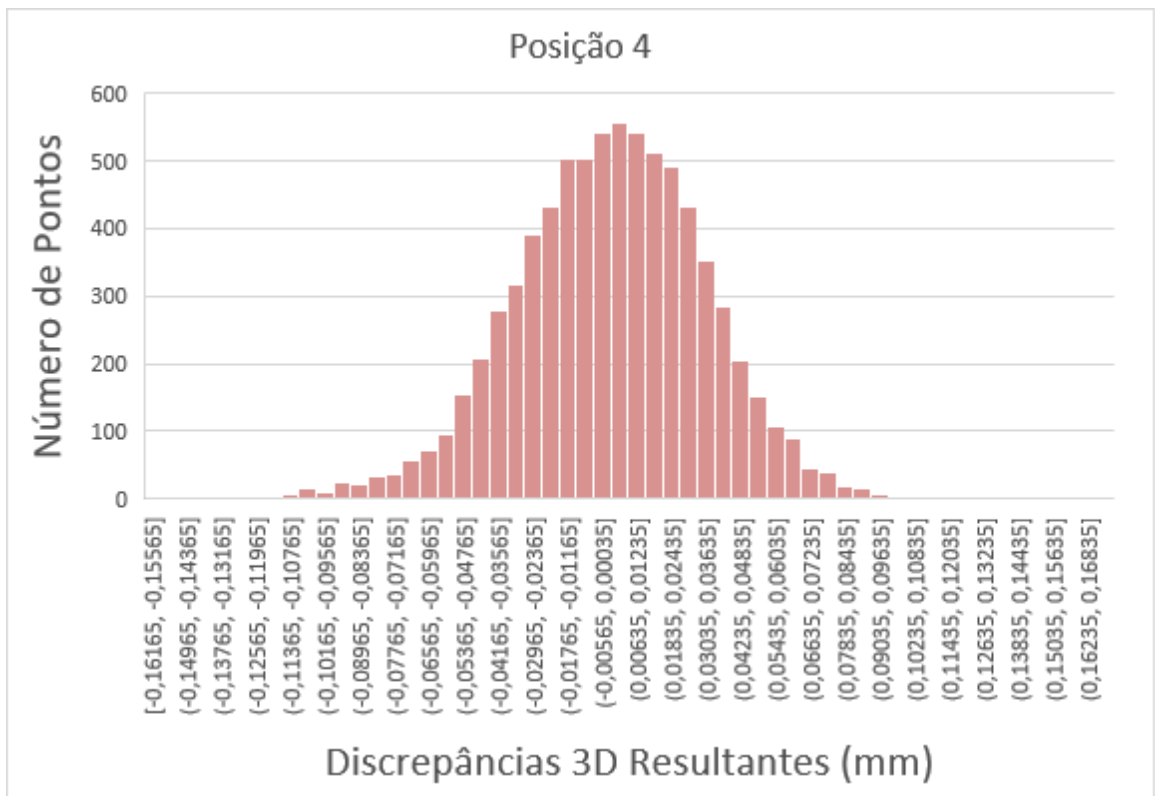
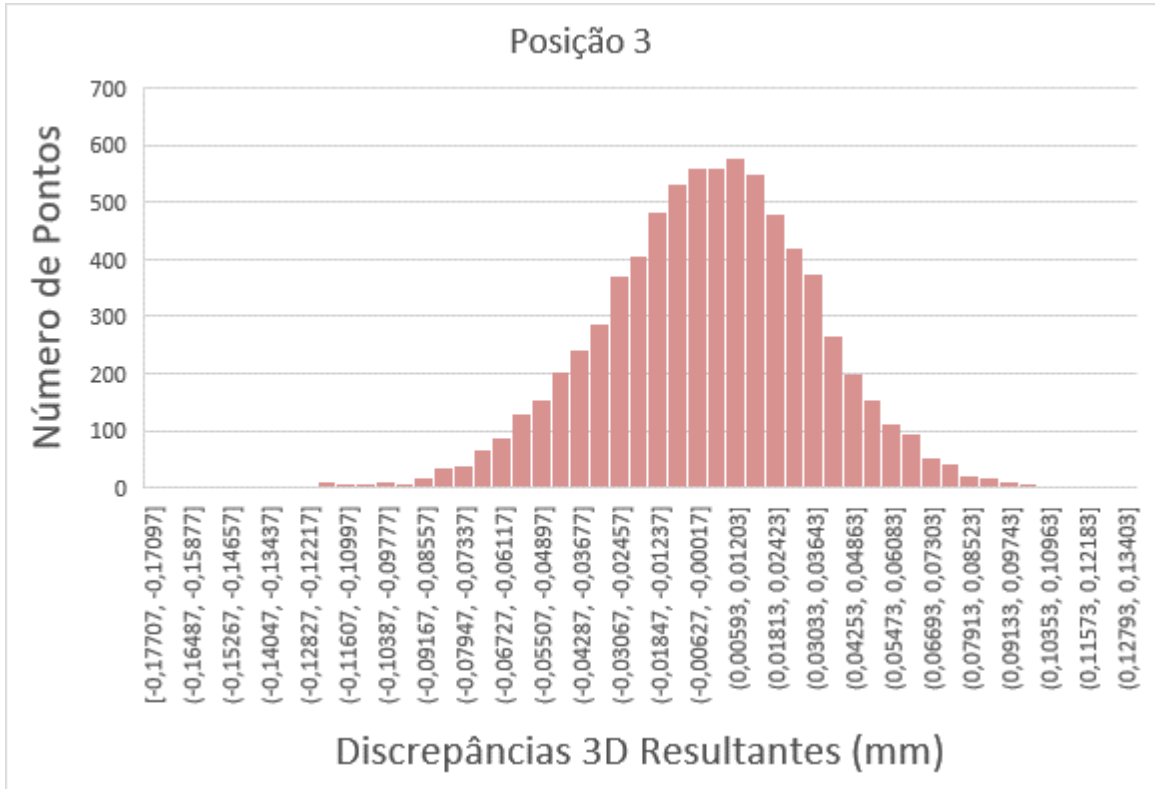
$$\frac{\partial \theta}{\partial a_2} = - \frac{\frac{a_1}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} - \frac{a_2(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)}{(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)^{3/2} \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}}}{\sqrt{1 - \frac{(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)^2}{(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)(a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)}}}$$

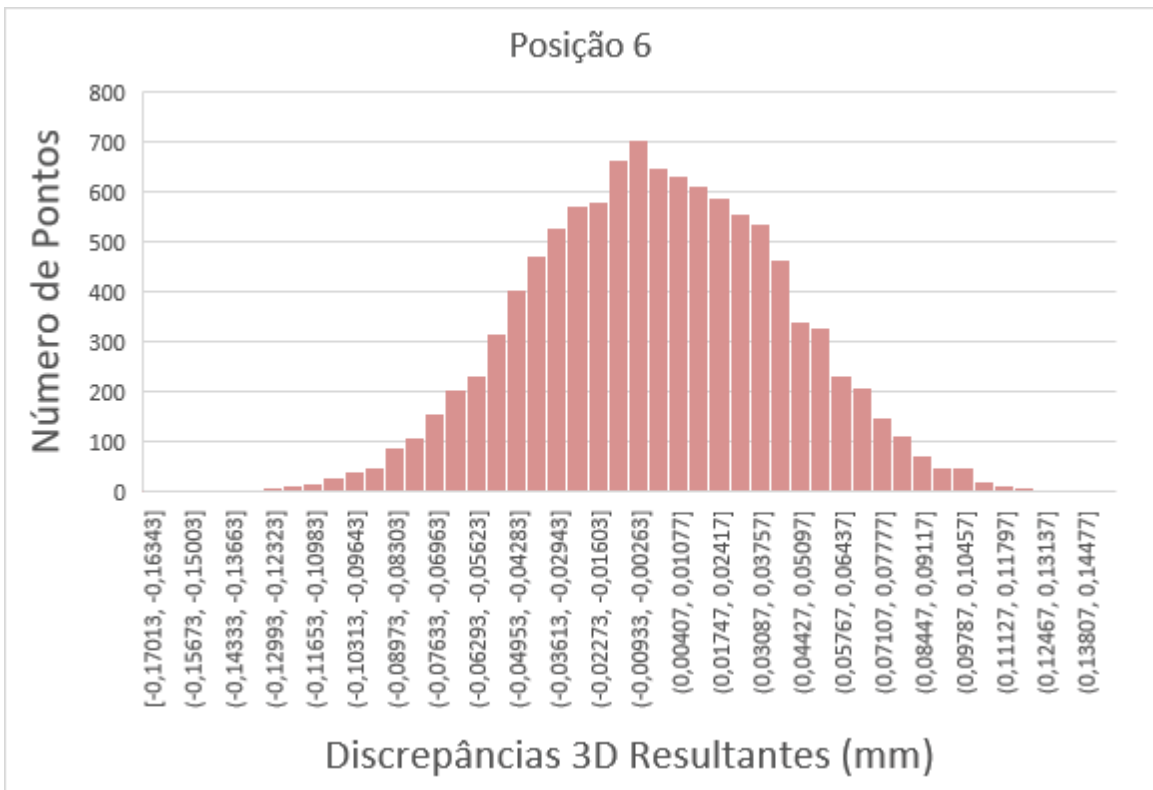
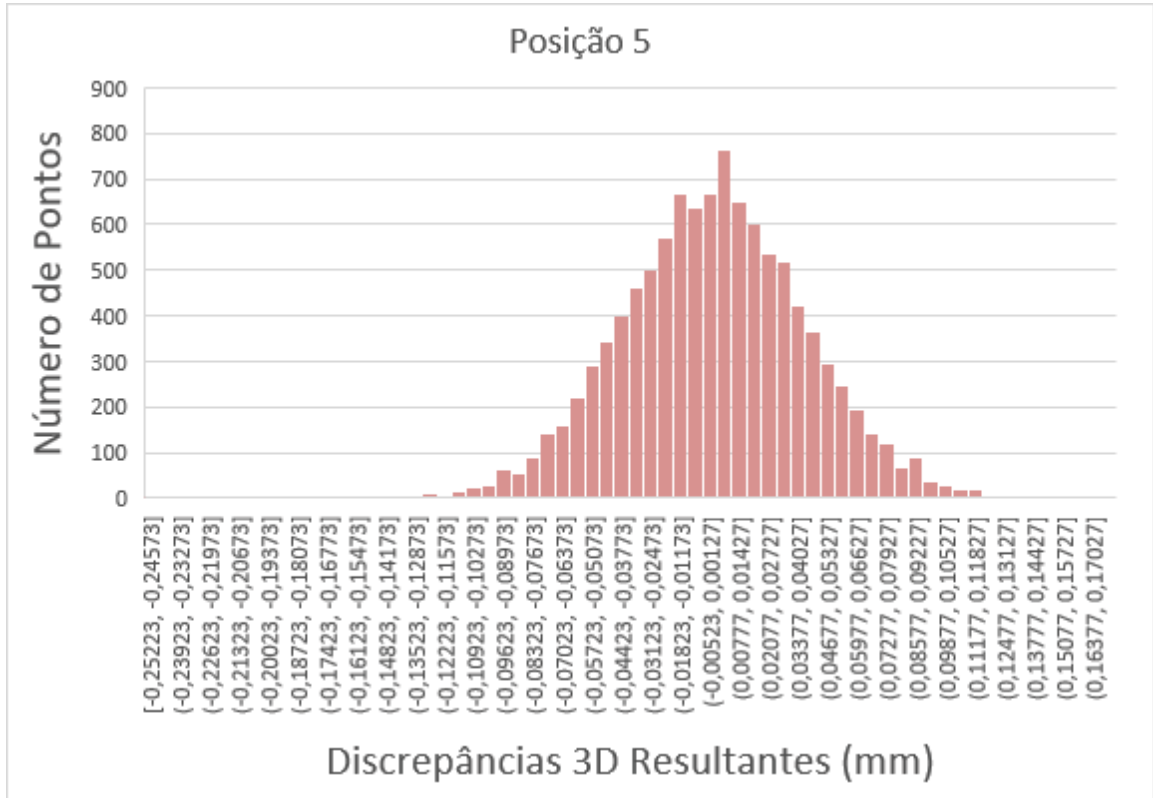
$$\frac{\partial \theta}{\partial b_2} = - \frac{\frac{b_1}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} - \frac{b_2(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)}{(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)^{3/2} \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}}}{\sqrt{1 - \frac{(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)^2}{(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)(a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)}}}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial c_2} = - \frac{\frac{c_1}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} - \frac{c_2(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)}{(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)^{3/2} \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}}}{\sqrt{1 - \frac{(a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2)^2}{(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)(a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)}}}$$

APÊNDICE C – HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES OBTIDAS COM LST







APÊNDICE D – HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES OBTIDAS COM ESTAÇÃO TOTAL

