PAULO AUGUSTO FERREIRA BORGES

**Lasers Scanners Terrestres: Desenvolvimento de metodologias
para análise da acurácia**

**SÃO PAULO
2017**

PAULO AUGUSTO FERREIRA BORGES

**Lasers Scanners Terrestres: Desenvolvimento de metodologias
para análise da acurácia**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências**

**SÃO PAULO
2017**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob
responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

BORGES, PAULO AUGUSTO FERREIRA

Lasers Scanners Terrestres: Desenvolvimento de metodologias para
análise da acurácia / P. A. F. BORGES -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
205 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.SENSORIAMENTO REMOTO 2.CARTOGRAFIA 3.TOPOGRAFIA
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Transportes II.t.

PAULO AUGUSTO FERREIRA BORGES

**Lasers Scanners Terrestres: Desenvolvimento de metodologias para análise da
acurácia**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências**

**Área de Concentração: Engenharia
de Transportes**

**Orientador: Prof. Dr. Edvaldo Simões
da Fonseca Junior**

**SÃO PAULO
2017**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pais e irmãos que sempre se esforçaram ao máximo para me auxiliar no que fosse preciso e por acreditar que um dia este objetivo seria alcançado.

À minha esposa Lidiane Borges que sempre esteve ao meu lado e me apoiou nos momentos difíceis, dando-me forças para acreditar que seria possível concluir mais esta etapa. À minha filha Clarice Borges que, ainda em gestação, acompanhou os últimos momentos de trabalho e dedicação para a finalização deste projeto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Edvaldo por acreditar e apoiar as ideias propostas para realização deste trabalho, e por todo auxílio e instrução concedida para a conclusão desta etapa, muito obrigado.

Ao Laboratório de Topografia e Geodésia do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP por ceder o espaço para execução dos experimentos e ao CNPq pelo suporte parcial com bolsa de produtividade PQ2 nº. 402393/2009-0 para fabricação das peças de calibração.

Ao Prof. Dr. Jorge Pimentel Cintra pelo auxílio, orientação e direcionamento em algumas fases do trabalho.

Ao amigo Marcos Guandalini da empresa Alezi Teodolini, por ter concedido o empréstimo de alguns equipamentos utilizados nesta pesquisa.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, *Campus* Inconfidentes, pelo apoio financeiro recebido através do PIQ – Programa Institucional de Qualificação, bem como pela concessão de horário especial para que houvesse maior tempo dedicado à conclusão deste trabalho.

Aos amigos professores do Setor de Agrimensura e Cartografia do *Campus* Inconfidentes, que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

Não é o conhecimento, mas o ato de
aprender, não a posse, mas o ato de
chegar lá, que concede a maior
satisfação.

(Carl Friedrich Gauss)

RESUMO

A calibração de instrumento é reconhecida como um importante processo para a garantia de qualidade de dados obtidos a partir de um laser scanner terrestre (TLS). Um aspecto importante na garantia da qualidade de nuvem de pontos tridimensionais capturadas com instrumentos TLS é a calibração geométrica. Erros sistemáticos inerentes aos instrumentos, se não corrigidos, podem degradar a acurácia da nuvem de pontos obtida pelo scanner. A modelagem destes erros sistemáticos e o uso de metodologias de calibração para estimativa dos coeficientes do modelo permitem quantificar e avaliar a qualidade e a acurácia dos sistemas lasers scanners terrestres. Identificar os diferentes erros inerentes ao equipamento ou ao processo de medição é um fator de grande importância para certificá-los, comprovando sua conformidade com a precisão nominal definida pelos fabricantes. Esta dissertação apresenta propostas de diferentes metodologias para aferição e calibração de laser scanners terrestres. A primeira metodologia refere-se à auto-calibração de TLS que permite obter os parâmetros de calibração referentes aos erros sistemáticos de distância (Δ_p), colimação (Δ_c), direção horizontal (Δ_θ) e o erro de índice vertical (Δ_α). Dois equipamentos foram submetidos à auto-calibração, um equipamento novo, recém-fabricado, modelo Faro Focus 3D X330, que foi utilizado como referência, e um equipamento antigo, modelo Faro Photon 80, que devido ao tempo de constante uso foi submetido à aferição. Os resultados comprovaram a eficiência da metodologia de auto-calibração na determinação dos parâmetros de correção sistemática adicional, indicando que o scanner novo apresentou resultados dentro das especificações e o modelo antigo, resultados acima dos valores de precisão definidos pelo fabricante. Visando facilitar os procedimentos de campo e escritório para fins de calibração de TLS foram propostas duas metodologias com a utilização de peças fabricadas para uso no presente trabalho, visando a obtenção da acurácia tridimensional de um TLS. A primeira consiste na utilização de uma placa de aço com nove furos sobre os quais são alojadas nove esferas de poliacetal. A segunda consiste na utilização de um sistema tridimensional de planos perpendiculares, através do qual pode-se obter a acurácia 3D do TLS. Os resultados obtidos comprovam a eficiência das duas metodologias propostas, aplicadas em procedimentos de calibração em laboratório utilizando varreduras em equipamentos de curto alcance. Por fim foram realizados testes para determinação dos parâmetros

de calibração relativos ao erro de zero ou constante aditiva, o erro de escala e o erro cíclico em linhas bases de calibração EDM, utilizando-se a rede de pilares da USP. Os resultados comprovam a necessidade de contar com distâncias entre pilares menores para utilização em TLS de curto alcance, porém, para laser scanners com maior autonomia de distância se mostrou um método eficiente.

Palavras Chave: Laser scanner terrestre. Nuvem de pontos. Erros. Calibração. Precisão. Acurácia.

ABSTRACT

Instrument calibration is recognized as an important process for quality assurance of data obtained from a terrestrial laser scanner (TLS). An important aspect in ensuring the quality of three-dimensional point cloud captured with TLS instruments is geometric calibration. Systematic errors inherent in the instruments, if not corrected, can degrade the accuracy of the cloud of points obtained by the scanner. The modeling of these systematic errors and the use of calibration methodologies to estimate the coefficients of the model allow quantifying and evaluating the quality and accuracy of the laser systems. Identifying the different errors inherent in the equipment or the measurement process is a factor of great importance to certify them, proving their conformity with the nominal precision defined by the manufacturers. This dissertation presents proposals of different methodologies for calibration of terrestrial laser scanners. The first methodology refers to TLS self-calibration, which allows to obtain the calibration parameters for systematic errors of distance (Δ_ρ), collimation (Δ_c), horizontal direction (Δ_θ) and vertical index error (Δ_θ). Two devices were submitted to self-calibration, a new, newly manufactured Faro Focus 3D X330 model, which was used as reference, and an old equipment, Faro Photon 80 model, which due to the time of constant use was subjected to the calibration. The results proved the efficiency of the self-calibration methodology in determining the additional systematic correction parameters, indicating that the new scanner presented results within the specifications and the old model, values above the precision values defined by the manufacturer. In order to facilitate the field and office procedures for TLS calibration purposes, two methodologies were proposed with the use of prefabricated parts to obtain the three-dimensional accuracy of a TLS. The first proposes the use of a steel plate with nine holes on which are housed nine spheres of polyacetal. The second refers to the use of a three-dimensional system of perpendicular planes, where from the point cloud of the different planes the 3D accuracy of the TLS can be obtained. The results obtained prove the efficiency of the two proposed methodologies, applied in laboratory calibration procedures using short-range scans. Finally, tests were carried out to determine the calibration parameters related to the error of zero or additive constant, the scale error and the cyclic error in EDM calibration baselines, using the USP's network of columns. The results confirm the need for adequacy of the distance between columns for use in

short-range TLS, but for laser scanners with greater distance autonomy an efficient method was shown.

Keywords: Terrestrial laser scanner. Cloud of points. Errors. Calibration. Precision. Accuracy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 – Espectro Eletromagnético.....	7
Figura 2.1.2 – Comprimentos de onda da radiação eletromagnética.....	7
Figura 2.1.3 – Espectro da transmitância do vapor d'água atmosférico (H ₂ O).	10
Figura 2.1.4 – Espectro da transmitância do CO ₂	11
Figura 2.1.5 - Espectro da transmitância do Ozônio (O ₃), Monóxido de Carbono (CO), Óxido Nitroso (N ₂ O), Metano (CH ₄) e Oxigênio (O ₂).	11
Figura 2.1.6 - Princípios de medição de distância.....	13
Figura 2.1.7 - Tecnologias utilizadas na medição de distâncias, alcance, precisão e diferentes aplicações.....	14
Figura 2.1.8 – Observações obtidas por um TLS para o cálculo das coordenadas tridimensionais.	16
Figura 2.1.9 – Princípio de medição do método por Tempo de Percurso Direto (Direct Time-of-Flight).	17
Figura 2.1.10 – Formas de ondas de ressonância típicas e frequências de batimento para um laser FMCW.	18
Figura 2.1.11 – Princípio de medição de distâncias em MED's, por caminho duplo, usando o método de diferença de fase.....	20
Figura 2.1.12 - Aspectos gerais de determinação da distância.....	21
Figura 2.1.13 – Esquema de um medidor digital de fase.	22
Figura 2.1.14 – Limbo horizontal de vidro, barreira eletro-óptica e esquema de saída de sinal (esquerda) e transmissor angular de Heidenhain GmbH, Alemanha	24
Figura 2.2.1 – Cintura do feixe e ângulo de divergência do feixe laser.....	26
Figura 2.2.2 – Pilares de observação para teste em campo com a finalidade de determinação da acurácia do sistema de medição angular.	29
Figura 2.2.3 – Alvo com ranhuras de comprimentos variados para teste de resolução	33
Figura 2.2.4 – Eixos mecânicos e erros axiais de um TLS.....	34
Figura 2.2.5 – Retro espalhamento de superfície e efeitos refracionais em materiais não homogêneos semitransparentes.....	36
Figura 3.1.1 – Laser Scanner Faro Photon 80.....	38
Figura 3.2.1– Laser Scanner Faro Focus 3D X330	39

Figura 3.3.1– Laser Scanner Stonex X300.....	40
Figura 3.4.1 – Alvos planos fixados nas paredes e teto	41
Figura 3.4.2 – Alvo esférico FARO	42
Figura 3.4.3 – Alvos esféricos sólidos de poliacetal	42
Figura 3.5.1 – Estação Total Leica TM30	43
Figura 3.6.1– Tela do Software Faro Scene	45
Figura 3.7.1 – Placa de aço para alojamento das esferas de poliacetal	47
Figura 3.8.1 – Esquema mostrando as três faces perpendiculares da peça tridimensional fabricada para a aferição de TLS.	48
Figura 4.4.1 – Fluxo de trabalho utilizando-se um TLS.	52
Figura 5.1.1 – Sala de auto-calibração com a distribuição dos alvos.	54
Figura 5.1.2 – Croquis da sala de auto-calibração com as 4 posições para o TLS.	54
Figura 5.1.3 – Eixos de um TLS e ângulos de orientação.	55
Figura 5.2.1 – Prática para determinação do erro de zero ou constante aditiva.	67
Figura 5.2.2 – Fase B relativa à equação 5.2.3.1.	68
Figura 5.2.3 – Fase B relativa à equação 5.2.3.2.	69
Figura 5.2.4 – Sequência de medições obtidas ao longo dos pilares da EPUSP.	73
Figura 5.2.5 – Fotos mostrando a instalação do TLS e esferas sobre os pilares.	74
Figura 5.2.6 – Nuvem de pontos em vista frontal e 3D.	75
Figura 5.3.1 – Placa de esferas 3D construída para aferição de TLS.	78
Figura 5.3.2 – Esquematização e numeração das esferas sobre a placa de aço.	79
Figura 5.3.3 – Esferas modeladas a partir da nuvem de pontos da placa de aço com as esferas virtuais sobrepostas.	81
Figura 5.3.4 – Sistemas de planos perpendiculares 3D construído para implementação do novo método proposto.	86
Figura 5.3.5 – Pontos de alinhamento 3D. Linha de referência usada na definição do alinhamento geométrico PLP 1.	87
Figura 5.3.6 – Profissional executando os serviços de aferição da peça 3D fabricada para calibração de TLS e a peça preparada para o processo de varredura após ser pintada na cor branca.	88
Figura 5.3.7 – Valores normais teóricos para os três planos de referência.	91
Figura 5.3.8 – Resultados do processo de consolidação da nuvem de pontos para a nova referência.	91

Figura 5.3.9 – 2 métodos de posicionamento da peça de calibração para realização do experimento.....	93
Figura 6.1.1 – Exemplo em que o ângulo de incidência influencia na determinação das coordenadas do centro do alvo.	99
Figura 6.1.2 – Distribuição dos resíduos 3D para as coordenadas dos alvos – TLS Faro Photon 80.....	107
Figura 6.1.3 – Distribuição dos resíduos 3D para as coordenadas dos alvos – TLS Faro Focus 3D X330	107
Figura 6.1.4 – Distribuição da acurácia das coordenadas dos alvos, obtidas em função das distâncias entre os alvos – TLS Faro Photon 80.	109
Figura 6.1.5 – Distribuição da acurácia das coordenadas dos alvos, obtidas em função das distâncias entre os alvos – TLS Faro Focus 3D X330.....	109
Figura 6.1.6 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/2.	110
Figura 6.1.7 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/4.	110
Figura 6.1.8 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/8.	111
Figura 6.1.9 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/2.	111
Figura 6.1.10 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/4.	111
Figura 6.1.11 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/8.	112
Figura 6.1.12 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/2.....	112
Figura 6.1.13 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/4.....	113
Figura 6.1.14 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/8.....	113
Figura 6.1.15 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/2.....	113

Figura 6.1.16 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/4.....	114
Figura 6.1.17 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/8.....	114
Figura 6.2.1 – Alvos Planos utilizados para as medições de distâncias entre pilares com o scanner Stonex X300.	119
Figura 6.3.1 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 1 metro.	122
Figura 6.3.2 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 3 metros.....	123
Figura 6.3.3 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 5 metros.....	123
Figura 6.3.4 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 10 metros.....	123
Figura 6.3.5 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 15 metros.....	124
Figura 6.3.6 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 20 metros.....	124
Figura 6.3.7 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 1 m.....	125
Figura 6.3.8 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 3 m.....	125
Figura 6.3.9 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 5 m.....	126
Figura 6.3.10 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 10 m.....	126
Figura 6.3.11 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 15 m.....	126
Figura 6.3.12 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 20 m.....	127
Figura 6.3.13 – Comportamento da acurácia média em função da distância e diferentes resoluções.	128
Figura 6.3.14 – Sistema de Eixos da Placa de Esferas 3D.	129
Figura 6.4.1 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos em varredura realizada à distância de 1 metro com resolução de 1/2.	140
Figura 6.4.2 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos em varredura realizada à distância de 25 metros com resolução de 1/1.....	140
Figura 6.4.3 – Histogramas de frequências obtidos para os três eixos em varredura realizada à distância de 1 metro com resolução de 1/2.	141

Figura 6.4.4 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varredura realizada à distância de 1 metro com resolução de 1/2.	141
Figura 6.4.5 – Histogramas de frequências obtidos para os três eixos em varredura realizada à distância de 20 metros com resolução de 1/1.....	142
Figura 6.4.6 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varredura realizada à distância de 25 metros com resolução de 1/1.	142
Figura 6.4.7 – Desvios padrões obtidos para o Eixo X nas diferentes varreduras. .	143
Figura 6.4.8 – Desvios padrões obtidos para o Eixo Y nas diferentes varreduras. .	144
Figura 6.4.9 – Desvios padrões obtidos para o Eixo Z nas diferentes varreduras...	144
Figura 6.4.10 – Novos desvios padrões obtidos para o Eixo X nas diferentes varreduras – peça inclinada.	145
Figura 6.4.11 – Novos desvios padrões obtidos para o Eixo Y nas diferentes varreduras – peça inclinada.	146
Figura 6.4.12 – Novos desvios padrões obtidos para o Eixo Z nas diferentes varreduras – peça inclinada.	146
Figura 6.4.13 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 15 metros com resolução de 1/2.	147
Figura 6.4.14 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 20 metros com resolução de 1/2.	147
Figura 6.4.15 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 25 metros com resolução de 1/2.	148
Figura 6.4.16 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 15 metros com resolução de 1/2.	148
Figura 6.4.17 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 20 metros com resolução de 1/2.	149
Figura 6.4.18 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 25 metros com resolução de 1/2.	149
Figura 6.4.19 – Posicionamento do sistema de planos 3D visando um menor ângulo de incidência durante a varredura da peça realizada à distância de 3 metros.	155
Figura 6.4.20 – Valores de desvios padrões obtidos para o Eixo X para as diferentes resoluções e distâncias de varredura – TLS Faro Focus 3D X330.	156
Figura 6.4.21 – Valores de desvios padrões obtidos para o Eixo Y para as diferentes resoluções e distâncias de varredura – TLS Faro Focus 3D X330.	156

Figura 6.4.22 – Valores de desvios padrões obtidos para o Eixo Z para as diferentes resoluções e distâncias de varredura – TLS Faro Focus 3D X330.	157
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.1 – Especificações técnicas do TLS Faro Photon 80	38
Tabela 3.2.1 – Especificações técnicas do TLS Faro Focus 3D	39
Tabela 3.3.1 – Especificações técnicas do TLS Stonex X300	40
Tabela 3.5.1 – Método de medição.....	43
Tabela 3.5.2 – Especificações de Precisão linear e angular (desvio padrão ISO 17123-4 e 17123-3) / Tempo de medição.....	44
Tabela 3.5.3 – Especificações de alcance.....	44
Tabela 3.5.4 – Especificações de precisão para fita refletora (60 mm x 60 mm)	44
Tabela 5.2.1 – Distâncias Padrões entre os Pilares da USP	73
Tabela 5.3.1 – especificações técnicas do braço de medição portátil.	78
Tabela 5.3.2 – Coordenadas nominais para o centro de cada esfera no sistema estabelecido na figura 5.3.3.	79
Tabela 5.3.3 – Distâncias nominais entre os centros de cada par de esferas.....	80
Tabela 5.3.4 – especificações técnicas do braço de medição portátil.	88
Tabela 6.1.1 – Coordenadas (mm) do centro do TLS Faro Photon 80 na posição j e valores de desvios padrões correspondente a cada posição.....	94
Tabela 6.1.2 – Resultados da estatística do qui-quadrado – cálculo da posição do TLS Faro Photon 80.....	95
Tabela 6.1.3 – Coordenadas (mm) do centro do TLS Faro Focus 3D X330 na posição j e valores de desvios padrões correspondente a cada posição.	95
Tabela 6.1.4 – Resultados da estatística do qui-quadrado – cálculo da posição do TLS Faro Focus 3D X330.	96
Tabela 6.1.5 – Estimativas do fator de variância a posteriori σ^2 , ao nível de 95%, antes da aplicação do método Dinamarquês – TLS Faro Photon 80.....	96
Tabela 6.1.6 – Estimativas do fator de variância a posteriori σ^2 , ao nível de 95%, antes da aplicação do método Dinamarquês – TLS Faro Focus 3D X330	96
Tabela 6.1.7 – Estimativas do fator de variância a posteriori σ^2 , ao nível de 95%, após a aplicação do método Dinamarquês e a finalização da auto-calibração – TLS Faro Photon 80.....	97

Tabela 6.1.8 – Estimativas do fator de variância a posteriori σ^2 , ao nível de 95%, após a aplicação do método Dinamarquês e a finalização da auto-calibração – TLS Faro Focus 3D X330	97
Tabela 6.1.9 – Resultados finais dos parâmetros de calibração do scanner Faro Photon 80, para as diferentes resoluções.	98
Tabela 6.1.10 – Resultados finais dos parâmetros de calibração do scanner Faro Focus 3D X330, para as diferentes resoluções.	100
Tabela 6.1.11 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/2 - Faro Photon 80.	101
Tabela 6.1.12 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/4 - Faro Photon 80.	102
Tabela 6.1.13 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/8 - Faro Photon 80.	103
Tabela 6.1.14 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/2 - Faro Focus 3D X330.....	104
Tabela 6.1.15 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/4 - Faro Focus 3D X330.....	105
Tabela 6.1.16 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/8 - Faro Focus 3D X330.....	106
Tabela 6.2.1 – Coordenadas obtidas para o centro das esferas de referência e cálculo da distância inclinada entre os pilares para a 1ª série de leitura.	115
Tabela 6.2.2 – Coordenadas obtidas para o centro das esferas de referência e cálculo da distância inclinada entre os pilares para a 2ª série de leitura.	116
Tabela 6.2.3 – Cálculo da distância reduzida ao horizonte após a correção da distância inclinada pela constante meteorológica – 1ª Série de leitura.....	116
Tabela 6.2.4 – Cálculo da distância reduzida ao horizonte após a correção da distância inclinada pela constante meteorológica – 2ª Série de leitura.....	117
Tabela 6.2.5 – Resultados da calibração em linha de base EDM para o scanner Faro Photon 80.	117
Tabela 6.2.6 – Cálculo do erro cíclico para o scanner Faro Photon 80.	118
Tabela 6.2.7 – Coordenadas obtidas para o centro dos alvos planos de referência e cálculo das distâncias inclinada e horizontal entre os pilares para o scanner Stonex X300.	119

Tabela 6.2.8 – Resultados da calibração em linha de base EDM para o scanner Stonex X300.....	120
Tabela 6.2.9 – Cálculo do erro cíclico para o scanner Stonex X300.....	120
Tabela 6.3.1 – Coordenadas nominais para o centro de cada esfera coletadas com a configuração de resolução de 1:2 para a distância de 1 metro.....	121
Tabela 6.3.2 – Distâncias (mm) calculadas entre o centro de cada par de esferas e as respectivas discrepâncias (mm) para a nuvem de pontos obtida com a configuração de resolução de 1:2 para a distância de 1 metro.....	122
Tabela 6.3.3 – Acurácia e respectivo desvio padrão médio calculados para cada distância e resolução.....	127
Tabela 6.3.4 – Coordenadas do centro do TLS na posição j, valores de desvios padrões correspondente a cada posição e resultado da estatística do qui-quadrado calculada.	130
Tabela 6.4.1 – Valores de desvios padrões correspondente a uma amostra, calculados em função do número total de observações – TLS Faro Photon 80.....	133
Tabela 6.4.2 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 1 metro de distância – TLS Faro Photon 80.....	134
Tabela 6.4.3 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 1 metro de distância – TLS Faro Photon 80.....	134
Tabela 6.4.4 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 3 metros de distância – TLS Faro Photon 80.....	135
Tabela 6.4.5 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 3 metros de distância – TLS Faro Photon 80.....	135
Tabela 6.4.6 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 5 metros de distância – TLS Faro Photon 80.....	136
Tabela 6.4.7 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 5 metros de distância – TLS Faro Photon 80.....	136
Tabela 6.4.8 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 10 metros de distância – TLS Faro Photon 80.....	137
Tabela 6.4.9 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 10 metros de distância – TLS Faro Photon 80.....	137
Tabela 6.4.10 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 15 metros de distância – TLS Faro Photon 80.	138

Tabela 6.4.11 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 20 metros de distância – TLS Faro Photon 80.	138
Tabela 6.4.12 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 25 metros de distância – TLS Faro Photon 80.	139
Tabela 6.4.13 – Avaliação dos valores de assimetria e curtose para as diferentes amostras.	151
Tabela 6.4.14 – Avaliação dos valores de assimetria e curtose para as diferentes amostras após as novas varreduras com a peça inclinada.	152
Tabela 6.4.15 – Valores de desvios padrões correspondente a uma amostra, calculados em função do número total de observações – TLS Faro Focus 3D X330.	153
Tabela 6.4.16 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 1 metro de distância – TLS Faro Focus 3D X330.	154
Tabela 6.4.17 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 3 metros de distância – TLS Faro Focus 3D X330.	154
Tabela 6.4.18 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 5 metros de distância – TLS Faro Focus 3D X330.	155
Tabela 6.4.19 – Avaliação dos valores de assimetria e curtose para as diferentes amostras a partir das varreduras com o TLS Faro Focus 3D X330.	157

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1.1 – Características dos Gases que produzem feições de absorção atmosférica entre 0.4 – 2.5 mm.	9
Quadro 5.3.1 – Determinação da distância nominal (mm) do centro da esfera ao plano Z.....	89
Quadro 5.3.2 – Determinação do diâmetro nominal (mm) da esfera de referência...	89
Quadro 5.3.3 – Determinação da distância nominal (mm) do centro da esfera ao plano Y e do desvio angular do plano Y para o plano Z.....	89
Quadro 5.3.4 – Determinação da distância nominal (mm) do centro da esfera ao plano X e do desvio angular do plano X para o plano Z.....	90

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVO PROPOSTO	3
1.1.1. Objetivo geral.....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
1.2. JUSTIFICATIVA.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. LASER SCANNER TERRESTRE (TLS)	5
2.1.1. Ondas eletromagnéticas.....	6
2.1.2. Sistemas de medição laser	12
2.1.3. Princípios de medição	13
2.1.3.1. <i>Medição por tempo de percurso direto (time-of-flight direto)</i>	15
2.1.3.2. <i>FMCW – onda contínua de frequência modulada</i>	17
2.1.3.3. <i>AMCW – onda contínua de amplitude modulada</i>	19
2.1.4. Sistema de medição angular	23
2.1.5. Unidade de deflexão do feixe laser	24
2.2. FONTES DE ERROS EM LASER SCANNERS TERRESTRES	24
2.2.1. Erros instrumentais.....	25
2.2.1.1. <i>Diâmetro do feixe laser</i>	26
2.2.1.2. <i>Acurácia angular</i>	28
2.2.1.3. <i>Acurácia linear</i>	29
2.2.1.4. <i>Resolução</i>	32
2.2.1.5. <i>Efeito de bordas</i>	33
2.2.1.6. <i>Erro axial</i>	34
2.2.2. Erros relacionados à forma e natureza dos objetos escaneados	35
2.2.3. Erros causados pelas condições ambientais do local de escaneamento..	37
3. MATERIAIS	38
3.1. O LASER SCANNER FARO PHOTON 80	38
3.2. O LASER SCANNER FARO FOCUS 3D X330	39
3.3. O LASER SCANNER STONEX X300	40
3.4. ALVOS PLANOS E ESFÉRICOS.....	41
3.5. A ESTAÇÃO TOTAL LEICA TM30.....	43

3.6. SOFTWARES UTILIZADOS.....	45
3.6.1. Software Faro Scene.....	45
3.6.2. Ambiente MatLab.....	46
3.6.3. DataGeosis Office.....	46
3.6.4. Microsoft Office Excel.....	46
3.7. PLACA DE ESFERAS 3D	47
3.8. SISTEMA DE PLANOS PERPENDICULARES 3D.....	47
4. ABORDAGEM GERAL DE PROCEDIMENTOS DE COLETA COM TLS	49
4.1. CONFIGURAÇÃO E PREPARO DO TLS	49
4.2. PLANEJAMENTO E COLETA DAS OBSERVAÇÕES	49
4.3. CONSOLIDAÇÃO E REGISTRO DE MÚLTIPLAS CENAS.....	50
4.4. EXPORTAÇÃO DOS DADOS DA NUVEM DE PONTOS	51
5. METODOLOGIAS PARA CALIBRAÇÃO DE TLS	53
5.1. AUTO-CALIBRAÇÃO DE TLS.....	53
5.1.1. Modelo matemático para o método de auto-calibração de TLS	55
5.1.2. Modelo estocástico	62
5.1.3. Estimativa de precisão e acurácia das coordenadas.....	65
5.2. CALIBRAÇÃO DO DISTANCIÔMETRO DE UM TLS EM LINHA BASE DE CALIBRAÇÃO EDM	66
5.2.1. Constante aditiva ou erro de índice.....	66
5.2.2. Erro de escala.....	67
5.2.3. Erro cíclico	68
5.3. AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA TRIDIMENSIONAL.....	77
5.3.1. Calibração de TLS utilizando uma placa de esferas 3D.	77
5.3.1.1. Calibração da placa de esferas 3D.....	78
5.3.1.2. Modelo matemático.....	80
5.3.1.3. Análise estatística do ajustamento	84
5.3.2. Calibração utilizando um sistema de 3 planos perpendiculares 3D	86
5.3.2.1. Calibração do sistema de planos 3D.....	86
5.3.2.2. Cálculos estatísticos utilizados para calibração	92
6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	94
6.1. AUTO-CALIBRAÇÃO DO TLS.	94
6.1.1. Cálculo das coordenadas e desvios da posição do TLS	94

6.1.1.1. Equipamento Faro LS Photon 80	94
6.1.1.2. Equipamento Faro Focus 3D X330	95
6.1.2. Cálculo dos parâmetros de calibração do TLS	96
6.2. CALIBRAÇÃO DO DISTANCIÔMETRO DE UM TLS EM LINHA BASE DE CALIBRAÇÃO EDM	115
6.2.1. Determinação dos parâmetros de calibração do TLS Faro Photon 80....	115
6.2.2. Determinação dos parâmetros de calibração do TLS Stonex X300	118
6.3. CALIBRAÇÃO DE TLS UTILIZANDO UMA PLACA DE ESFERAS 3D.....	121
6.4. CALIBRAÇÃO DE TLS UTILIZANDO UM SISTEMA DE PLANOS PERPENDICULARES 3D	132
6.4.1. Resultados de calibração do TLS Faro Photon 80	132
6.4.2. Resultados de calibração do TLS Faro Focus 3D X330	153
7. CONCLUSÕES.....	158
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161
APÊNDICE A – Coordenadas dos alvos utilizadas na auto-calibração do TLS Faro Photon 80.	165
APÊNDICE B – Coordenadas dos alvos utilizadas na auto-calibração do TLS Faro Focus 3D X330.....	166
ANEXO I – Relatório dimensional da placa de esferas 3D.....	167
ANEXO II – Relatório dimensional do sistema de planos perpendicularidades 3D.	172

1. INTRODUÇÃO

O uso de Lasers Scanners Terrestres (TLS) tem se mostrado um método preciso e eficiente na aquisição de informações tridimensionais de objetos ou formas complexas. As características e capacidades dos modernos sistemas TLS abriram ao mercado novos campos de aplicação, desde as geotecnologias até a indústria cinematográfica (CHOW; LICHTI; TESKEY, 2010).

Estes equipamentos se sobressaem devido à alta precisão alcançada nos levantamentos, podendo obter medidas com erros da ordem do centésimo de milímetro. Aliada à grande vantagem de obtenção de medidas precisas está a não necessidade de refletores para a coleta das distâncias aos objetos, além da alta resolução, gerando, quando necessário, densas nuvens de pontos com taxas superiores a 900.000 pontos/s.

Para gerar coordenadas tridimensionais (x , y , z) de pontos sobre uma superfície, os equipamentos Lasers Scanners Terrestres emitem pulsos de laser com o auxílio de um espelho de varredura. Esse pulso laser atinge o objeto e parte dessa energia volta para o sistema, permitindo o cálculo da distância. Essa distância é determinada através do intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do pulso (DALMOLIN; SANTOS, 2003).

Um aspecto importante na garantia da qualidade de nuvem de pontos tridimensionais capturadas com instrumentos TLS é a calibração geométrica. Erros sistemáticos inerentes aos instrumentos, se não corrigidos, podem degradar a acurácia da nuvem de pontos obtida pelo scanner. A modelagem destes erros sistemáticos e o uso de metodologias de calibração para estimativa dos coeficientes do modelo são, portanto, componentes necessários no procedimento de controle de qualidade (LICHTI, 2010).

Embora os Lasers Scanners Terrestres sejam instrumentos precisos, eles apresentam inevitáveis erros nas medições. Estes erros são oriundos principalmente de desajustes nos mecanismos de movimento, erros no diodo de medição, erros de software e outros erros causados por efeitos dinâmicos e pelas condições ambientais (QIANG; WEI, 2009).

Entre as diferentes fontes de erros, citam-se (BOEHLER; BORDAS; MARBS, 2003):

- a) Erros Instrumentais (diâmetro do feixe laser, resolução, efeito de bordas, erro linear, erro angular e erros nos sistemas de eixos);
- b) Erros relacionados à forma e à natureza dos objetos escaneados (refletância da superfície e reflexão em multicaminhamento);
- c) Erros causados pelas condições ambientais do local da varredura (variação de temperatura e umidade, refração, interferência por radiação e distorções axiais relacionadas ao movimento de rotação do scanner e do espelho de varredura);
- d) Erros metodológicos.

Diferentes métodos de auto-calibração de Lasers Scanners Terrestres tem sido investigados por uma série de pesquisadores, e podem ser classificados por tipo de alvos utilizados, técnicas baseadas em alvos pontuais devidamente sinalizados e por meio de técnicas baseadas em planos. O ponto comum das diferentes abordagens é a coleta de observações altamente redundantes a partir de diferentes posições para o instrumento, em uma configuração de forte superposição de dados, que permita a formação de figuras geométricas regulares entre a posição do scanner e os alvos (LICHTI, 2010).

Utilizando estas observações, pode-se estimar simultaneamente as diferentes variáveis do modelo, que compreendem a posição do scanner e os elementos de orientação angular, os parâmetros do alvo (pontos coordenados ou parâmetros de planos) e os coeficientes do erro sistemático, chamados de Parâmetros Adicionais (AP's) (LICHTI, 2010).

Neste contexto, a definição e implantação de metodologias que permitam quantificar e avaliar a qualidade e a acurácia dos sistemas Lasers Scanners Terrestres e os diferentes erros inerentes ao equipamento ou ao processo de medição, torna-se um fator de grande importância para certificá-los, comprovando sua conformidade com a precisão nominal definida pelos fabricantes.

1.1. OBJETIVO PROPOSTO

1.1.1. Objetivo geral

Devido à grande variedade de aplicações usando esta tecnologia, essa dissertação tem como objetivo principal a proposição e aplicação de metodologias para avaliar, quantificar e estimar, por meio de experimentos, os diferentes tipos de erros que ocorrem no processo de varredura, permitindo assim a calibração e a avaliação da acurácia posicional em Lasers Scanners Terrestres.

1.1.2. Objetivos específicos

- ✓ Aplicação de um método para avaliação da acurácia linear de Lasers Scanners Terrestres, a partir das medidas de distâncias entre o equipamento e alvos posicionados sobre os pilares ao longo da raia olímpica da USP, comparando-se os resultados obtidos com os valores de distâncias padrão.
- ✓ Avaliação da ocorrência de erros angulares horizontais e verticais a partir da auto-calibração de TLS, provocados por distorções nos eixos ou rolamentos fazendo com que o feixe refletido no espelho ou prisma não seja ortogonal ao feixe incidente.
- ✓ Determinação de erros sistemáticos a partir da aplicação do método de auto-calibração de Lasers Scanners Terrestres, descrito por (RESHETYUK, 2006).
- ✓ Adaptação do método “Placa de Esferas 2D” descrito por (QIANG; WEI, 2009), para fins de avaliação da acurácia tridimensional, por meio de medidas de distância entre esferas, permitindo verificar a existência de diferenças de acurácia na direção horizontal e vertical do mesmo equipamento.
- ✓ Proposta de um novo método de avaliação da acurácia tridimensional, a partir do uso de um sistema de planos perpendiculares, formando-se um sistema de eixos tridimensionais (x, y, z). Definindo-se o sistema de referência da nuvem de pontos coincidente com a intersecção dos três planos, pode-se avaliar os valores dos desvios padrões obtidos para os

três eixos (σ_x , σ_y e σ_z) calculados a partir de uma densa nuvem de pontos para cada face plana.

1.2. JUSTIFICATIVA

A calibração de um TLS não deve ser usada somente para verificar a ocorrência de erros provenientes de diferentes fontes, mas também para propiciar uma compensação e correção dos diferentes erros presentes em uma nuvem de pontos.

Devido à inexistência de uma metodologia sistemática de análise de erros, aferição e calibração de equipamentos Laser Scanners Terrestre, os diferentes métodos de calibração (existentes ou desenvolvidos) que serão aplicados na execução deste trabalho poderão ser utilizados como referência para a implantação de uma base de calibração. Ressalta-se ainda o desenvolvimento de um novo método para avaliação da acurácia tridimensional, que utiliza um sistema de aferição de custo relativamente baixo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. LASER SCANNER TERRESTRE (TLS)

O Laser Scanner Terrestre é um instrumento que tem sido utilizado há mais de uma década para obter coordenadas tridimensionais (x_i, y_i e z_i) de pontos medidos sobre a superfície de diferentes objetos. Devido à sua alta acurácia, rápida aquisição de dados e ampla cobertura espacial, aliada a uma alta resolução que permite a obtenção de nuvens de pontos a taxas superiores a 900.000 pontos/s, estes equipamentos tem sido utilizados em diferentes aplicações. Entre outras, citam-se: a geração de maquetes 3D (as-built) para plantas industriais, documentação digital visando a preservação de patrimônios históricos, aplicações em geologia e mineração visando a obtenção de volumes a partir da geração de modelos digitais do terreno com precisão da ordem do centímetro, criminalística (investigação de cenas de crimes), entre outros (SCHULZ, 2007).

O Laser Scanner Terrestre é um dispositivo de mapeamento ativo que permite adquirir uma densa nuvem de pontos tridimensionais, seja em pequenos ou grandes objetos como também em superfícies. Os principais componentes que permitem a aquisição das coordenadas tridimensionais dos pontos e seus respectivos níveis de intensidade são os dispositivos de obtenção da distância, o sistema de medição de refletância e o sistema de medição angular (BOEHLER; BORDAS; MARBS, 2003).

Em geral, um TLS emite um pulso laser, o qual é desviado por um pequeno dispositivo de rotação (espelho ou prisma) em direção ao objeto. Este dispositivo que permite desviar o feixe laser em duas direções (horizontal e vertical) é considerado o segundo componente mais importante de um TLS. O laser é refletido e retorna ao sistema no qual são registradas as distâncias entre o dispositivo laser e o objeto, além da refletância (intensidade da energia refletida) e os ângulos de elevação e azimute, a partir dos quais é possível obter as coordenadas tridimensionais dos pontos que definem os objetos escaneados.

Uma pequena diferença angular, que depende da distância do instrumento para o objeto investigado, pode gerar erros consideráveis nas coordenadas dos

pontos. A precisão angular depende ainda do correto posicionamento do dispositivo de rotação e da acurácia do dispositivo de medição angular (COSARCA; JOCEA; SAVU, 2009).

Um TLS baseia-se no princípio de medição de distâncias sem refletores, onde as influências de diferentes materiais e suas diferentes cores tornam-se uma importante fonte de efeitos sistemáticos e ruídos nos dados obtidos, que dependem ainda da combinação entre o comprimento de onda do feixe laser e o material do objeto escaneado. Resultados de calibração com diferentes sistemas laser scanners com variados materiais e cores podem ser encontrados em contribuições de vários autores, como exemplo (SOUDARISSANANE et al., 2011), (RESHETYUK, 2010), (KAASALAINEN et al., 2009), (KERSTEN; STERNBERG; MECHELKE, 2005) e (BOEHLER; BORDAS; MARBS, 2003).

2.1.1. Ondas eletromagnéticas

A energia eletromagnética é emitida por qualquer corpo com temperatura acima do zero grau absoluto (0°K) e sua propagação é definida como uma energia que se move em forma de uma onda eletromagnética à velocidade da luz e que independe de um meio material. Uma onda eletromagnética refere-se a um conjunto composto pelos campos elétrico e magnético que se propagam pelo espaço. A radiação eletromagnética contém um amplo espectro eletromagnético, conforme pode ser observado na Figura 2.1.1, variando desde os comprimentos de onda muito curtos (raios gama), passando pela luz visível e chegando-se aos comprimentos mais longos (ondas de rádio).

Figura 2.1.1 – Espectro Eletromagnético.

FONTE: (VILLATE, 2012).

Os comprimentos de onda da radiação eletromagnética apresentados na Figura 2.1.2, podem ser tão pequenos que são medidos em subunidades como o nanômetro ($1\text{nm} = 0.000000001\text{m}$) ou o micrometro ($1\mu\text{m} = 0.000001\text{m}$). Por outro lado às frequências podem ser tão altas que são medidas em Gigahertz ($1\text{Ghz} = 1.000.000.000$ de ciclos por segundo) ou Megahertz ($1\text{MHz} = 1.000.000$ de ciclos por segundo).

Figura 2.1.2 – Comprimentos de onda da radiação eletromagnética

FONTE: (LATORRE, et. al., 2002)

As ondas eletromagnéticas encontram aplicações em diversas áreas tais como a radio-transmissão, emprego de micro-ondas para aquecimento de alimentos, em lasers para corte de materiais ou ainda para uso na medicina, em especialidades cirúrgicas de oftalmologia (correção da visão de pacientes com miopia, hipermetropia e astigmatismo), ginecologia, ortopedia, otorrinolaringologia, urologia, cirurgia plástica, gastrenterologia, dermatologia, cardiologia e, mais recentemente, em estudos da fisiologia da circulação, da imunologia e até mesmo no diagnóstico de alguns cânceres. Em aplicações geodésicas são frequentemente utilizadas para a medição de distâncias, para as quais são utilizados comprimentos de onda específicos definidos em função do meio de propagação (i.e. troposfera, ionosfera, etc.) e do intervalo de distância a ser medido (SCHULZ, 2007).

Devido às variações de temperatura, pressão atmosférica, umidade entre outros parâmetros, verifica-se uma variação na velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, causando atrasos durante a transmissão entre um emissor e receptor. Estas variações afetam diretamente a qualidade na medição de distâncias, devendo ser corrigidas por meio de um modelamento matemático adequado (SCHULZ, 2007).

A energia eletromagnética ao atravessar um meio isotrópico pode ser absorvida, refletida e espalhada. Os gases presentes na atmosfera apresentam capacidade de absorção muito variável em relação ao comprimento de onda da energia eletromagnética. As ondas eletro-ópticas ($0,4\mu\text{m} < \lambda < 1,3\mu\text{m}$) representam somente uma pequena faixa do espectro eletromagnético e são amplamente utilizadas em aplicações geodésicas devido às suas propriedades quando utilizadas próximas à superfície terrestre, que minimizam a absorção na atmosfera e maximizam a transmissão (SCHULZ, 2007).

A refletância refere-se à capacidade de um objeto de refletir a energia radiante, enquanto que a absorbância refere-se à capacidade de absorver energia radiante. Já a capacidade de transmitir energia radiante é indicada pela sua transmitância. Como exemplo, um objeto escuro e opaco tem um valor baixo para a refletância, alto para a absorbância e nulo para a transmitância. A refletância, absorbância e a transmitância costumam ser expressas em percentagem (ou por um número entre 0 e 1).

A absorção é um fenômeno termodinâmico que resulta na perda efetiva de energia para os constituintes atmosféricos e que abrange todo o espectro óptico, ocorrendo de forma seletiva em comprimentos de onda específicos. A maior parte dos gases não produz feições de absorção entre 0,4 μm e 2,5 μm em condições atmosféricas normais (LATORRE, et. al., 2002). Os principais gases absorvedores da radiação eletromagnética são vapor d'água (H_2O), oxigênio (O_2), ozônio (O_3) e gás carbônico (CO_2). Os gases CO , CH_4 , NO e N_2O ocorrem em pequenas quantidades e também exibem espectros de absorção. Suas características em relação à absorção atmosférica são apresentadas na Tabela 2.1.1:

Quadro 2.1.1 – Características dos Gases que produzem feições de absorção atmosférica entre 0.4 – 2.5 mm.

GASES	Características de Absorção de Energia Radiante	Distribuição Vertical dos Gases na Atmosfera
H_2O_v	<ul style="list-style-type: none"> É a mais forte fonte de absorção da energia radiante, possuindo maior importância entre os gases. Apresenta pico de absorção em várias bandas, onde os maiores estão centrados em 0.94 μm, 1.14 μm, 1.38 μm e 1.88 μm. 	<ul style="list-style-type: none"> A concentração de Vapor d'água, usualmente, decresce rapidamente com a altitude. Pode ser dramática a distribuição espacial e temporal da concentração do vapor d'água.
CO_2	<ul style="list-style-type: none"> Possui fortes bandas próximas de 2,0 μm (1.96 μm, 2.01 μm e 2.08 μm) 	<ul style="list-style-type: none"> CO_2, N_2O, CH_4 e O_2 são uniformemente misturados na troposfera.
O_3	<ul style="list-style-type: none"> Possui uma banda próxima de 0,6 μm. 	<ul style="list-style-type: none"> Aproximadamente 90% do O_3 está localizado na estratosfera com um pico de concentração próximo de 25 km. A importância do O_3 muda com a mudança de latitude e a sazonalidade.
N_2O	<ul style="list-style-type: none"> Possui fracas bandas entre 2,0 μm e 2,5 μm. 	<ul style="list-style-type: none"> Uniformemente misturados na troposfera.
CO	<ul style="list-style-type: none"> Possui fracas bandas entre 2,0 μm e 2,5 μm. 	<ul style="list-style-type: none"> A concentração do CO está intimamente associada a atividades antrópicas.
CH_4	<ul style="list-style-type: none"> Possui uma banda próxima de e 2,35 μm. 	<ul style="list-style-type: none"> Uniformemente misturados na troposfera.
O_2	<ul style="list-style-type: none"> Várias bandas entre 0,6 μm e 1,3 μm. 	<ul style="list-style-type: none"> Uniformemente misturados na troposfera.

FONTE: (LATORRE, et. al., 2002).

A Absorção e o espalhamento são efeitos determinísticos que são bastante conhecidos. Na prática, pacotes de software como LOWTRAN, FASCODE, MODTRAN, HITRAN e PCLNWIN são comumente usados para prever os efeitos de

transmitância (atenuação) em função do comprimento de onda, com base em uma variedade de condições (meteorológicas, latitude, altitude, etc.) (ANDREWS; PHILLIPS, 1998).

As Figuras 2.1.3, 2.1.4 e 2.1.5 a seguir, apresentam o espectro transmitido calculado a partir do modelo LOWTRAN (Low Atmospheric Radiance and Transmittance) para os sete gases citados, utilizando uma resolução de 10 nm. Maiores informações sobre o modelo LOWTRAN podem ser encontradas em (RICHTER, 1985).

Figura 2.1.3 – Espectro da transmitância do vapor d'água atmosférico (H₂O).

FONTE: (LATORRE, et. al., 2002)

Figura 2.1.4 – Espectro da transmitância do CO₂.

FONTE: (LATORRE, et. al., 2002)

Figura 2.1.5 - Espectro da transmitância do Ozônio (O₃), Monóxido de Carbono (CO), Óxido Nitroso (N₂O), Metano (CH₄) e Oxigênio (O₂).

FONTE: (LATORRE, et. al., 2002)

2.1.2. Sistemas de medição laser

Um sistema de medição LASER (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) é um dispositivo que amplifica a luz por meio de emissão estimulada de radiação. Um laser emite um tipo específico de radiação eletromagnética. A emissão de um laser é uma radiação monocromática muito intensa que viaja como um feixe muito estreito com elevada energia. Considerando-se o espectro eletromagnético, lasers se encaixam na região óptica ou suas vizinhas, que se estende a partir do infravermelho, passando pelo visível até as regiões ultravioletas (ANDREWS; PHILLIPS, 1998).

Os diferentes sinais utilizados na determinação de distâncias (pulsos, frequências, etc.) são modulados em ondas eletromagnéticas, que, quando emitidos, se propagam pelo meio à velocidade da luz. Modular uma onda significa modificar sua amplitude, a frequência ou a fase de uma onda de alta frequência a partir de outra onda auxiliar de baixa frequência.

A velocidade da luz foi medida diretamente em 1850, obtendo-se o valor de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, confirmando as estimativas feitas muitos anos antes, pela primeira vez por Romer (1644-1710) e mais tarde por Bradley (1693-1762). Atualmente o valor recomendado pela IAU (International Astronomical Union) para a velocidade da luz no vácuo é de $299.792.458 \pm 1,2 \text{ m/s}$. O conhecimento da velocidade da luz foi importante para a teoria de Maxwell (1831-1879) sobre ondas eletromagnéticas publicado em 1873. Hertz (1857-1894) descobriu o efeito fotoelétrico em 1887 e tornou-se o primeiro a verificar a teoria de Maxwell, produzindo radiação de comprimento de onda curto (microondas), que possuía todas as propriedades das ondas. No entanto, a teoria quântica de Planck (1858-1947), tal como interpretado por Einstein (1879-1955), em 1905, pode explicar o efeito fotoelétrico e introduzir a noção de que a energia das ondas de luz é concentrada em pequenos pacotes chamados fótons (ANDREWS; PHILLIPS, 1998).

Com o propósito de produzir microondas mais curtas do que aquelas utilizadas nos radares da Segunda Guerra Mundial, Charles Townes decidiu utilizar moléculas e a radiação estimulada na região de microondas para obter uma radiação estimulada de comprimento de onda de 1 cm, denominada maser. O maser

foi assim, o precursor do laser e, ao final do século XX, verificou-se que a radiação poderia ser estimulada na faixa espectral que vai das microondas à luz visível. Novamente, Townes e Arthur Schawlow demonstraram, teoricamente, que era possível utilizar átomos para gerar um maser óptico, que foi denominado laser, produzindo assim uma radiação na região visível do espectro eletromagnético (BARROS, 2002).

O primeiro dispositivo a laser experimental bem sucedido foi desenvolvido por Maiman no Laboratório de Pesquisa Hughes em 1960, fazendo funcionar o primeiro laser sólido, a partir de um cristal de rubi. Naquele mesmo ano, Javan (pesquisador de um grupo da Bell Laboratories) conseguiu produzir o primeiro laser a gás, a partir de uma mistura dos gases nobres hélio e neônio (He-Ne). Este primeiro laser de He-Ne foi operado inicialmente em 1,15 μm , mas foi estendido no ano seguinte para o familiar 0,633 μm de comprimento de onda (ANDREWS; PHILLIPS, 1998).

2.1.3. Princípios de medição

Os métodos de medição de distância óptica utilizados em Laser Scanners Terrestres podem ser divididos tecnicamente em três categorias (AMANN et al., 2001): Interferometria, Tempo de Percurso (time-of-flight) e Triangulação conforme ilustra a Figura 2.1.6.

Figura 2.1.6 - Princípios de medição de distância.

FONTE: Adaptado de (SCHULZ, 2007).

A distância máxima de operação e a precisão dos diferentes Lasers Scanners Terrestres dependem do princípio de medição utilizado na determinação da distância, apresentadas na Figura 2.1.6. As diferentes tecnologias podem ser diferenciadas segundo as características de alcance e precisão conforme a Figura 2.1.7:

Figura 2.1.7 - Tecnologias utilizadas na medição de distâncias, alcance, precisão e diferentes aplicações

FONTE: Adaptado de (SCHULZ, 2007).

O método de triangulação normalmente é utilizado em curtas distâncias enquanto o método FMCW (Onda Contínua de Frequência Modulada) é utilizado em curtas e médias distâncias. Já o método AMCW (Onda Contínua Modulada em Amplitude) opera em médias distâncias enquanto o método direto Time-of-Flight (TOF) é utilizado em médias e longas distâncias. Observa-se que a precisão decresce conforme se aumenta a distância aos objetos escaneados.

Em função dos métodos por Interferometria e Triangulação¹ não serem frequentemente utilizados em TLS e sim relacionados ao sensoriamento remoto e sistemas scanners de curto alcance, neste trabalho a ênfase refere-se ao método

¹ Laser Scanners de curto alcance com base em triangulação também são scanners a laser terrestres, mas, devido à escala de trabalho limitada apenas a poucos metros, estes não serão objeto de estudo neste trabalho.

Time-of-Flight. Maiores informações a respeito dos diferentes métodos e princípios de medição podem ser obtidas em contribuições de outros autores, como exemplo (GONÇALES, 2007) em dissertação de mestrado junto ao Departamento de Engenharia de Transportes e (WUTKE, 2006).

2.1.3.1. Medição por tempo de percurso direto (time-of-flight direto)

Os métodos de medição por tempo de percurso são baseados na medição do tempo necessário para que um pulso eletromagnético seja transmitido pelo laser scanner, viaje até o objeto e retorne ao sistema. A distância s a ser medida será obtida pela seguinte equação (RÜEGGER, 1996):

$$s = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2.1.3.1)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo e Δt é o tempo de ida e volta do pulso eletromagnético. A acurácia na determinação do tempo deve ser muito alta devida à velocidade da luz no vácuo. Se a distância necessita ser obtida com uma acurácia de 1 mm, o tempo deverá ser medido com a seguinte precisão:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \Delta s}{c} = \frac{2 \cdot 0,001}{299.792.458} = 6,67128 \cdot 10^{-12} \text{s} = 6,67 \text{ ps} \quad (2.1.3.2)$$

Segundo Tommaselli (2004), instrumentos que utilizam o princípio Time-of-Flight permitem medir, além das distâncias ρ , a intensidade de energia refletida pelo objeto e os parâmetros de atitude do feixe (azimute θ e elevação α), com os quais se obtém as coordenadas cartesianas tridimensionais de pontos medidos em relação ao referencial do TLS. As diferentes observações obtidas no processo de varredura estão representadas na Figura 2.1.8.

Figura 2.1.8 – Observações obtidas por um TLS para o cálculo das coordenadas tridimensionais.

FONTE: AUTOR

Segundo Amann et al. (2001), um dispositivo de medição de distância que utiliza o método TOF emite pulsos com uma duração de 5 a 50 ns e normalmente é constituído por:

- ✓ Um transmissor (laser em estado sólido ou diodo laser semiconductor);
- ✓ Um canal Receptor (detector, amplificador e um Controle Automático de Ganho – AGC);
- ✓ Medidor eletrônico de tempo (discriminador de tempo e uma unidade de medição de tempo);
- ✓ Transmissor e receptor óptico.

A figura 2.1.9 ilustra os diferentes dispositivos.

Figura 2.1.9 – Princípio de medição do método por Tempo de Percurso Direto (Direct Time-of-Flight).

FONTE: Adaptado de (AMANN et al., 2001).

Assim o emissor laser transmite um pulso laser curto, que é dividido em duas partes, sendo uma delas enviada para o detector que inicia a unidade de medição de tempo e a outra parte é enviada para o objeto. Ao atingir a superfície do objeto alvo, o laser é refletido e parte dele retorna ao detector, no qual é convertido em corrente elétrica.

2.1.3.2. **FMCW – onda contínua de frequência modulada**

O método FMCW (**F**requency-**M**odulated **C**ontinuous **W**ave) foi inicialmente desenhado para ser utilizado em radares. Segundo Hancock (1999), trata-se de um método baseado na modulação da amplitude de um sinal emitido através da variação da frequência. O sinal emitido é modulado por uma onda senoidal com uma frequência variável que se “mistura” com a frequência refletida. A frequência mista passa por um filtro passa-baixa, e assim, a distância é obtida através da medição da frequência de batimento resultante. Embora esquemas de outras modulações de frequência sejam possíveis, a frequência de ressonância geralmente segue uma forma de onda triangular periódica com um período de T_r . Com a frequência de modulação triangular, a distância ao alvo é proporcional à (máximo) frequência de

batimento B , isto é, a diferença absoluta Δf em frequência entre o sinal de retorno e o sinal emitido. Assim, obtém-se a distância s ao alvo, a partir da seguinte equação:

$$s = \frac{c \cdot \Delta t}{2} = \frac{c}{2} \cdot \frac{B \cdot T_r}{2 \cdot \Delta f} \quad (2.1.3.3)$$

Observando a Figura 2.1.10, $f_e(t)$ é a frequência emitida e $f_r(t)$ é a frequência recebida, B é o pico de uma frequência de batimento em uma medição, Δt é o atraso do sinal refletido e T_r é o período da frequência de ressonância.

Figura 2.1.10 – Formas de ondas de ressonância típicas e frequências de batimento para um laser FMCW.

FONTE: Adaptado de (HANCOCK, 1999).

A frequência transmitida situa-se entre dois valores conhecidos, f_1 e f_2 , onde a distância máxima será obtida pela diferença entre os valores transmitido e recebido em determinado instante.

Há uma série de fatores que influenciam na escolha dos parâmetros para um sistema laser FMCW. Observando-se a Figura 2.1.10, nota-se que a frequência de batimento B pode ser medida apenas durante uma parte do tempo, uma vez que B permanece constante por esse período; nos outros tempos, é variável. O tempo de duração D_t quando ela não pode ser medida é chamado de tempo morto. A fração de tempo morto é dada por $\frac{2 \cdot D_t}{T_r}$, e a distância teórica máxima mensurável para o ponto B será obtida apenas em um único instante, que corresponde ao ponto de mínimo apresentado para a frequência de batimento B . Para minimizar o ruído é importante utilizar um período T_r relativamente grande para manter o tempo morto o

menor possível, e aumentar o tempo de amostragem disponível para medir a frequência de batimento. No entanto, um período T_r mais curto irá aumentar a taxa de dados do sensor (HANCOCK, 1999). Na prática, o alcance máximo do sistema de laser é regido pelos níveis de potência do sensor e de ruído.

O método FMCW não é amplamente utilizado em TLS e está mais relacionado com sistemas de radar e, com algumas alterações, em sistemas LIDAR, ou seja, em aplicações de longo alcance.

2.1.3.3. *AMCW – onda contínua de amplitude modulada*

Lasers Scanners Terrestres que se utilizam do método AMCW (**A**mplitud-**M**odulated **C**ontinuous **W**ave) operam através da modulação da energia eletromagnética emitida a partir de uma onda senoidal em uma dada frequência. Assim, a distância obtida será proporcional à diferença de fase $\Delta\phi$.

Segundo Schwendener (1972), a grande maioria dos MED's que adotam o princípio da diferença de fase, utiliza a seguinte expressão para o cálculo da distância:

$$D = \frac{N \cdot C_0}{2n_a f} + \frac{\Delta\phi}{2\pi} \cdot \frac{C_0}{2n_a f} + z_0 + k_3 \quad (2.1.3.4)$$

Onde: D = Distância medida (eletrônica);

N = Número de meio-comprimento de onda ($\lambda/2$);

C_0 = Velocidade da luz no vácuo;

n_a = Índice de refração da atmosfera;

f = Frequência de modulação;

$\Delta\phi$ = Ângulo de fase entre sinais emitido e recebido;

z_0 = Erro de zero ou constante aditiva;

k_3 = Erro cíclico do instrumento.

Percebe-se, portanto, que a medição eletrônica utiliza o método de comparação de fase ou a medida da defasagem entre a onda emitida e a onda de retorno. Assim, uma onda eletromagnética de alta frequência, denominada onda portadora, é modulada em amplitude com um sinal de comprimento de onda muito maior e emitida de maneira contínua.

Modular uma onda significa modificar sua amplitude, a frequência ou a fase de uma onda de alta frequência a partir de outra onda auxiliar de baixa frequência.

Observando a Figura 2.1.11, um sinal de frequência f é emitido a partir da estação onde se encontra o Medidor Eletrônico de Distância (MED) em um meio isotrópico.

Figura 2.1.11 – Princípio de medição de distâncias em MED's, por caminho duplo, usando o método de diferença de fase.

FONTE: Adaptado de (KENNIE et al, 1993).

Assim o sinal é refletido pelo alvo e retransmitido para o equipamento onde se gerou o sinal, que será analisado e utilizado para calcular a distância. Como as duas estações estão fixas não haverá efeito DOPPLER, sendo assim a frequência f de saída é a mesma refletida.

Observando-se a Figura 2.1.12, considerando M o número inteiro de comprimentos de onda λ (que neste exemplo será igual a 2) e $\Delta\lambda$ a parte fracional do comprimento de onda, a distância será dada pela seguinte expressão:

$$D = M \cdot \lambda + \Delta\lambda \quad (2.1.3.5)$$

Figura 2.1.12 - Aspectos gerais de determinação da distância.

FONTE: AUTOR.

Como o sinal é refletido de volta ao instrumento (TLS), a distância entre os dois vértices do alinhamento medido será dada por (SCHWENDENER, 1972):

$$2D = N \cdot \lambda + \Delta\lambda' \quad (2.1.3.6)$$

Onde:

N é o número inteiro de revoluções do vetor $\overrightarrow{OA}$ (neste caso 4, 2 na ida e 2 na volta);

$\Delta\lambda'$ é a parte fracional dada pelo ângulo de fase.

Pela Figura 2.1.5 tem-se que $\Delta\lambda' = \frac{\phi}{2\pi} \cdot \lambda$. Substituindo esta expressão na equação (2.1.3.6) tem-se:

$$2D = N \cdot \lambda + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \lambda. \quad (2.1.3.7)$$

$$D = N \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (2.1.3.8)$$

A diferença de fase $\Delta\lambda'$ pode ser obtida por meio de métodos analógicos ou digitais. A Figura 2.1.13 ilustra um esquema representativo do processo de obtenção digital da diferença de fase $\Delta\lambda'$.

Figura 2.1.13 – Esquema de um medidor digital de fase.

FONTE: (SCHOFIELD, 1993).

O comprimento de onda λ tem uma relação inversa com a frequência de modulação f , a velocidade de repetição de qualquer fenômeno periódico. Quando se lida com radiação eletromagnética no vácuo, essa velocidade é igual à velocidade da luz C_0 . Assim tem-se que:

$$\lambda = \frac{C_0}{f} \quad (2.1.3.9)$$

C_0 = Velocidade da luz no vácuo

Considerando-se o meio onde se está realizando a medição, deve-se levar em conta o índice de refração da atmosfera (n_a), logo tem-se que:

$$\lambda = \frac{C_0}{n_a f} \quad (2.1.3.10)$$

Logo a equação (2.1.3.8) será dada por:

$$D = N \cdot \frac{C_0}{2n_a f} + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{C_0}{2n_a f}. \quad (2.1.3.11)$$

Acrescentando os erros referentes ao erro de zero ou constante aditiva e ao erro cíclico do instrumento, tem-se a equação (2.1.3.4) apresentada inicialmente.

2.1.4. Sistema de medição angular

Para a determinação das coordenadas tridimensionais de um ponto é necessário que um TLS obtenha dados de medições angulares relativos a um eixo horizontal e uma direção vertical. Estes dados são obtidos de forma eletro-óptica, cujo princípio baseia-se na luz transmitida ou refletida.

Um círculo de vidro com diâmetro de 5 cm a 7 cm é codificado por um padrão de áreas opacas e transparentes disposta de forma alternada. Uma luz proveniente de uma fonte interna incide sobre o círculo onde fotodiodos convertem a energia da luz incidente, transmitindo ou refletindo por meio de um padrão de energia elétrica (pulsos ou informação de pixel). Em seguida o sinal digital é convertido para uma saída digital legível como um número decimal (SCHULZ, 2007).

Segundo Schulz (2007), a maioria dos TLS existentes no mercado utiliza-se de uma codificação binária, fornecendo resolução angular suficientemente alta para o escaneamento a laser, entretanto, pode-se utilizar codificações incrementais para obter maior resolução.

Figura 2.1.14 – Limbo horizontal de vidro, barreira eletro-óptica e esquema de saída de sinal (esquerda) e transmissor angular de Heidenhain GmbH, Alemanha

FONTE: Adaptado de (SCHULZ, 2007).

2.1.5. Unidade de deflexão do feixe laser

A unidade de deflexão consiste na utilização de um espelho de escaneamento como unidade principal, o qual permite defletir o feixe laser nas direções verticais, e em alguns modelos de TLS, nas direções horizontais. Segundo Ingensand (2006), normalmente podem ser utilizados três tipos de espelhos:

- a) planos rotativos;
- b) polígonos rotativos;
- c) espelhos oscilantes (galvanométricos).

2.2. FONTES DE ERROS EM LASER SCANNERS TERRESTRES

Assim como observado em outros métodos e técnicas de observação de distâncias e ângulos, a presença de erros nas medições realizadas a partir de um TLS é inevitável, e pode estar relacionada a diferentes fatores, os quais impactam diretamente nas coordenadas finais obtidas para a nuvem de pontos. A partir de diferentes técnicas é possível detectar e avaliar a qualidade dos dados obtidos a partir de um TLS, permitindo a checagem de seu desempenho e,

consequentemente, definindo-se para qual aplicação um determinado instrumento pode ser utilizado.

Diferentes critérios de avaliação são definidos pelos fabricantes e normalmente são disponibilizados os catálogos de cada modelo de TLS descrevendo suas principais características e especificações de desempenho, tais como, precisão linear e angular, resolução, alcance, campo de visão, entre outros. Experiências encontradas na literatura mostram que nem sempre as especificações apresentadas para um TLS correspondem à realidade. Boehler, Bordas e Marbs (2003); Cosarca, Jocea e Savu (2009); Ingensand, Ryf e Schulz (2003); Kersten, Sternberg e Mechelke (2005); Lichti et. al. (2000); Schulz e Ingensand (2004), realizaram diversos testes a partir do ano 2000, resultando em algumas publicações referentes a diferentes métodos de avaliação da qualidade e acurácia de um TLS.

Segundo Cosarca, Jocea e Savu (2009), as fontes de erros podem ser classificadas em quatro diferentes classes: erros instrumentais, erros relacionados à forma e natureza dos objetos escaneados, erros causados pelas condições ambientais do local de escaneamento e por fim, erros metodológicos. Por meio de experimentos práticos observou-se que a redução ou eliminação dos efeitos destes diferentes tipos de erros dependem de uma calibração individual de cada tipo de TLS, bem como dos cuidados que foram tomados durante a utilização do instrumento.

De acordo com a classificação citada, tem-se a seguir uma descrição sucinta de cada tipo de erro.

2.2.1. Erros instrumentais

Os erros instrumentais podem ser classificados em Erros Sistemáticos e Randômicos e devem ser identificados de forma adequada para cada tipo de TLS. Os erros randômicos ou aleatórios afetam a precisão das medidas das distâncias e ângulos, principalmente em equipamentos que se utilizam do princípio de medição por tempo de percurso direto (Time-of-Flight Direto). Por outro lado, os erros sistemáticos podem ser gerados pela não linearidade dos sistemas de medição do tempo e temperatura, os quais influenciam fortemente o processo de obtenção eletrônica de distâncias (COSARCA; JOCEA; SAVU, 2009).

2.2.1.1. Diâmetro do feixe laser

O diâmetro do feixe laser é um fator de grande importância em um TLS, uma vez que afeta diretamente a resolução da nuvem de pontos e sua acurácia posicional. A projeção do feixe laser sobre um objeto pode assumir diversas formas, sendo mais comuns as formas circulares e elípticas. Dentro da projeção do feixe, a irradiância (ou a força da radiação eletromagnética na superfície de incidência, por unidade de área) não é uniforme. Normalmente a divergência do feixe laser é definida para ser linear, conforme o ângulo de divergência θ_B . Em um TLS, o diâmetro do feixe laser é definido em função do comprimento de onda, a cintura do feixe laser e a distância medida, conforme observado na Figura 2.2.1. O diâmetro mínimo não é definido no diodo emissor (saída do feixe), mas sim ao longo de seu percurso, causando um deslocamento da cintura do feixe laser, a fim de minimizar o seu diâmetro quando este incidir sobre o objeto medido.

Figura 2.2.1 – Cintura do feixe e ângulo de divergência do feixe laser.

FONTE: Adaptado de (SCHULZ, 2007).

Segundo Weichel (1990), o cálculo do raio expandido do feixe laser (ω_ρ) em função da distância do scanner ao objeto, pode ser expresso pela seguinte expressão:

$$\omega_\rho = \omega_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot \rho}{\pi \cdot \omega_0^2} \right)^2} \quad (2.2.1.1)$$

Onde: ω_p é o raio do feixe laser definido para a distância p ;

ω_0 é o menor raio do feixe laser, também chamado de cintura do feixe.

λ é o comprimento de onda do laser em metros.

Segundo Reshetyuk (2006), a medida da divergência do feixe laser é chamada de ângulo de divergência do feixe, ou ainda um campo de visão instantâneo (IFOV), podendo ser entendido como um ângulo sólido do feixe laser. O cálculo do ângulo de divergência do feixe pode ser expresso pela equação 2.2.1.2 (Jelalian, 1992 apud Reshetyuk, 2006).

$$\gamma = \kappa_a \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (2.2.1.2)$$

onde: κ_a é uma constante determinada em função da abertura de iluminação, onde segundo Reshetyuk (2006) pode ser dada por $\kappa_a = \frac{4}{\pi}$ para abertura de iluminação Gaussiana ou $\kappa_a = 2,44$ para abertura de iluminação uniforme.

D é o diâmetro da abertura de transmissão (saída do feixe).

Segundo Baltasavias (1999) apud Reshetyuk (2006), para o cálculo do diâmetro do feixe laser (D_f) na superfície do objeto pode-se utilizar a seguinte expressão:

$$D_f = 2\rho \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cong \rho\gamma \quad (2.2.1.3)$$

onde: γ é o ângulo de divergência do feixe laser e ρ é a distância.

A aproximação é justificada uma vez que o valor de γ é muito pequeno. Normalmente as especificações relativas ao laser (transmissor óptico) são fornecidas pelos fabricantes.

A divergência do feixe laser tem um efeito direto sobre as medições angulares. A localização aparente de uma observação encontra-se ao longo do feixe laser emitido. Segundo Cosarca, Jocea e Savu (2009), a partir de experiências

práticas, observou-se que a incerteza da localização de uma observação (1 ponto na nuvem) é igual a 1/4 do diâmetro da divergência do feixe laser.

$$\sigma_{feixe} = \pm \frac{\gamma}{4} \quad (2.2.1.4)$$

2.2.1.2. Acurácia angular

O sistema de medição angular de um TLS permite obter ângulos horizontais e verticais que, associados à observação da distância, permitem o cálculo das coordenadas tridimensionais em uma nuvem de pontos. O processo de avaliação da qualidade na obtenção de dados angulares deve ser realizado a partir de métodos que não são influenciados por outros erros de um TLS. Uma vez que as observações angulares não podem ser obtidas de forma direta (considerando-se que um TLS realiza a gravação das coordenadas 3D finais para cada ponto da nuvem), estas devem ser derivadas a partir das coordenadas cartesianas tridimensionais. Como não é possível obter uma medida sobre um único alvo a partir de um TLS, um procedimento adotado por diferentes pesquisadores consiste na obtenção de uma nuvem de pontos sobre alvos específicos, tais como esferas, alvos planos circulares, etc., onde a partir destes se obtém um ponto médio. A partir das coordenadas deste ponto médio, obtêm-se os valores dos ângulos horizontais e verticais a serem analisados.

A maioria dos lasers scanners utiliza de um pequeno dispositivo de rotação (espelho ou prisma) para defletir o pulso laser em certa direção. Segundo Cosarca, Jocea e Savu (2009), a acurácia angular depende dos erros de posicionamento do dispositivo de rotação e a precisão do dispositivo de medição angular. Na prática, pode-se detectar a acurácia do dispositivo de medição angular a partir de medição de pequenos ângulos horizontais e verticais entre objetos (esferas, alvos planos circulares, etc.) que estão localizados à mesma distância em relação ao TLS, comparando-se os resultados com medições obtidas a partir de instrumentos clássicos (teodolitos e estações totais) mais precisos.

Schulz (2007) propõe a utilização de pilares de observação dispostos em uma configuração simétrica, conforme ilustra a Figura 2.2.2. Esta configuração apresenta a vantagem de cobrir um ciclo completo quando se realiza a varredura a partir do pilar central. Para que o centro de todas as esferas fique localizado em um

mesmo plano horizontal (a fim de se evitar a influência de erros sistemáticos nos eixos do TLS na obtenção dos ângulos), pode-se utilizar um nível para ajustar a altura das esferas, realizando sua correção a partir dos parafusos da base nivelante. Assim, as posições verticais podem ser ajustadas de forma a garantir uma precisão suficiente ($< 0,5 \text{ mm}$).

Figura 2.2.2 – Pilares de observação para teste em campo com a finalidade de determinação da acurácia do sistema de medição angular.

FONTE: (SCHULZ, 2007).

Um procedimento semelhante pode ser adotado para avaliação dos ângulos verticais, a partir da disposição dos alvos sobre uma mesma linha vertical, comparando-se os resultados obtidos com métodos mais precisos.

2.2.1.3. Acurácia linear

Sabe-se que a distância é uma observável fundamental para a determinação das coordenadas tridimensionais em uma nuvem de pontos. Assim a precisão e a acurácia no processo de medição eletrônica da distância em um TLS são influenciadas por um grande número de fatores que incluem diferentes tipos de

erros. Os erros no processo de medição da distância podem ser divididos em dois grupos: erros aleatórios e sistemáticos.

Os erros aleatórios determinam a precisão do processo de medição eletrônica de um TLS. Segundo Cosarca, Jocea e Savu (2009), para um TLS que utiliza o princípio de triangulação, a precisão no processo de obtenção da distância pode ser expresso pela seguinte expressão:

$$\delta_z \approx \frac{Z^2}{f \cdot D} \cdot \delta_p \quad (2.2.1.5)$$

Onde: Z é a distância da superfície escaneada.

f é a posição efetiva do ponto laser (distância focal efetiva);

D é o comprimento da linha base de triangulação;

δ_p é a resolução na posição do laser, que depende do tipo de sensor laser, do algoritmo de detecção, da razão sinal-ruído e da forma da projeção do ponto laser;

Para um TLS que utiliza o princípio de medição por tempo de percurso direto (Time-of-Flight Direto), a precisão depende do contador de intervalo de tempo, e pode ser expresso pela seguinte expressão:

$$\delta_z \approx \frac{c \cdot T_t}{2\sqrt{SNR}} \quad (2.2.1.6)$$

Onde: c é a velocidade da luz;

T_t é o tempo de percurso do pulso laser;

SNR é a razão sinal-ruído.

Por fim, um equipamento TLS que utiliza do princípio Time-of-Flight Indireto por onda contínua, onde a intensidade do pulso laser é modulada por uma função conhecida, a precisão na determinação da distância dependerá somente do comprimento da onda de modulação (λ_m) e da razão sinal-ruído, sendo representada pela seguinte expressão:

$$\delta_z \approx \frac{\lambda_m}{4\pi \cdot \sqrt{SNR}} \quad (2.2.1.7)$$

Mais detalhes sobre as influências aleatórias no processo de determinação de distância em um TLS podem ser obtidos em Reshetyuk (2006).

Quanto aos erros sistemáticos, segundo Reshetyuk (2006), a precisão na determinação da distância poderá ser afetada pelos seguintes erros:

- a) *Erros de Não Linearidade*: pode ser originado pela unidade de medição do tempo e/ou pelo sistema óptico em decorrência da inclinação exibida pelo sensor de inclinação não ser proporcional à verdadeira inclinação. O desvio entre a inclinação real e a exibida pelo sensor ocasiona um erro de linearidade do sensor.
- b) *Tempo de Percurso*: refere-se ao erro no discriminador de tempo devido a variações na amplitude e na forma do pulso laser, que também dependem da refletância da superfície do objeto a ser escaneado.
- c) *Desvio de Temperatura*: acarreta problemas na medição eletrônica do tempo, causando um erro na determinação da distância. Este erro pode ocorrer devido a fatores externos que alteram a temperatura ambiente ou a fatores internos, que provocam um aquecimento do TLS depois de certo tempo em funcionamento.
- d) *Erro de Zero ou Erro de Índice*: refere-se à discrepância entre o centro eletrônico e o centro mecânico do diodo emissor do pulso laser.
- e) *Fator de Escala*: refere-se a um erro proporcional à distância medida, ocasionados por erros na medição da temperatura, pressão e umidade que afetam a velocidade de propagação do pulso laser.

Segundo Reshetyuk (2006), para o cálculo da influência do erro de zero e do fator de escala na determinação da distância pode-se utilizar a seguinte expressão:

$$\Delta_r = k_0 + m \cdot r \quad (2.2.1.8)$$

Onde: Δ_r é o erro na medição da distância r ;

k_0 e m são os erros de zero ou de índice e o fator de escala, respectivamente.

2.2.1.4. Resolução

Segundo Boehler, Bordas e Marbs (2003), o termo resolução é usado em diferentes contextos quando se discute eficiência de um TLS. A partir do ponto onde se encontra o TLS, a resolução descreve a habilidade de detectar pequenos objetos ou características específicas de um objeto na nuvem de pontos. Do ponto de vista técnico, tem-se duas especificações que contribuem para esta habilidade: o menor incremento angular possível entre dois pontos sucessivos na nuvem de pontos e o tamanho da projeção do *laser* no objeto escaneado. A maioria dos equipamentos TLS permite que o usuário defina a resolução desejada. Vale salientar que a resolução escolhida determinará o tempo necessário para realizar uma varredura completa.

Ao configurar a resolução de um equipamento TLS, o usuário poderá optar pela resolução máxima (1:1) ou resoluções menores previamente estabelecidas pelo instrumento (1:2, 1:4; 1:5, 1:8, 1:10, etc.).

Para se avaliar a resolução de um TLS, Boehler, Bordas e Marbs (2003) propõem a utilização de uma caixa de 300 mm x 300 mm com um painel frontal disposto por ranhuras de 30 mm de largura na parte mais externa, tornando-se menores à medida que se aproximam do centro, conforme pode ser visto na Figura 2.2.3.

Figura 2.2.3 – Alvo com ranhuras de comprimentos variados para teste de resolução

FONTE: (BOEHLER, BORDAS e MARBS, 2003).

2.2.1.5. Efeito de bordas

Mesmo quando há um bom ajuste do foco, a projeção do laser no objeto terá um tamanho que dependerá da distância do objeto e do tipo de equipamento TLS. Quando o laser atinge a borda de um objeto, apenas uma parte proporcionará o retorno do sinal, sendo outra parte refletida pela superfície adjacente posicionada atrás da borda. Assim, é possível que ocorram pontos errados na vizinhança das bordas, os quais podem ser detectados a partir do uso de alvos com diferentes tipos de bordas, permitindo a aferição de variados tipos de TLS (BOEHLER, BORDAS e MARBS, 2003).

Segundo Boehler, Bordas e Marbs (2003), quando se utilizam alvos esféricos ou cilíndricos pode-se observar um efeito sistemático na nuvem de pontos destes objetos obtida a distâncias próximas. Neste contexto, em partes periféricas do objeto o centro da área da superfície refletora não coincide ao centro real, devido às distorções atribuídas ao efeito de bordas.

Para a avaliação deste efeito, Wutke (2006) propõe a utilização de placas de madeira coladas formando-se dois planos sobrepostos, os quais são escaneados em diferentes distâncias, permitindo assim a comprovação do efeito de bordas na resolução de um TLS.

2.2.1.6. Erro axial

Segundo Reshetyuk (2006), o primeiro passo no desenvolvimento de procedimentos de calibração de um TLS é a análise do modelo geométrico do scanner, uma vez que este é similar aos princípios de um teodolito, estação total ou de uma câmera fotogramétrica digital. Considerando-se um TLS para fins topográficos, em termos de princípios de operação, assemelha-se a uma estação total sem prisma. As diferenças principais referem-se a diferentes mecanismos utilizados para a deflexão e direcionamento do feixe laser (espelhos de varredura). Assim, observando-se a Figura 2.2.4, podem-se definir os seguintes eixos em um TLS (RESHETYUK, 2006):

Figura 2.2.4 – Eixos mecânicos e erros axiais de um TLS

FONTE: (RESHETYUK, 2006).

Eixo Vertical: Para um TLS panorâmico, refere-se ao eixo de rotação horizontal de um scanner, que permite uma varredura completa de 360 graus, e coincide com o plano no qual o raio laser se move na direção vertical.

Eixo de Colimação: Assumindo-se um feixe laser divergente em forma cônica, este é o eixo que passa pelo centro do espelho de varredura e pelo centro do ponto laser na superfície do objeto.

Eixo Horizontal: Refere-se ao eixo de rotação do espelho de varredura.

Em função das tolerâncias definidas pelos fabricantes, estes três eixos não estão perfeitamente alinhados, resultando nos seguintes erros:

Erro de Colimação (Δc): ângulo entre o eixo de colimação e a perpendicular ao eixo horizontal medido sobre o plano que contém a colimação e o eixo horizontal.

Erro na direção horizontal ($\Delta \theta$): ângulo entre o eixo horizontal e a perpendicular ao eixo vertical, medido no plano que contém a horizontal e o eixo vertical.

Maiores detalhes serão abordados no tópico 5.1, que trata da auto-calibração de um TLS.

2.2.2. Erros relacionados à forma e natureza dos objetos escaneados

Segundo Schulz (2007), a obtenção precisa e acurada de determinações de distâncias, não dependem apenas dos parâmetros de alcance, refletividade do objeto ou ângulo de incidência, mas também das características da superfície do material. Considerando materiais semitransparentes, o raio incidente não é apenas refletido ao atingir sua superfície, mas também avança pela primeira camada do material até que o raio atinge uma partícula. Esta partícula provoca uma reflexão do raio dentro do material, conforme ilustra a Figura 2.2.5. Assim, a distância medida é sempre mais longa do que a distância desejada à superfície do objeto.

Figura 2.2.5 – Retro espalhamento de superfície e efeitos refracionais em materiais não homogêneos semitransparentes

FONTE: (SCHULZ, 2007).

Segundo Boehler, Bordas e Marbs (2003), a força do sinal de retorno é influenciada (entre outros fatores tais como distância, condições atmosféricas, ângulo de incidência) pelas habilidades reflexivas da superfície (albedo). As superfícies brancas produzirão reflexos fortes enquanto que a reflexão é fraca a partir de superfícies pretas. Os efeitos das superfícies coloridas dependem das características espectrais do laser (verde, vermelho, infravermelho próximo). Superfícies brilhantes geralmente não são fáceis de obterem dados de distâncias corretas, ocasionando uma nuvem de pontos deslocada em relação à posição esperada.

Logo, deve-se ter atenção quando se necessita realizar a varredura de objetos brilhantes ou semitransparentes, bem como de objetos escuros, que acabam absorvendo a energia transmitida, não ocorrendo o retorno necessário para obtenção da distância. Nos experimentos que foram conduzidos sobre as peças de calibração desenvolvidas neste trabalho foi necessária a aplicação de uma fina camada de tinta *spray* branca sobre a superfície dos objetos para melhorar a refletividade e diminuir a absorção.

2.2.3. Erros causados pelas condições ambientais do local de escaneamento

Segundo Boehler, Bordas e Marbs (2003), os principais efeitos relacionados às condições ambientais referem-se à temperatura, pressão atmosférica e a interferência por radiação.

Para a utilização do instrumento, todos os fabricantes indicam em seus catálogos as faixas de temperaturas adequadas ao bom funcionamento de um scanner. Ainda que o usuário atenda às faixas previstas pelos fabricantes, observam-se desvios significativos na obtenção da distância, uma vez que as temperaturas internas dos instrumentos podem estar bem acima da temperatura ambiente. Os erros variam de forma proporcional à distância medida. Assim, é possível aplicar as correções em função da temperatura e pressão de modo a minimizar a ocorrência destes efeitos sistemáticos.

Como um TLS opera em uma faixa de frequência muito limitada, há a utilização de filtros que permitem que apenas esta frequência atinja a unidade de recepção. Quando a radiação da fonte de iluminação (luz solar ou lâmpadas) for forte em relação ao sinal emitido uma quantidade suficiente dessa radiação ambiente passará pelo filtro impedindo a medição ou influenciando na precisão obtida para a distância (BOEHLER, BORDAS e MARBS, 2003).

3. MATERIAIS

O presente capítulo descreve os principais equipamentos utilizados para execução dos experimentos propostos neste trabalho.

3.1. O LASER SCANNER FARO PHOTON 80

A Figura 3.1.1 ilustra o primeiro Laser Scanner utilizado nesta pesquisa, modelo Faro Photon 80 fabricado pela empresa americana FARO Technologies.

Figura 3.1.1 – Laser Scanner Faro Photon 80

FONTE: FARO TechSheet – Photon 80

Na Tabela 3.1.1 têm-se algumas especificações técnicas do equipamento:

Tabela 3.1.1 – Especificações técnicas do TLS Faro Photon 80

Alcance	0.6 – 80.0 m com incidência normal em superfícies com 90% de refletância;
Erro Padrão ²	± 2mm para d ≤ 25m;
Velocidade de Medição	até 120.000 pontos/s;
Campo de Visada Horizontal/Vertical	360° / 320°
Resolução Angular Horizontal/Vertical	± 0,009°
Laser	20 mW (Laser Classe 3R);
Divergência do Feixe Laser	0.16 mrad
Comprimento de Onda	785nm;
Tamanho da Projeção do Laser	3.3mm (circular).
Desvio Padrão³	
10m – dados brutos	0.8mm a 90% refl. / 1.4mm a 10% refl.;
10m – supressão de ruídos	0.4mm a 90% refl. / 0.7mm a 10% refl.;
25m – dados brutos	1.0mm a 90% refl. / 2.7mm a 10% refl.;
25m – supressão de ruídos	0.5mm a 90% refl. / 1.35mm a 10% refl.;

FONTE: FARO TechSheet – Photon 80

² O erro padrão da média de uma amostra é uma estimativa do desvio padrão da distribuição das médias de amostras com o mesmo tamanho obtidas da mesma população, e dessa forma uma medida da incerteza associada à estimativa da média na população.

³ O desvio padrão é uma medida de dispersão e o seu valor reflete a variabilidade das observações em relação à média.

3.2. O LASER SCANNER FARO FOCUS 3D X330

O segundo equipamento utilizado foi o modelo Faro Focus 3D, fabricado também pela empresa americana FARO Technologies, ilustrado pela Figura 3.2.1.

Figura 3.2.1– Laser Scanner Faro Focus 3D X330

FONTE: FARO TechSheet – Focus 3D X330

Na Tabela 3.2.1 têm-se algumas das especificações técnicas do equipamento:

Tabela 3.2.1 – Especificações técnicas do TLS Faro Focus 3D

Alcance	0.6 – 330.0 m com incidência normal em superfícies com 90% de refletância
Erro Padrão	$\pm 2\text{mm}$ para $d \leq 25\text{m}$;
Velocidade de Medição	122,000 / 244,000 / 488,000 / 976,000 pontos/s
Campo de Visada Horizontal/Vertical	360° / 300°
Resolução Angular Horizontal/Vertical	$\pm 0,009^\circ$
Laser	Laser Classe 1
Divergência do Feixe Laser	0.19 mrad
Comprimento de Onda	1550nm
Tamanho da Projeção do Laser	2.25mm (circular)
Desvio Padrão	
10m – dados brutos	0.3mm a 90% refl. / 0.4mm a 10% refl.
10m – supressão de ruídos	0.15mm a 90% refl. / 0.2mm a 10% refl.
25m – dados brutos	0.3mm a 90% refl. / 0.5mm a 10% refl.
25m – supressão de ruídos	0.15mm a 90% refl. / 0.25mm a 10% refl.

FONTE: FARO TechSheet – Focus 3D X330

3.3. O LASER SCANNER STONEX X300

O terceiro equipamento utilizado foi o modelo Stonex X300, fabricado pela empresa italiana STONEX, ilustrado pela Figura 3.3.1. Este modelo foi utilizado para avaliar melhor a metodologia de cálculo do erro de zero e fator de escala, uma vez que o equipamento Faro Photon 80 não apresentou resolução suficiente para medir todas as distâncias propostas entre os pilares da USP.

Figura 3.3.1– Laser Scanner Stonex X300

FONTE: X300 Laser Scanner Technical Features

Na Tabela 3.3.1 têm-se algumas das especificações técnicas do equipamento:

Tabela 3.3.1 – Especificações técnicas do TLS Stonex X300

Alcance	0.6 – 300 m com 100% de refletância (superfície branca)
Erro Padrão	< 6mm para $d \leq 50m$ e < 40mm até 300m
Velocidade de Medição	até 40,000 pontos/s
Campo de Visada Horizontal	360°
Campo de Visada Vertical	90° (-25° a 65°)
Laser	Classe 1M (IEC 60825-1)
Divergência do Feixe Laser	0.37 mrad
Comprimento de Onda	905nm
Resolução Angular Horizontal/Vertical	$\pm 0,0225^\circ$

FONTE: X300 Laser Scanner Technical Features

3.4. ALVOS PLANOS E ESFÉRICOS

Para a aplicação das diferentes propostas de metodologias de calibração, foram utilizados alvos planos impressos em etiqueta A4 da Pimaco que posteriormente foram colados sobre pranchetas de madeiras e fixados na sala utilizada para auto-calibração de TLS, conforme ilustra a Figura 3.4.1.

Figura 3.4.1 – Alvos planos fixados nas paredes e teto

FONTE: Foto do AUTOR.

No experimento de calibração do EDM de um TLS utilizaram-se 2 esferas de poliacetal que acompanham os equipamentos Laser Scanner Faro, com diâmetro nominal de 200 mm, conforme ilustra a Figura 3.4.2.

O poliacetal é um plástico que possui características mecânicas similares ao Nylon com a vantagem de ter um baixíssimo nível de absorção de umidade, similar ao polipropileno. As esferas de poliacetal possuem uma densidade mais elevada que os outros plásticos e ótimos níveis de usinabilidade, tornando possível a produção de esferas com baixa rugosidade e alta precisão.

Figura 3.4.2 – Alvo esférico FARO

FONTE: Foto do AUTOR.

Para os experimentos de avaliação da acurácia tridimensional, foram fabricadas 10 esferas sólidas de poliacetal com diâmetro nominal de 100 mm, visualizadas aqui na Figura 3.4.3, já colocadas nas peças construídas para aferição.

Figura 3.4.3 – Alvos esféricos sólidos de poliacetal

FONTE: Foto do AUTOR.

3.5. A ESTAÇÃO TOTAL LEICA TM30

Para a determinação das coordenadas de referência dos alvos planos posicionados na sala usada para aplicação do método de auto-calibração de TLS, utilizou-se uma estação total Leica modelo TM30, ilustrada na Figura 3.5.1.

Figura 3.5.1 – Estação Total Leica TM30

FONTE: LEICA TechSheet – TM30

Em modo Prisma, o EDM PinPoint da TM30 emite um feixe de luz laser para alvos refletores, como prismas ou fitas refletoras. A luz refletida é detectada por um receptor foto sensível e convertida em corrente elétrica. Depois de digitalizar e acumular o sinal recebido, a distância é determinada através de técnicas avançadas de medição de fase. Uma modelagem em frequência de 100 MHz é a base temporal para a medição de distância com alta precisão.

Tabela 3.5.1 – Método de medição

Tipo	Laser vermelho visível, coaxial
Onda portadora	658 nm
Sistema de medição	System analyzer baseado na medição da variação da fase ~ 100 MHz

FONTE: LEICA TechSheet – TM30

As especificações para medição de distâncias são dadas pelas Tabelas 3.5.2 a 3.5.4.

Tabela 3.5.2 – Especificações de Precisão linear e angular (desvio padrão ISO 17123-4 e 17123-3) / Tempo de medição

Precisão Linear	
Modo Preciso	0.6 mm + 1 ppm / tip. 7 s 1) ⁴
Modo Standard	1 mm + 1 ppm / tip. 2.4 s
Modo Rápido	3 mm + 1 ppm / tip. 0.8 s
Modo de Tracking	3 mm + 1 ppm / tip. < 0.15 s
Modo de Média	1 mm + 1 ppm
Resolução no écran	0.1 mm
Precisão Angular	
Horizontal, Vertical	0.5" (0.15 mgon), 1" (0.3 mgon)
Menor unidade mostrada	0.01" (0.01 mgon)
Método	absoluto, contínuo, quádruplo
Compensador	
Intervalo de trabalho:	4' (0.07 gon)
Precisão de calagem:	0.5" (0.15 mgon)
Método:	compensação quádrupla do eixo central

FONTE: LEICA TechSheet – TM30

Tabela 3.5.3 – Especificações de alcance

Refletor	Condições Atmosféricas		
	A	B	C
Prisma standard (GPR1)	1800 m (6000 pés)	3000 m (10000 pés)	3500 m (12000 pés)
3 prismas standard (GPR1)	2300 m (7500 pés)	4500 m (14700 pés)	5400 m (17700 pés)
Prisma 360° (GRZ4, GRZ122)	800 m (2600 pés)	1500 m (5000 pés)	2000 m (7000 pés)
Mini prisma 360° (GRZ101)	450 m (1500 pés)	800 m (2600 pés)	1000 m (3300 pés)
Mini prisma (GMP101)	800 m (2600 pés)	1200 m (4000 pés)	2000 m (7000 pés)
Fita reflectora (60 mm x 60 mm)	150 m (500 pés)	250 m (800 pés)	250 m (800 pés)
Distância mínima de medição	1,5 m		
Condições atmosféricas	A: Névoa densa, visibilidade de 5 km; ou sol forte, refração devido ao calor; B: Névoa ligeira, visibilidade cerca de 20 km; luz solar moderada, refração ligeira; C: Nuvens altas, sem névoa, visibilidade de 40 km; sem refração;		

FONTE: LEICA TechSheet – TM30

Tabela 3.5.4 – Especificações de precisão para fita refletora (60 mm x 60 mm)

Modos Preciso/Padrão/Média	1 mm + 1 ppm ⁵
Modo Rápido/Tracking	5 mm + 1 ppm
Resolução do ecrã	0.1 mm

FONTE: LEICA TechSheet – TM30

⁴ Condições atmosféricas tipo C, alcance até 1000 m, prisma GPH1P

⁵ Distância > 10 m, alvo alinhado com o instrumento

3.6. SOFTWARES UTILIZADOS

3.6.1. Software Faro Scene

Após a coleta dos dados (nuvem de pontos) com o TLS é necessária a importação para o software Faro Scene Versão 4.8.4.26611. O software Faro Scene apresenta todas as funções de configuração e controle do FARO Laser Scanner LS, FARO Laser Scanner Photon e FARO Laser Scanner Focus 3D e Focus 3D X 330. Permite a configuração e gerenciamento do processo de varreduras tridimensionais de alta resolução, além de ser utilizado para visualização, processamento, consolidação e registro automático ou manual das nuvens de pontos. Permite ainda a obtenção de medidas lineares diretamente sobre a nuvem de pontos e a exportação dos dados em formatos ASCII (coordenadas tridimensionais x, y e z, intensidade e valores de nível de cinza ou cores RGB). A Figura 3.6.1 ilustra uma tela do software mostrando um trecho de uma nuvem de pontos coletada para avaliação do método de auto-calibração de um TLS.

Figura 3.6.1– Tela do Software Faro Scene

FONTE: FARO SCENE Version 4.8.4.26611

3.6.2. Ambiente MatLab

Para o processamento e cálculo dos parâmetros de calibração do TLS a partir das diferentes metodologias propostas, utilizou-se o software MATLAB® R2015a Versão 8.5.0.197613. O desenvolvimento de rotinas de cálculo facilitou o ajustamento das observações utilizando o MMQ, a partir da implementação pelo método paramétrico, bem como as análises estatísticas, como médias, desvio padrão, assimetria, curtose entre outros, uma vez que a quantidade de pontos utilizados em cada nuvem de pontos impossibilitava o uso de softwares de planilhas eletrônicas como o Microsoft Office Excel. Nesse ambiente, também foram gerados os gráficos de distribuição normal.

3.6.3. DataGeosis Office

O software DataGeosis Office foi utilizado para a descarga das observações (obtidas com a estação total pelo método das direções) de distâncias e ângulos para os alvos planos utilizados no método de auto-calibração de TLS. Após a importação dos dados brutos gerou-se um arquivo de coordenadas em formato texto para posterior abertura no Microsoft Office Excel.

3.6.4. Microsoft Office Excel

O software Excel foi utilizado para manipulação dos dados da nuvem de pontos e prepará-los para abertura no software MATLAB® R2015a. Também se utilizou o Excel para cálculos da tabela de distribuição normal, cálculos das distâncias nominais entre os centros das esferas da placa 3D e cálculo das distâncias observadas entre os pilares. Foi utilizado ainda para o cálculo das coordenadas médias dos alvos planos, observados para aplicação do método de auto-calibração de TLS, além da elaboração de alguns gráficos visando uma melhor visualização dos resultados dos experimentos.

3.7. PLACA DE ESFERAS 3D

Para a implementação do método de calibração de TLS utilizando uma placa de esferas 3D, ilustrado pela Figura 3.7.1, construiu-se uma placa de aço especial com dimensões de 15,875 mm x 500 mm x 500 mm fabricadas pela empresa *Sempre Projetos e Ferramentaria Ltda. – ME*, especializada em usinagem de precisão, localizada na cidade de Campinas – SP. Nesta placa, realizou-se uma usinagem 3D de alta precisão de 9 furos para alojamento de 9 esferas maciças de poliacetal com diâmetro nominal de 100 mm.

As esferas de poliacetal são muito utilizadas em válvulas, bombas, rolamentos e diversas aplicações automotivas e foram fabricadas pela empresa *Multiesferas Comércio Importação e Exportação de Esferas Ltda.* Esta empresa possui um sistema de gestão da qualidade com capacitação de seus colaboradores e controle de conformidade dos produtos, atendendo a padrões de qualidade com certificado ISO 9001/2008.

Figura 3.7.1 – Placa de aço para alojamento das esferas de poliacetal

FONTE: Fotos do AUTOR.

3.8. SISTEMA DE PLANOS PERPENDICULARES 3D

Para a implementação do método de calibração de TLS utilizando-se um sistema de planos perpendiculares 3D, construiu-se uma peça em aço composta por

três faces planas perpendiculares entre si, sendo que cada face apresenta as dimensões de 15,875 mm x 500 mm x 500 mm. Esta peça também foi fabricada pela empresa *Sempre Projetos e Ferramentaria Ltda. – ME*.

Figura 3.8.1 – Esquema mostrando as três faces perpendiculares da peça tridimensional fabricada para a aferição de TLS.

FONTE: AUTOR.

O processo de usinagem garante uma precisão planar da ordem do centésimo de milímetro. A montagem das três faces planas foi realizada de forma a definir três planos perpendiculares, que foram utilizados para a determinação do erro tridimensional (eixos X, Y e Z) de um TLS. Mesmo se tratando de um processo de usinagem de alta precisão, que segue rígidos padrões de controle de qualidade, tornou-se conveniente efetuar a calibração da peça 3D utilizando-se um equipamento com precisão superior ao nível de precisão de um TLS, conforme será detalhado no tópico 5.3.2.1 (o TLS Faro Photon 80 apresenta precisão linear de 2 mm).

4. ABORDAGEM GERAL DE PROCEDIMENTOS DE COLETA COM TLS

Para que se obtenha uma nuvem de pontos pronta para exportação e já referenciada a um sistema de referência único, deve-se atentar para as etapas de configuração, planejamento, coleta e processamento das informações coletadas.

4.1. CONFIGURAÇÃO E PREPARO DO TLS

Antes de iniciar um processo de varredura a partir de um TLS é necessário realizar as configurações desejadas para o propósito. Alguns equipamentos TLS dispõem de uma interface gráfica que permite ao operador realizar, entre outras, as configurações de resolução, qualidade, tomada de fotos para obtenção de nuvem de pontos em cor real, janela de varredura, o que permite definir a angulação horizontal e vertical desejada. Esta última permite realizar a varredura em regiões específicas, conseguindo-se assim a diminuição do tempo de coleta. Equipamentos TLS mais antigos permitem a configuração apenas a partir de um cabo ethernet e utilizando um software específico instalado em um computador. Já os mais modernos permitem o acesso via celular, com capacidades avançadas de conexão *Wi-Fi*, permitindo a operação do scanner diretamente do navegador de um *smartphone* (*iOs*, *Android* ou *Windows Mobile*).

4.2. PLANEJAMENTO E COLETA DAS OBSERVAÇÕES

Como destaca Reshetyuk (2006), o planejamento para coleta de dados com um TLS é uma tarefa de extrema importância para a obtenção de dados confiáveis e necessários para a correta definição do objeto escaneado, porém ainda não se definiu uma normatização para esta fase.

Inicialmente deve-se avaliar a área ou objeto a ser escaneado, de modo a definir a melhor configuração de resolução e a janela de varredura horizontal e vertical necessárias. Antes de iniciar a coleta definitiva, realiza-se uma varredura global (360 graus) com a menor resolução possível a fim de avaliar a melhor posição para o TLS, bem como os parâmetros de varredura angular. A resolução deverá ser definida em função do tamanho do objeto a ser escaneado e também da distância a

que se encontra este objeto. Quanto menor for o objeto e maior for a distância, deve-se aumentar a resolução de varredura para que se tenha uma nuvem de pontos suficiente para a boa definição do objeto.

Outro fator importante refere-se à posição onde será instalado o instrumento. O operador deverá estar atento a possíveis obstruções na linha de varredura que venham a interferir o processo de coleta de um determinado objeto. Assim deve-se utilizar de múltiplas posições de instalação até que se tenha uma nuvem completa, porém deve-se atentar ao posicionamento dos alvos a serem utilizados no processo de consolidação e registro (alvos planos, esferas, planos, etc.), bem como a posição e configuração geométrica dos alvos em relação ao TLS.

Uma vez realizadas todas as configurações necessárias e observados os passos para preparo e posicionamento do TLS deve-se iniciar a varredura, sendo que o operador poderá acompanhar o processo de captura na tela do computador, no display do TLS e/ou no dispositivo móvel.

4.3. CONSOLIDAÇÃO E REGISTRO DE MÚLTIPLAS CENAS

A nuvem de pontos obtida de cada posição do TLS está referenciada a um sistema de coordenadas interno do scanner, chamado de espaço do scanner. Neste sistema as coordenadas x, y e z do centro eletro-óptico do scanner são definidas como zero, sendo, portanto, a origem para o cálculo das coordenadas de todos os pontos da nuvem tomada a partir deste ponto.

O processo de consolidação ou registro consiste na transformação das diversas nuvens de pontos (uma para cada estação) em um sistema único de coordenadas (georreferenciadas a um sistema de referência específico ou relativo a um sistema topográfico local) através de transformações matemáticas, fazendo com que se tenha ao final, uma nuvem de pontos única e precisa, com detalhes de toda a área levantada e pronta para o processo de modelagem ou até mesmo para análise de interferências.

Esse processo pode ser feito de modo automático, deixando a cargo do operador responsável, validar a nuvem de pontos consolidada e, se necessário, refinar o registro através de processos semiautomáticos. Outra opção é a utilização

de diferentes alvos previamente posicionados antes do início da varredura. As coordenadas destes alvos podem ser determinadas a partir de uma estação total de modo a estarem vinculadas a um único sistema de referência. Assim no processo de registro calcula-se a posição do scanner a partir das coordenadas destes alvos.

A posição do scanner também pode ser determinada com uma estação total ou um receptor GNSS. Há modelos de TLS no mercado que permitem acoplar um prisma ou um receptor GNSS coincidindo com o seu centro eletro-óptico. Uma vez determinadas as coordenadas do centro do scanner pode-se definir a orientação utilizando as coordenadas do centro de um alvo previamente escaneado.

4.4. EXPORTAÇÃO DOS DADOS DA NUVEM DE PONTOS

Ao final do processo de consolidação e registro, o usuário poderá exportar os dados da nuvem de pontos em formato *ascii*, (PTS, TXT, DAT, etc.) permitindo assim sua abertura em softwares específicos para modelagem 3D.

Segundo Reshetyuk (2006), o fluxo de trabalho a partir de um TLS pode ser esquematicamente representado pela Figura 4.4.1.

Figura 4.4.1 – Fluxo de trabalho utilizando-se um TLS.

FONTE: Adaptado de (RESHETYUK, 2006).

5. METODOLOGIAS PARA CALIBRAÇÃO DE TLS

5.1. AUTO-CALIBRAÇÃO DE TLS

A calibração geométrica de um TLS tem se mostrado uma ferramenta necessária para garantir a qualidade de uma nuvem de pontos 3D. A presença de erros sistemáticos inerentes ao instrumento, quando não corrigidos, degrada sobremaneira a acurácia da nuvem de pontos obtidas com um scanner.

Segundo Chow, Lichti e Teskey (2010) verifica-se que mesmo nos lasers scanners modernos há a presença de erros sistemáticos, ainda que estes tenham sido aferidos pelos fabricantes em laboratórios de calibração. Diversos pesquisadores em todo o mundo, como se indica a seguir, tem se dedicado a identificar tendências sistemáticas nos resíduos das observações de laser scanners que deterioram sobremaneira a precisão e a acurácia das medições de distâncias e ângulos.

Alguns trabalhos apresentados por Lichti (2007, 2008 e 2010) e Chow, Lichti e Teskey (2010) propõem a modelagem destes erros sistemáticos utilizando uma auto-calibração, obtida a partir da coleta de um conjunto de observações altamente redundantes sobre vários alvos fixos, posicionando o instrumento em diferentes estações. As variáveis do modelo compreendidas pela posição do scanner j , os elementos de orientação angular, os parâmetros dos alvos e os coeficientes dos erros sistemáticos são chamados de Parâmetros Adicionais (AP's), os quais são estimados a partir das observações aplicando um ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). As vantagens da utilização da auto-calibração de TLS incluem a otimização da estimativa de todas as variáveis do modelo, sem a necessidade de equipamentos especiais nem o conhecimento prévio das coordenadas dos alvos utilizados. Neste caso, utiliza-se apenas uma sala com vários alvos sinalizados, os quais serão escaneados a partir de diferentes estações.

Outras abordagens de auto-calibração de TLS são apresentadas com algumas variações. Reshetyuk (2006) propõe a utilização de um modelo matemático em que as coordenadas dos alvos no sistema externo são determinadas de forma independente a partir de uma estação total cujos valores, uma vez conhecidos,

tornam-se injunções no modelo. Nesta proposta as coordenadas da posição do scanner podem também serem determinadas a partir do uso da estação total ou serem estimadas a partir do ajustamento por MMQ. Seguindo-se as diferentes referências bibliográficas consultadas, propõe-se nesta metodologia, a utilização da auto-calibração para identificação dos parâmetros de correção sistemática adicional para a distância, o erro de colimação e para as direções horizontal e vertical.

Para a implementação do método foi utilizada uma sala na qual se realizou a fixação de 56 alvos planos e a materialização de 4 diferentes posições para instalação do TLS.

Figura 5.1.1 – Sala de auto-calibração com a distribuição dos alvos.

FONTE: Fotos do AUTOR.

Figura 5.1.2 – Croquis da sala de auto-calibração com as 4 posições para o TLS.

FONTE: AUTOR.

Este método permite o cálculo dos parâmetros adicionais de forma precisa e confiável, os quais poderão ser utilizados para melhorar a qualidade da nuvem de pontos obtida (LICHTI, 2010).

Uma primeira avaliação da qualidade dos dados da nuvem de pontos pode ser efetuada a partir do conhecimento prévio das coordenadas dos alvos. Para execução desta metodologia realizou-se a medição das coordenadas dos alvos espalhados na sala de calibração (conforme ilustra a Figura 5.1.1) utilizando-se uma estação total TM30 cujas especificações foram apresentadas na tabela 3.4.2. Assim, conhecendo-se as coordenadas dos alvos determinam-se as coordenadas da posição j do scanner e seus respectivos desvios padrões. O detalhamento do modelo matemático a ser utilizado nesta metodologia está apresentado no tópico 5.3.1.2.

5.1.1. Modelo matemático para o método de auto-calibração de TLS

Os modelos dos parâmetros adicionais podem ser classificados em dois grupos, sendo o primeiro compreendido pelo conjunto de parâmetros físicos que incluem a constante aditiva na medição da distância, erros cíclicos (amplitude e fase), o erro de índice do círculo vertical, erros no eixo de colimação e no eixo horizontal, entre outros, e o segundo grupo refere-se a parâmetros empíricos de difícil interpretação física, mas que apresentam efeitos sistemáticos significativos que podem ser mostrados mediante ensaios repetidos, que estão relacionados a defeitos geométricos na construção do equipamento (LICHTI, 2007).

Figura 5.1.3 – Eixos de um TLS e ângulos de orientação.

FONTE: (LICHTI, 2010).

A Figura 5.1.3 ilustra os três eixos de um TLS. Para um TLS panorâmico, o eixo vertical refere-se ao eixo de rotação do scanner que varia de 0 a 180°, suficiente para uma varredura de 360°, uma vez que se trata de um scanner panorâmico. Este eixo deve ser perpendicular ao eixo horizontal ou eixo de rotação do espelho de varredura. Assumindo-se que o feixe laser possui uma forma cônica, tem-se que o eixo de colimação de um scanner refere-se ao eixo que passa pelo centro do espelho de varredura e o centro do raio laser. Este eixo deve ser perpendicular ao eixo horizontal e deve encontrar o eixo vertical.

Segundo Lichti (2010), a auto-calibração permite avaliar a correlação entre o erro do eixo de colimação e o ângulo de orientação terciário, κ ; a correlação entre o erro de índice vertical, os ângulos de inclinação do scanner ω (orientação primária) e $\emptyset$ (orientação secundária) e a posição do scanner j ; e a correlação da constante aditiva na determinação da distância e a posição do scanner j .

A maior parte dos equipamentos TLS fornece a informação espacial de saída em um sistema de coordenadas cartesianas tridimensional (x_i, y_i, z_i) . Entretanto, as medições brutas são realizadas em um sistema de coordenadas esféricas (ρ, θ, α) , em que os sistemas TLS modernos operam de forma similar às estações totais, diferenciando-se devido aos mecanismos de escaneamento adicionais. Estes sistemas permitem a medição da direção horizontal, direção vertical e distância para um único ponto, sendo que a medição para vários destes pontos permite formar o que conhecemos como nuvem de pontos (CHOW, LICHTI, TESKEY, 2010).

Uma vez que os dados brutos de distância (ρ_{ij}) , ângulo horizontal (θ_{ij}) e ângulo vertical (α_{ij}) não são disponibilizados diretamente após a obtenção da nuvem de pontos, estes são calculados a partir das coordenadas do centro de cada alvo plano. A calibração geométrica de cada ponto i na posição j envolvem as seguintes equações:

$$\rho_{ij} + v_{\rho_{ij}} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho \quad (5.1.1.1)$$

$$\theta_{ij} + v_{\theta_{ij}} = \tan^{-1}\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right) + \Delta\theta + \Delta c \quad (5.1.1.2)$$

$$\alpha_{ij} + v_{\alpha_{ij}} = \tan^{-1} \left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}} \right) + \Delta\alpha \quad (5.1.1.3)$$

onde, ρ_{ij} , θ_{ij} e α_{ij} são a distância, o ângulo horizontal lido e o ângulo vertical lido respectivamente do ponto i na estação j onde se encontra o scanner;

x_{ij} , y_{ij} e z_{ij} são as coordenadas cartesianas do ponto i obtidas da estação j ;

$\Delta\rho$, $\Delta\theta$, Δc e $\Delta\alpha$ são os parâmetros de correção sistemática adicional para a distância, o ângulo horizontal, o erro angular no eixo de colimação e erro de índice na direção vertical, respectivamente;

$v_{\rho_{ij}}$, $v_{\theta_{ij}}$ e $v_{\alpha_{ij}}$ são os resíduos (erros aleatórios).

A relação de correspondência de cada ponto i obtido de diferentes estações j está matematicamente interligada a partir de uma transformação formada por três rotações e três translações no espaço tridimensional (CHOW, LICHTI, TESKEY, 2010). Os parâmetros de orientação externa (EOP) do scanner, ou os parâmetros de transformação entre o sistema de coordenadas no espaço do scanner e o sistema de coordenadas no espaço do objeto, são estimados utilizando-se estes 6 parâmetros em uma transformação de Helmert (conforme, isogonal ou de similaridade).

Segundo Lichti (2007), a transformação de corpo rígido de um ponto i no espaço do objeto para um ponto j no espaço do scanner, sobre os quais foram realizadas as observações, pode ser representada pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = R_3(\kappa_j) R_2(\phi_j) R_1(\omega_j) \cdot \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{sj} \\ Y_{sj} \\ Z_{sj} \end{bmatrix} \right\} \quad (5.1.1.4)$$

$$\text{com} \quad \begin{bmatrix} \Delta X_{sj} \\ \Delta Y_{sj} \\ \Delta Z_{sj} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{sj} \\ Y_{sj} \\ Z_{sj} \end{bmatrix} \right\} \quad (5.1.1.5)$$

onde, X_i, Y_i e Z_i são as coordenadas do ponto i no sistema de referência do objeto;

$\Delta X_{sj}, \Delta Y_{sj}$ e ΔZ_{sj} é o vetor dos parâmetros de translação de Helmert das coordenadas do scanner no sistema de referência do objeto para a estação j ;

x_{ij}, y_{ij} e z_{ij} são as coordenadas cartesianas do ponto i no sistema de referência do scanner na estação j ;

X_{sj}, Y_{sj} e Z_{sj} são as coordenadas do scanner no sistema de referência do objeto na estação j ;

ω_j, ϕ_j e κ_j são os ângulos de rotação primário, secundário e terciário que descrevem, respectivamente, a orientação do scanner j no sistema de referência do objeto.

R_1, R_2, R_3 são as matrizes de rotação sobre os eixos X, Y e Z , respectivamente.

As formas explícitas das matrizes de rotação $R_3(\kappa_j)R_2(\phi_j)R_1(\omega_j)$ são dadas por:

$$R_1(\omega_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_j & -\sin \omega_j \\ 0 & \sin \omega_j & \cos \omega_j \end{bmatrix}, \text{ para o eixo } X; \quad (5.1.1.6)$$

$$R_2(\phi_j) = \begin{bmatrix} \cos \phi_j & 0 & -\sin \phi_j \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi_j & 0 & \cos \phi_j \end{bmatrix}, \text{ para o eixo } Y; \quad (5.1.1.7)$$

$$R_3(\kappa_j) = \begin{bmatrix} \cos \kappa_j & -\sin \kappa_j & 0 \\ \sin \kappa_j & \cos \kappa_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ para o eixo } Z. \quad (5.1.1.8)$$

Multiplicando-se as matrizes $R_3(\kappa_j) \cdot R_2(\phi_j) \cdot R_1(\omega_j)$ obtém-se a forma explícita da matriz de rotações sobre os três eixos, dada por:

$$\begin{bmatrix} \cos \phi_j \cdot \cos \kappa_j & \cos \omega_j \cdot \sin \kappa_j + \sin \omega_j \cdot \sin \phi_j \cdot \cos \kappa_j & \sin \omega_j \cdot \sin \kappa_j - \cos \omega_j \cdot \sin \phi_j \cdot \cos \kappa_j \\ -\cos \phi_j \cdot \sin \kappa_j & \cos \omega_j \cdot \cos \kappa_j - \sin \omega_j \cdot \sin \phi_j \cdot \sin \kappa_j & \sin \omega_j \cdot \cos \kappa_j + \cos \omega_j \cdot \sin \phi_j \cdot \sin \kappa_j \\ \sin \phi_j & -\sin \omega_j \cdot \cos \phi_j & \cos \omega_j \cdot \cos \phi_j \end{bmatrix} \quad (5.1.1.9)$$

Logo,

$$R_3(\kappa_j) \cdot R_2(\phi_j) \cdot R_1(\omega_j) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (5.1.1.10)$$

Observando-se os termos apresentados nas equações (5.1.1.1), (5.1.1.2) e (5.1.1.3) e o modelo matemático apresentado na equação (5.1.1.4), podemos escrever as coordenadas cartesianas do ponto i no sistema de referência do scanner na estação j; dadas por:

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\rho_{ij} - \Delta\rho) \cdot \cos(\theta_{ij} - (\Delta c) - (\Delta\theta)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta\alpha) \\ (\rho_{ij} - \Delta\rho) \cdot \sin(\theta_{ij} - (\Delta c) - (\Delta\theta)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta\alpha) \\ (\rho_{ij} - \Delta\rho) \cdot \sin(\alpha_{ij} - \Delta\alpha) \end{bmatrix} \quad (5.1.1.11)$$

Observando-se a equação (5.1.1.11), os valores de (Δc) e $(\Delta\theta)$ são dados por:

$$(\Delta c) = \Delta c / \cos \alpha_{ij} \text{ e } (\Delta\theta) = \Delta\theta \cdot \tan \alpha_{ij} \quad (5.1.1.12)$$

Substituindo-se as equações (5.1.1.10) e (5.1.1.11) na equação (5.1.1.4), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} (\rho_{ij} - \Delta\rho) \cdot \cos(\theta_{ij} - (\Delta c) - (\Delta\theta)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta\alpha) \\ (\rho_{ij} - \Delta\rho) \cdot \sin(\theta_{ij} - (\Delta c) - (\Delta\theta)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta\alpha) \\ (\rho_{ij} - \Delta\rho) \cdot \sin(\alpha_{ij} - \Delta\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{sj} \\ Y_{sj} \\ Z_{sj} \end{bmatrix} \right\} \quad (5.1.1.13)$$

Utilizou-se o sinal de menos para os parâmetros de correção sistemática nas equações (5.1.1.11) e (5.1.1.13) em função de se definir convencionalmente o erro como sendo o valor observado menos o valor verdadeiro.

Para maior confiabilidade na calibração, correlações potenciais entre os parâmetros precisam ser reduzidas (por exemplo, o erro de índice do limbo vertical e

os ângulos de inclinação e rotação). Deve-se pensar em um desenho cuidadoso ao posicionar os alvos de referência, de modo a construir uma rede de pontos de controle sólida, com alta integridade e sustentação, formando-se figuras geometricamente fortes e, portanto, com maior rigidez.

O modelo apresentado na equação (5.1.1.4) foi linearizado, necessitando assim de um processo iterativo para convergência, uma vez que a auto-calibração para determinação dos parâmetros do TLS foi conduzida por meio de um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ) calculados pelo método paramétrico. O modelo linearizado é dado pela equação (5.1.1.14) modificada de (RESHETYUK, 2006).

$$D^0 = \begin{bmatrix} r_{11}^0 & r_{12}^0 & r_{13}^0 \\ r_{21}^0 & r_{22}^0 & r_{23}^0 \\ r_{31}^0 & r_{32}^0 & r_{33}^0 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{Sj} \\ Y_{Sj} \\ Z_{Sj} \end{bmatrix} \right\} + \frac{\delta D^0}{\delta \omega_j} \delta \omega_j + \frac{\delta D^0}{\delta \phi_j} \delta \phi_j + \frac{\delta D^0}{\delta \kappa_j} \delta \kappa_j + \frac{\delta D^0}{\delta \Delta \rho} \delta \Delta \rho + \frac{\delta D^0}{\delta \Delta c} \delta \Delta c + \frac{\delta D^0}{\delta \Delta \theta} \delta \Delta \theta + \frac{\delta D^0}{\delta \Delta \alpha} \delta \Delta \alpha \quad (5.1.1.14)$$

onde

$$D^0 = \begin{bmatrix} x_{ij}^0 \\ y_{ij}^0 \\ z_{ij}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \cos(\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ (\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \sin(\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ (\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \sin(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \end{bmatrix} \quad (5.1.1.15)$$

O índice 0 (zero) sobrescrito indica que valores aproximados para os parâmetros desconhecidos foram utilizados. As coordenadas para os alvos e para a posição do scanner no sistema de referência do objeto (sistema externo) foram obtidas por meio de um levantamento com a estação total Leica TM30.

Na fase de ajustamento por MMQ, valores aproximados para os parâmetros (ω_j) e (ϕ_j) podem ser definidos como sendo zero, desde que o TLS esteja nivelado durante o processo de digitalização (varredura). Para a definição do valor aproximado para o parâmetro (κ_j) , que se refere ao azimuth ou orientação desconhecida, calculou-se a diferença de azimuth (obtidos a partir das coordenadas no sistema de referência do objeto e no sistema de referência do scanner na estação j) para o alinhamento entre dois alvos. No experimento prático utilizou-se o alvo denominado A001 como referência e em seguida determinou-se os azimuths deste para os demais alvos. O procedimento foi realizado para os alvos da nuvem

de pontos e também para as medições com a estação. A diferença entre eles permitiu calcular 55 azimutes muito próximos, com os quais se extraiu a média para utilizar como rotação aproximada.

A forma explícita das derivadas mostradas na equação (5.1.1.14) é apresentada abaixo:

$$\frac{\delta D^0}{\delta \omega_j} = \begin{bmatrix} 0 & -(r_{13}^0) & r_{12}^0 \\ 0 & -(r_{23}^0) & r_{22}^0 \\ 0 & -(r_{33}^0) & r_{32}^0 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{Sj} \\ Y_{Sj} \\ Z_{Sj} \end{bmatrix} \right\} \quad (5.1.1.16)$$

$$\frac{\delta D^0}{\delta \phi_j} = \begin{bmatrix} -\sin \phi_j^0 \cdot \cos \kappa_j^0 & -(r_{32}^0) \cdot \cos \kappa_j^0 & -(r_{33}^0) \cdot \cos \kappa_j^0 \\ \sin \phi_j^0 \cdot \sin \kappa_j^0 & r_{32}^0 \cdot \sin \kappa_j^0 & r_{33}^0 \cdot \sin \kappa_j^0 \\ \cos \phi_j^0 & \sin \omega_j^0 \cdot \sin \phi_j^0 & -\cos \omega_j^0 \cdot \sin \phi_j^0 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{Sj} \\ Y_{Sj} \\ Z_{Sj} \end{bmatrix} \right\} \quad (5.1.1.17)$$

$$\frac{\delta D^0}{\delta \kappa_j} = \begin{bmatrix} r_{21}^0 & r_{22}^0 & r_{23}^0 \\ -(r_{11}^0) & -(r_{12}^0) & -(r_{13}^0) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{Sj} \\ Y_{Sj} \\ Z_{Sj} \end{bmatrix} \right\} \quad (5.1.1.18)$$

$$\frac{\delta D^0}{\delta \Delta \rho} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ -\sin(\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ -\sin(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \end{bmatrix} \quad (5.1.1.19)$$

$$\frac{\delta D^0}{\delta \Delta c} = \frac{1}{\cos \alpha_{ij}} \cdot \begin{bmatrix} (\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \sin(\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ -(\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \cos(\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.1.1.20)$$

$$\frac{\delta D^0}{\delta \Delta \theta} = \tan \alpha_{ij} \cdot \begin{bmatrix} (\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \sin(\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ -(\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \cos(\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.1.1.21)$$

$$\frac{\delta D^0}{\delta \Delta \alpha} = \begin{bmatrix} (\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \cos(\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)) \cdot \sin(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ (\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \sin(\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)) \cdot \sin(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ -(\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \end{bmatrix} \quad (5.1.1.22)$$

5.1.2. Modelo estocástico

Segundo Reshetyuk (2006), a matriz variância-covariância das observações, quando a posição do centro do scanner no sistema de referência externo é desconhecida, pode ser calculada a partir da equação 5.1.2.1.

$$MVC_{obs} = C_{XYZ} + R(\omega_j, \phi_j, \kappa_j) J C_{inst} J^T R(\omega_j, \phi_j, \kappa_j)^T \quad (5.1.2.1)$$

onde, $R(\omega_j, \phi_j, \kappa_j)$ é a matriz de rotações sobre os três eixos descrita na equação (5.1.1.9);

J é a matriz jacobiana das derivadas de $[x_{ij} \ y_{ij} \ z_{ij}]^T$ em relação às observações ρ_{ij} , θ_{ij} e α_{ij} ;

C_{XYZ} é a matriz variância-covariância (diagonal) das coordenadas dos alvos no sistema externo;

C_{inst} é a matriz variância-covariância (diagonal) dos erros relativos ao TLS, fornecidos pelo fabricante.

A matriz C_{inst} é calculada conforme a equação (5.1.2.2) abaixo:

$$C_{inst} = \text{diag}(\sigma_\rho^2, \quad \sigma_\theta^2 + \sigma_{laser}^2, \quad \sigma_\alpha^2 + \sigma_{laser}^2) \quad (5.1.2.2)$$

onde, σ_ρ , σ_θ e σ_α são as acurácias na medição da distância, e das direções horizontais e verticais, respectivamente, fornecidas pelos fabricantes;

σ_{laser} é a incerteza no diâmetro do laser calculada a partir da equação 2.2.1.3, onde o valor da divergência do feixe laser γ é fornecido pelo fabricante.

Para o cálculo da matriz C_{XYZ} , que é composta pelas variâncias das coordenadas dos alvos no sistema externo, utilizou-se o modelo de propagação dos erros da distância inclinada, direção horizontal e ângulo de elevação, medidos com a estação total Leica TM30. As precisões das medidas realizadas com a estação total foram apresentadas na tabela 3.4.2. Sabendo da existência de um erro de centragem devido à acurácia do prumo laser da estação e também devido à

acurácia na determinação da altura do instrumento utilizando uma trena, assumiu-se um erro de 1 mm para as coordenadas nos três eixos onde a estação total foi posicionada.

A matriz jacobiana J apresentada na equação 5.1.2.1 é obtida a partir da equação (5.1.2.3) a seguir:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_j}{\partial \rho_{ij}} & \frac{\partial x_j}{\partial \theta_{ij}} & \frac{\partial x_j}{\partial \alpha_{ij}} \\ \frac{\partial y_j}{\partial \rho_{ij}} & \frac{\partial y_j}{\partial \theta_{ij}} & \frac{\partial y_j}{\partial \alpha_{ij}} \\ \frac{\partial z_j}{\partial \rho_{ij}} & \frac{\partial z_j}{\partial \theta_{ij}} & \frac{\partial z_j}{\partial \alpha_{ij}} \end{bmatrix} \quad (5.1.2.3)$$

onde

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x_j}{\partial \rho_{ij}} \\ \frac{\partial y_j}{\partial \rho_{ij}} \\ \frac{\partial z_j}{\partial \rho_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos[\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)] \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ \sin[\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)] \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ \sin(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \end{bmatrix} \quad (5.1.2.4)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x_j}{\partial \theta_{ij}} \\ \frac{\partial y_j}{\partial \theta_{ij}} \\ \frac{\partial z_j}{\partial \theta_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \sin[\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)] \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ (\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \cos[\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)] \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.1.2.5)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x_j}{\partial \alpha_{ij}} \\ \frac{\partial y_j}{\partial \alpha_{ij}} \\ \frac{\partial z_j}{\partial \alpha_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \left\{ \sin[\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)] \cdot \left(\frac{\Delta c^0 \cdot \sin \alpha_{ij} - \Delta \theta^0}{\cos^2 \alpha_{ij}} \right) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) - \cos[\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)] \cdot \sin(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \right\} \\ (\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \left\{ -\cos[\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)] \cdot \left(\frac{\Delta c^0 \cdot \sin \alpha_{ij} - \Delta \theta^0}{\cos^2 \alpha_{ij}} \right) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) - \sin[\theta_{ij} - (\Delta c^0) - (\Delta \theta^0)] \cdot \sin(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \right\} \\ (\rho_{ij} - \Delta \rho^0) \cdot \cos(\alpha_{ij} - \Delta \alpha^0) \end{bmatrix} \quad (5.1.2.6)$$

O fator de variância *a priori* σ_0^2 utilizado foi igual a 1. Para o cálculo da matriz dos pesos P utilizou-se o inverso das variâncias calculadas na matriz MVC_{obs} .

$$P = \sigma_0^2 \cdot [MVC_{obs}]^{-1} \quad (5.1.2.7)$$

Para a detecção da presença de erros grosseiros nas observações utilizou-se um método de estimação robusto chamado Danish method (método

Dinamarquês) que é caracterizado por uma melhor detecção de erros grosseiros e rápida convergência (JORGENSEN et al., 1985; KUBIK et al., 1985, apud RESHETYUK, 2006).

Após o ajustamento por mínimos quadrados e a determinação dos parâmetros de calibração desejados, inicialmente aplica-se o teste global do qui-quadrado sobre o fator de variância a *posteriori* $\hat{\sigma}_0^2$, utilizando-se um nível α de confiança de 95%. Em seguida calculam-se novos pesos na matriz P_j a partir da equação 5.1.2.8 abaixo:

$$P_j = \begin{cases} 1 & \text{se } |v_j| < K \cdot \sigma_{v_j} \\ \exp\left(-\frac{v_j^2}{K \cdot \sigma_{v_j}^2}\right) & \text{se } |v_j| \geq K \cdot \sigma_{v_j} \end{cases} \quad (5.1.2.8)$$

onde, v_j e σ_{v_j} são os resíduos da j-ésima observação e seu desvio padrão, respectivamente, obtidos após o ajustamento pelo MMQ;

Segundo Reshetyuk (2006), a constante K foi definida com o valor 3, seguindo critérios práticos de identificação de *outliers*. Após o cálculo da matriz P_j , se os valores obtidos formam uma matriz identidade, há a indicação de que nenhum *outlier* foi detectado. Assim se, após o teste estatístico, a variância a *posteriori* $\hat{\sigma}_0^2$ for estatisticamente diferente de 1, (falha no teste do qui-quadrado), calcula-se uma nova matriz de pesos P a partir da equação 5.1.2.9 abaixo:

$$\tilde{P} = \frac{1}{\hat{\sigma}_0^2} \cdot [MVC_{obs}]^{-1} \quad (5.1.2.9)$$

Assim, um novo ajustamento é realizado com a nova matriz de pesos. Após o cálculo da matriz P_j com a equação 5.1.2.8, as observações cujos pesos forem diferentes de 1 permitem identificar os alvos que devem ser excluídos do novo ajustamento, eliminando assim sua influência sobre os resultados estimados para os parâmetros de calibração. A solução final é obtida iterativamente até que nenhum *outlier* seja detectado.

5.1.3. Estimativa de precisão e acurácia das coordenadas

Segundo Reshetyuk (2006), após a auto-calibração é possível estimar a precisão e a acurácia das coordenadas dos alvos obtidas com o TLS. A precisão na determinação dos parâmetros de Helmert e os resíduos da auto-calibração são bons indicadores da precisão de um TLS. Em função dos resíduos das observações em cada eixo calculam-se os resíduos 3D (v_{3D}) a partir da equação 5.1.3.1 abaixo:

$$v_{3D} = \sqrt{v_X^2 + v_Y^2 + v_Z^2} \quad (5.1.3.1)$$

onde, v_X , v_Y e v_Z são os resíduos das coordenadas ao longo dos respectivos eixos;

Os valores calculados para v_{3D} permitem uma boa avaliação da precisão 3D (total) das coordenadas dos alvos obtidas com o TLS.

Ainda segundo Reshetyuk (2006), para avaliar a acurácia pode-se obter, após a auto-calibração, as distâncias entre cada par de alvos utilizando as coordenadas ajustadas (observações ajustadas) obtidas com o scanner comparando-as com as mesmas distâncias obtidas a partir das coordenadas “de referência” obtidas com a estação total. Assim, a acurácia pode ser determinada a partir da equação 5.1.3.2 abaixo:

$$\sigma_{alvo\ j} = \sqrt{\frac{(d_{TLS\ jk} - d_{TM30\ jk})^2}{2}} \quad (5.1.3.2)$$

onde, $\sigma_{alvo\ j}$ é o erro nas coordenadas do j-ésimo alvo;

$d_{TLS\ jk}$ e $d_{TM30\ jk}$ são as distâncias da linha de base entre um alvo j para um alvo k .

5.2. CALIBRAÇÃO DO DISTANCIÔMETRO DE UM TLS EM LINHA BASE DE CALIBRAÇÃO EDM

A determinação do erro de zero ou constante aditiva em um TLS é normalmente realizada por meio de uma linha base de calibração, de forma similar ao método empregado para determinação em estações totais. Utilizando este método é possível estimar a constante aditiva (erro de zero ou erro de índice), o erro de escala e o erro cíclico.

5.2.1. Constante aditiva ou erro de índice

Todas as distâncias medidas por um EDM estão sujeitas a um erro constante. A ocorrência deste erro é devida, principalmente, a três fatores:

- ✓ atrasos elétricos, desvios geométricos e excentricidades no EDM;
- ✓ diferenças entre o centro eletrônico e o centro mecânico do EDM;
- ✓ diferenças entre os centros ópticos e mecânicos do alvo refletor.

Segundo Gripp (1986), o erro de zero ou constante aditiva é a distância entre o centro eletrônico e o centro geométrico do aparelho. Nos instrumentos modernos de medição eletrônica de distâncias, tem-se procurado anular este erro, entretanto sempre é necessária uma aferição periódica devido ao uso constante e envelhecimento do instrumento. Em aparelhos em que este valor deve ser considerado, normalmente o fabricante fornece o valor admissível para este erro.

Um procedimento simples e que permite determinar de maneira aproximada o erro de índice z_0 consiste em determinar distâncias entre três pontos segundo o esquema representado na Figura 5.2.1 a seguir:

Figura 5.2.1 – Prática para determinação do erro de zero ou constante aditiva.

FONTE: (GRIPP, 1986).

Medindo-se as distâncias dos alinhamentos $\overline{AB}$, $\overline{BC}$ e $\overline{AC}$ pode-se calcular de forma aproximada o valor do erro de índice z_0 seguindo a seguinte formulação:

$$d_1 = d'_1 + z_0 \quad (5.2.1.1)$$

$$d_2 = d'_2 + z_0 \quad (5.2.1.2)$$

$$d_3 = d'_3 + z_0 \quad (5.2.1.3)$$

Como $d_1 = d_2 + d_3$, têm-se que:

$$z_0 = d'_1 - (d'_2 + d'_3) \quad (5.2.1.4)$$

Onde d'_1 , d'_2 e d'_3 são as distâncias medidas e d_1 , d_2 e d_3 são as distâncias verdadeiras.

5.2.2. Erro de escala

Segundo Gripp (1986), o erro de escala surge em função de influências de erros provenientes do valor considerado para a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo, na frequência de modulação e no índice de refração do ar. Para determiná-lo devem-se obter medidas de distâncias em linhas de base cujos comprimentos foram previamente determinados por meio de um instrumento mais preciso e que esteja devidamente calibrado.

5.2.3. Erro cíclico

O erro cíclico é causado pela não linearidade na modulação de amplitude da onda portadora utilizada na medida da diferença de fase. Sua ocorrência refere-se às falhas na determinação da diferença de fase, caracterizando-se por um erro periódico em função da metade do comprimento de onda de modulação do equipamento (GRIPP, 1986). Sua ocorrência é normalmente observada em equipamentos que utilizam o método de diferença de fase para determinar o tempo de deslocamento entre o envio, reflexão e retorno do sinal na medida da distância.

Como o erro cíclico se repete a cada meio comprimento de onda de modulação contido dentro de uma distância medida, o seu sinal e magnitude variam em função do comprimento medido. A magnitude do erro pode ser da ordem de 5 a 10 mm, no entanto, nos medidores eletrônicos de distâncias fabricados a partir de 1990, geralmente é inferior a 2 milímetros (ACT, 2014).

Segundo Gripp (1986), os fabricantes procuram minimizar ao máximo o erro cíclico, de forma a apresentar pequenas amplitudes, podendo assim ser ignorado, entretanto, com o constante uso e envelhecimento do instrumento, erros cíclicos consideráveis podem ocorrer, sendo necessária assim, sua inclusão no processo de calibração. O erro cíclico pode ser expresso por uma das seguintes expressões:

Figura 5.2.2 – Fase B relativa à equação 5.2.3.1.

FONTE: (GRIPP, 1986).

Figura 5.2.3 – Fase B relativa à equação 5.2.3.2

FONTE: (GRIPP, 1986).

Onde: ε_i = erro cíclico da distância L_i ;

A = amplitude do erro cíclico;

B = comprimento que corresponde a um ângulo de fase que pode ser obtido por: $\phi = \frac{2\pi B}{\lambda}$

L_i = comprimento correspondente à diferença de fase obtida eletronicamente;

λ = comprimento em que a curva completa um ciclo e corresponde à metade do comprimento da onda de modulação fina do aparelho.

Para a grande maioria dos instrumentos EDM o comprimento da onda de modulação fina do aparelho é de 20 m, sendo, portanto adotado o valor de 10 m para λ .

Os procedimentos de cálculos e ajustamentos para determinação dos parâmetros de calibração incluindo a escala, a constante aditiva e o erro cíclico podem ser obtidos por diferentes metodologias. Observam-se recomendações de alguns autores para que os elementos do erro cíclico sejam determinados de forma

independente dos erros de escala e constante aditiva. Desse modo, os erros de escala e constante aditiva são determinados em um primeiro ajustamento, e o erro cíclico em seguida, ou vice-versa. Entretanto, em processos de calibração modernos, como apresentado no método de auto-calibração de TLS, o modelo matemático dos parâmetros adicionais permitem a determinação conjunta de todos os elementos de calibração, totalizando-se 9 coeficientes.

Para a determinação da amplitude A e a fase inicial do harmônico do erro cíclico B , pode-se aplicar um método que fornece boas estimativas, e que consiste na utilização de uma linha base de calibração composta por multi-pilares.

No processo de construção dos pilares, o projeto de distribuição e espaçamento entre eles permite cancelar o erro cíclico. Isto ocorre quando pares de medições são tomadas em pilares separados por múltiplos da unidade de medida do EDM. Entretanto o tipo mais difundido no Brasil é a implantação de pilares cujas distâncias entre eles não são necessariamente múltiplas de 10 ou 20 m. As principais bases existentes no Brasil estão localizadas na Escola Politécnica da USP em São Paulo, na UFPE em Recife, e na UFPR, na Fazenda Ganguiri, com 8; 6 e 7 pilares respectivamente.

Recomendações detalhadas no processo de implantação e construção de uma linha base de calibração EDM podem ser obtidas em (GRIPP, 1986).

Uma vez que as distâncias entre os pilares são conhecidas, uma equação de observação geral em que estão incorporados os diferentes erros sistemáticos presentes em um EDM, pode ser expressa por (GRIPP, 1986):

$$Lb_i + v_i = m \cdot (\sum l_j)_i + z_0 + A \cdot \sin \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [(\sum l_j)_i + B] \right\} \quad (5.2.3.3)$$

Onde: z_0 = constante aditiva (erro de zero ou de índice);

m = fator de escala;

A = amplitude do erro cíclico;

B = comprimento correspondente à fase inicial do harmônico do erro cíclico;

$l_j (j = 1, 2, \dots, k) =$ distâncias conhecidas entre os pilares;

$Lb_i =$ i -ésima distância observada;

$v_i =$ resíduo da i -ésima observação;

$\lambda =$ metade do comprimento da onda de modulação;

$k =$ número de seções.

Devido à alta correlação existente entre a constante aditiva e a fase do erro cíclico necessita-se simplificar o modelo matemático da equação (5.2.3.3) visando a determinação do erro de escala e de índice de forma independente do erro cíclico. Desse modo, utiliza-se inicialmente a seguinte equação:

$$Lb_i + v_i = m \cdot \left(\sum l_j \right)_i + z_0 \quad (5.2.3.5)$$

Assim os resíduos resultantes do ajustamento por MMQ representarão não apenas os erros aleatórios, mas também os erros cíclicos, os quais serão determinados em um segundo ajustamento por MMQ, utilizando-se o seguinte modelo matemático:

$$\epsilon_i = V_i = A \cdot \sin \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left[\left(\sum l_j \right)_i + B \right] \right\} \quad (5.2.3.6)$$

Uma função $f(t)$, periódica, de período T pode ser desenvolvida em uma série trigonométrica denominada série de FOURIER:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots + b_n \sin n\omega t \quad (5.2.3.7)$$

Segundo Gripp (1986), a equação (5.2.3.6) é uma função periódica, de período $T = 2\pi$, logo $\omega = 1$. Considerando A e B como constantes desconhecidas, o erro cíclico (ϵ_i) será função de $\left(\sum l_j \right)_i$, e a equação (5.2.3.6) desenvolvida em série de Fourier, ficará:

$$\epsilon_i = f \left(\left(\sum l_j \right)_i \right) = \frac{1}{2}a_0 + a_1 \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(\sum l_j \right)_i \right] + a_2 \cos 2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(\sum l_j \right)_i \right] + \dots + b_1 \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(\sum l_j \right)_i \right] + b_2 \sin 2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(\sum l_j \right)_i \right] + \dots \quad (5.2.3.8)$$

Como $a_0 = \frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt$, aplicando-se a função (5.2.3.6) nesta, tem-se que $a_0 = 0$.

Fazendo $\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (\sum l_j)_i$ obtém-se:

$$\epsilon_i = f(\theta_i) = a_1 \cos \theta_i + a_2 \cos 2\theta_i + a_3 \cos 3\theta_i + \dots b_1 \sin \theta_i + b_2 \sin 2\theta_i + b_3 \sin 3\theta_i + \dots \quad (5.2.3.9)$$

Utilizando-se apenas os três primeiros termos da equação (5.2.3.9) aplica-se um ajustamento por MMQ para determinação dos coeficientes a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 e b_3 . Após o cálculo dos coeficientes, obtêm-se os valores das amplitudes A_n ($n = 1$ a 3) de cada componente harmônico e os ângulos de fase ϕ pelas seguintes equações:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (5.2.3.10)$$

$$\phi_n = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \quad (5.2.3.11)$$

Na bibliografia pesquisada, afirma-se que é suficiente considerar os 3 primeiros harmônicos e adotar o dominante. Outro processo sugerido é adotar o harmônico cuja amplitude for o triplo (ou mais) dos outros, e se não houver esta diferença significativa, então provavelmente não há a ocorrência de erros cíclicos. Neste contexto optou-se pela primeira abordagem.

Para a implementação deste experimento foram utilizados os pilares **P0**, **P1A**, **P1**, **P2A** e **P2** pertencentes à linha base de calibração da EPUSP. A escolha destes pilares levou em consideração o alcance máximo do Laser Scanner utilizado (Faro Photon 80) que é de 76,8 metros. Os procedimentos de campo permitiram realizar uma sequencia de 10 medições visando à obtenção de 10 observações de distâncias, conforme esquema apresentado na Figura 5.2.4.

Figura 5.2.4 – Sequência de medições obtidas ao longo dos pilares da EPUSP.

As distâncias padrão conhecidas entre os pilares foram medidas por NETTO (1997), onde as observações foram obtidas utilizando-se um medidor eletrônico de distância DI-2002 com posterior ajustamento por MMQ. Na tabela 5.2.1 têm-se as distâncias de referência obtidas.

Tabela 5.2.1 – Distâncias Padrões entre os Pilares da USP

Pilares		Distância Padrão (DI-2002)
P0	P1A	4,9670
P0	P1	19,6189
P0	P2A	29,8084
P0	P2	68,1662
P1A	P1	14,6519
P1A	P2A	24,8414
P1A	P2	63,1992
P1	P2A	10,1895
P1	P2	48,5473
P2A	P2	38,3578

FONTE: (NETTO, 1997)

Figura 5.2.5 – Fotos mostrando a instalação do TLS e esferas sobre os pilares.

FONTE: Fotos do AUTOR.

O processo de obtenção dos dados consistiu nos seguintes passos:

1. Instalação do TLS sobre o pilar P0 e posicionamento dos alvos esféricos de referência (detalhes definidos no item 3.1) sobre os demais pilares (P1A, P1, P2A e P2);
2. Instalação do TLS sobre o pilar P1A e posicionamento dos alvos esféricos de referência sobre os demais pilares a vante (P1, P2A e P2);
3. Instalação do TLS sobre o pilar P1 e posicionamento dos alvos esféricos de referência sobre os demais pilares a vante (P2A e P2);
4. Instalação do TLS sobre o pilar P2A e posicionamento do alvo esférico de referência sobre o pilar P2.

Para cada distância entre pilares foram realizadas duas séries de varreduras laser (visando obter redundância de observações), utilizando-se uma configuração de resolução máxima (1:1) com qualidade de redundância de 4 leituras. A qualidade refere-se ao número de medições de distância realizadas pelo TLS para cada ponto da nuvem. Na Figura 5.2.6 tem-se um exemplo de nuvem de pontos obtida a partir do pilar P0 com varredura sobre o pilar 1A.

Figura 5.2.6 – Nuvem de pontos em vista frontal e 3D.

FONTE: FARO SCENE Version 4.8.4.26611

Durante os trabalhos de campo as temperaturas (seca e úmida) e a pressão atmosférica foram obtidas nas extremidades da linha medida utilizando-se um psicrômetro. Estes dados foram utilizados para efetuar a correção dos erros sistemáticos referentes à correção meteorológica.

Assim, a distância inclinada (D_m) corrigida dos efeitos meteorológicos (C_m) será dada por (GRIPP, 1986):

$$D_m = D_i \cdot C_m \quad (5.2.3.12)$$

A correção meteorológica C_m é dada pela seguinte equação:

$$C_m = \frac{n_0}{n} \quad (5.2.3.13)$$

Onde: n_0 = Índice de refração para a atmosfera padrão;

n = Índice de refração no local da determinação.

Para o cálculo de n_0 utiliza-se a seguinte expressão (GRIPP, 1986):

$$(n_0 - 1) * 10^6 = 287,604 + \frac{4,8864}{\lambda^2} + \frac{0,0680}{\lambda^4} \quad (5.2.3.14)$$

Onde: λ = Comprimento da onda portadora, fornecido pelo fabricante.

Para o cálculo de n utiliza-se a seguinte expressão:

$$(n - 1) = \frac{0,359408 * (n_0 - 1) * P}{273,15 + t} - \frac{15,02}{273,15 + t} * 10^{-6} * e \quad (5.2.3.15)$$

Onde: t = Temperatura do ar (bulbo úmido) em °C;

P = Pressão atmosférica em mmHg;

O valor de e será obtido por:

$$e = e' - 0,0006606 * P * (t - t') * \left(1 + \frac{t'}{872,778} \right) \quad (5.2.3.16)$$

Onde: t' = temperatura do ar (bulbo seco) em °C;

e' = pressão do vapor saturado em mmHg, obtido pela equação:

$$e' = 4,5828895 * 10^{7,5t / (237,3 + t)} \quad (5.2.3.17)$$

Após o cálculo da distância inclinada entre o centro do TLS e o centro da esfera de referência, obteve-se a correção meteorológica para cada distância de linha de base, e utilizando-se da diferença de nível também conhecida, calcularam-se as distâncias horizontais resultantes, as quais serão consideradas como observações na aplicação do ajustamento por MMQ, com o objetivo de obter os parâmetros do scanner (erro de zero ou constante aditiva e fator de escala).

A partir das observações de distâncias horizontais corrigidas dos efeitos meteorológicos realizou-se o ajustamento de observações por MMQ utilizando o método paramétrico, onde a equação da i -ésima observação é dada por:

$$Lb_i + v_i = m \cdot (\sum l_j)_i + z_0 \quad (5.2.3.18)$$

5.3. AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA TRIDIMENSIONAL

Neste tópico serão propostas duas metodologias para aferição da acurácia tridimensional de um TLS. A primeira refere-se à utilização de uma placa de aço fabricada por um processo de usinagem de precisão, na qual construiu-se um arranjo de nove furos para o posicionamento de nove esferas de poliacetal. A segunda metodologia consistiu na construção de um sistema de 3 planos perpendiculares formado a partir de três peças de aço de 500 mm x 500 mm. A montagem do sistema seguiu rigoroso controle de qualidade para garantir a perpendicularidade entre os planos com uma precisão superior à precisão nominal de um TLS.

5.3.1. Calibração de TLS utilizando uma placa de esferas 3D.

O objetivo deste método é realizar a aferição de um TLS a partir da utilização de uma placa de esferas 3D. Para isso construiu-se uma peça em aço disposta com nove furos obtidos a partir de uma usinagem de precisão 3D. Cada furo foi construído com o diâmetro adequado para acoplar uma esfera de poliacetal com 100 mm de diâmetro e mínimos erros de esfericidade, fabricada com rigoroso padrão de precisão ao nível do centésimo de milímetro. O conjunto com nove esferas foi usado como referência para a determinação dos erros tridimensionais do scanner. O único requisito é a determinação precisa das coordenadas do centro de cada esfera, permitindo assim o conhecimento das distâncias entre elas. A Figura 5.3.1 ilustra a placa de esferas construída para aplicação do método proposto.

Figura 5.3.1 – Placa de esferas 3D construída para aferição de TLS

FONTE: Fotos do AUTOR.

5.3.1.1. Calibração da placa de esferas 3D

Embora a usinagem da peça seja feita seguindo padrões rigorosos de controle de qualidade e precisão, foi feita uma calibração da placa de aço utilizando um equipamento com precisão superior à de um TLS (o TLS Faro Photon 80 apresenta precisão linear de 2 mm). Para a determinação das coordenadas de centro de cada furo, alojaram-se as esferas sobre a placa de aço e efetuou-se a calibração utilizando-se um braço de medição portátil, modelo Homer Absolute, fabricado pela Hexagon Metrology. Este procedimento foi realizado pela empresa *Exata Serviços de Medições 3D Portáteis Ltda*, especializada na medição de produtos e dispositivos de montagem e inspeção, executando também serviços na montagem de conjuntos, alinhamento e nivelamento de máquinas e equipamentos. O relatório dimensional resultante do processo de calibração das coordenadas de centro dos furos realizados sobre a placa de aço encontra-se no Anexo I. Abaixo, têm-se as especificações de precisão do equipamento utilizado:

Tabela 5.3.1 – especificações técnicas do braço de medição portátil.

Modelo	Alcance de Medição	Repetitividade Ponto Apalpação ⁶	Exatidão Volumétrica	Peso do Braço (incluindo a base)
7125	2.5 m (8.2 ft)	0.050 mm (0.0020 in)	0.069 mm ³ (0.0027 in)	7.9 kg (17.42 lb)

⁶ Apalpação: refere-se à medição ou percepção pelo toque

Observa-se que o equipamento apresenta uma precisão de 5 centésimos de milímetro, bem superior a um equipamento TLS.

Para controle das distâncias de referência a serem utilizadas no método de calibração proposto, têm-se abaixo um esquema da numeração de cada furo:

Figura 5.3.2 – Esquematização e numeração das esferas sobre a placa de aço.

FONTE: AUTOR.

Após a execução dos serviços de calibração das peças obtiveram-se as coordenadas nominais do centro de cada esfera, apresentadas na tabela abaixo:

Tabela 5.3.2 – Coordenadas nominais para o centro de cada esfera no sistema estabelecido na figura 5.3.3.

Esfera	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
ESF01	-399,956	100,023	5,090
ESF02	-249,957	100,066	5,023
ESF03	-99,913	100,089	4,970
ESF04	-400,115	250,013	5,398
ESF05	-250,014	250,091	4,910
ESF06	-100,027	250,097	4,962
ESF07	-400,066	400,095	5,113
ESF08	-250,076	400,090	4,772
ESF09	-100,079	400,088	4,933

Utilizando-se estas coordenadas, calcularam-se as distâncias nominais entre os centros de cada esfera:

Tabela 5.3.3 – Distâncias nominais entre os centros de cada par de esferas.

DISTÂNCIAS NOMINAIS ENTRE CENTROS (mm)									
Esfera	ESF01	ESF02	ESF03	ESF04	ESF05	ESF06	ESF07	ESF08	ESF09
ESF01	0,000	149,999	300,043	149,990	212,139	335,380	300,072	335,417	424,223
ESF02		0,000	150,044	212,207	150,025	212,104	335,485	300,024	335,375
ESF03			0,000	335,557	212,205	150,008	424,377	335,484	299,999
ESF04				0,000	150,102	300,088	150,082	212,215	335,476
ESF05					0,000	149,987	212,172	149,999	212,084
ESF06						0,000	335,444	212,162	149,991
ESF07							0,000	149,990	299,987
ESF08								0,000	149,997
ESF09									0,000

Em função das coordenadas dos centros de cada esfera, calcularam-se todas as distâncias possíveis entre as esferas e realizou-se uma análise em relação às distâncias nominais calculadas com as coordenadas de centro de cada esfera obtidas durante a calibração da peça.

5.3.1.2. *Modelo matemático*

Para executar a calibração dos erros nos três eixos do TLS propôs-se a utilização de um ajustamento pelo MMQ com o objetivo de obter as coordenadas tridimensionais do centro do scanner e seus respectivos desvios padrões a partir das coordenadas tridimensionais conhecidas dos centros das esferas. Assim realizou-se a varredura da placa de esferas 3D a partir de diferentes distâncias, determinando-se posteriormente as coordenadas do centro de cada esfera na nuvem de pontos obtida de cada varredura. Para isso, utilizou-se o software FARO Scene Version 4.8.4.26611, que disponibiliza o algoritmo de reconhecimento automático de alvos esféricos a partir da nuvem conforme ilustra a Figura 5.3.4.

Figura 5.3.3 – Esferas modeladas a partir da nuvem de pontos da placa de aço com as esferas virtuais sobrepostas.

Considerando-se as distâncias observadas entre o centro do scanner e o centro de cada esfera, optou-se pelo método dos parâmetros, cujo modelo matemático apresentado na equação 5.3.1.1 expressa os valores observados ajustados como uma função explícita dos parâmetros ajustados.

$$\rho_{ij} = \sqrt{(X_i - x_j)^2 + (Y_i - y_j)^2 + (Z_i - z_j)^2} \quad (5.3.1.1)$$

onde, ρ_{ij} é a distância observada entre cada esfera posicionada no furo i a partir da estação j onde se encontra o scanner;

X_i, Y_i e Z_i são as coordenadas cartesianas nominais de cada esfera no furo i ;

x_j, y_j e z_j são as coordenadas cartesianas desconhecidas da posição do scanner em cada estação j .

Segundo Gemaël (1994), a partir dos valores aproximados, calculam-se as correções que devem ser aplicadas aos parâmetros aproximados a fim de determinar os parâmetros ajustados.

$$L_a = F(X_a) \quad (5.3.1.2)$$

onde, L_a é o vetor das observações ajustadas ($n \times 1$);

X_a é o vetor dos parâmetros ajustados ($n \times 1$);

F é a função que relaciona L_a e X_a , sendo neste caso não linear.

Um modelo matemático inconsistente torna-se consistente pela introdução do vetor dos resíduos.

$$V = AX + L \quad (5.3.1.3)$$

$$L = L_0 - L_b = F(X_0) - L_b \quad (5.3.1.4)$$

onde, V é o vetor ($u \times 1$) dos resíduos;

A é a matriz design ($n \times u$) de escalares conhecidos, obtida a partir das derivadas parciais do modelo matemático em relação a cada um dos parâmetros x_j, y_j e z_j , dada por $A = \left. \frac{\delta F}{\delta x_a} \right|_{x_0}$;

X é o vetor ($n \times 1$) dos parâmetros incógnitos;

L é o vetor ($n \times 1$) dos valores das observações;

L_0 é o vetor ($n \times 1$) dos valores das observações estimadas;

L_b é o vetor ($n \times 1$) dos valores das observações brutas.

Como o modelo matemático da equação 5.3.1.1 não é linear, este pode ser linearizado por expansões das séries de Taylor, desprezando-se todos os termos de segunda ordem e maior (WOLF, 1969), resultando:

$$F(x_i, y_i, z_i) = F(x_i^0, y_i^0, z_i^0) + \frac{\delta F}{\delta x_i^0} \delta x_i + \frac{\delta F}{\delta y_i^0} \delta y_i + \frac{\delta F}{\delta z_i^0} \delta z_i \quad (5.3.1.5)$$

A omissão dos termos na série de Taylor e a adoção de valores iniciais aproximados introduzem erros no ajustamento. Em virtude de ter sido realizada a linearização (5.1.3.5), serão necessárias iterações, as quais são calculadas até que o vetor das correções se anule, fixado um dado número de decimais (GEMAEL, 1994).

Para obter $L_0 = F(X_0)$, que são as observações aproximadas, adota-se um valor inicial como aproximação dos parâmetros, ou seja, estima-se um valor inicial para as coordenadas da posição do scanner em cada estação j .

Das equações normais, obtidas através do multiplicado de Lagrange, que minimiza os resíduos, tem-se:

$$X = -N^{-1}U \quad (5.3.1.6)$$

$$X_a = X_0 + X \quad (5.3.1.7)$$

onde, X_a é o vetor dos parâmetros ajustados ($u \times 1$);

X_0 é o vetor dos parâmetros aproximados ($u \times 1$);

X é o vetor das correções aos parâmetros aproximados ($u \times 1$).

Para o cálculo dos valores de N e U utilizam-se as seguintes equações:

$$N = A^T P A \quad (5.3.1.8)$$

$$U = A^T P L \quad (5.3.1.9)$$

$$P = \sigma_0^2 (\sum L_b)^{-1} \quad (5.3.1.10)$$

onde, P é a matriz dos pesos ($n \times n$), obtida a partir do inverso da variância da distância entre o centro do scanner na posição j e cada esfera i , calculada em função do erro nominal esperado para um TLS (2 mm + 2 ppm);

σ_0^2 é o fator de variância *a priori* (onde adota-se normalmente o valor 1);

$\sum L_b$ é a matriz das incertezas das observações.

O vetor das observações ajustadas pode ser escrito em função dos resíduos como:

$$L_a = L_b + V \quad (5.3.1.11)$$

Aplicando a lei de propagação das covariâncias, obtêm-se as seguintes expressões.

$$\sum x = \hat{\sigma}_0^2 (N^{-1}) \quad (5.3.1.12)$$

$$\sum L_a = \hat{\sigma}_0^2 A N^{-1} A^T \quad (5.3.1.13)$$

$$\sum V = \hat{\sigma}_0^2 P^{-1} - \sum L_a \quad (5.3.1.14)$$

onde, $\sum x$ é MVC dos parâmetros ajustados, de ordem $(u \times u)$;

$\sum L_a$ é MVC das observações ajustadas, de ordem $(n \times n)$;

$\sum V$ é MVC dos resíduos ajustados, de ordem $(n \times n)$;

$\hat{\sigma}_0^2$ é o fator de variância *a posteriori*, que permite efetuar uma análise estatística da qualidade global do ajustamento;

5.3.1.3. Análise estatística do ajustamento

Segundo Gemaël (1994), o teste χ^2 da forma quadrática dos resíduos permite uma comparação entre σ_0^2 e $\hat{\sigma}_0^2$, uma vez que a forma quadrática $V^T P V$ tem distribuição χ^2 com $(v = n - u)$ graus de liberdade, cuja finalidade é verificar se estatisticamente σ_0^2 é igual a $\hat{\sigma}_0^2$. Para o cálculo de $\hat{\sigma}_0^2$ utiliza-se a seguinte equação:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n - u} \quad (5.3.1.15)$$

Para aplicação do teste estatístico do qui-quadrado estabelece-se o seguinte teste de hipótese:

- Hipótese básica $\rightarrow H_0: \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$;
- Hipótese alternativa $\rightarrow H_1: \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2$.

Em sequência deve-se calcular a estatística χ_c^2 utilizando-se a equação 5.3.1.16 e comparar o resultado com os valores teóricos obtidos a partir das relações 5.3.1.17 e 5.3.1.18 introduzidas na tabela de distribuição do χ^2 . Neste experimento os valores da estatística do qui-quadrado foram obtidos a partir de uma função pré-estabelecida no software MATLAB® R2015a Versão 8.5.0.197613.

$$\chi_c^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} (n - u) = \frac{V^T P V}{\sigma_0^2} \quad (5.3.1.16)$$

$$\text{limite superior} \rightarrow \chi_{v;0,5\alpha}^2 \quad (5.3.1.17)$$

$$\text{limite inferior} \rightarrow \chi_{v;1-0,5\alpha}^2 \quad (5.3.1.18)$$

H_0 é aceita, ao nível de significância α se:

$$\chi_{v;1-0,5\alpha}^2 < \chi_c^2 < \chi_{v;0,5\alpha}^2 \quad (5.3.1.19)$$

A hipótese alternativa H_1 prevalecerá ao nível de significância α se:

$$\chi_c^2 < \chi_{v;1-0,5\alpha}^2 \quad (5.3.1.20)$$

$$\chi_c^2 > \chi_{v;0,5\alpha}^2 \quad (5.3.1.21)$$

Em caso de ocorrência da situação apresentada na equação 5.3.1.20, há uma indicação de que os erros esperados para as observações e utilizados para o cálculo da matriz dos pesos foram subestimados, ou seja, as observações em campo estão mais precisas, sendo necessário um condicionamento de P .

Por outro lado, ocorrendo a situação apresentada na equação 5.3.1.21, há a indicação de que os erros inerentes ao levantamento das observações em campo estão superiores aos erros esperados, ocorrendo assim problemas no ajustamento. Assim uma análise deve ser feita para verificar as possíveis fontes de erros, tais como: erros grosseiros, erros sistemáticos, MVC não condizente com a precisão das observações, modelo funcional não consistente com as observações ou sistema mal condicionado.

5.3.2. Calibração utilizando um sistema de 3 planos perpendiculares 3D

Neste tópico apresenta-se a proposta de um novo método de avaliação da acurácia tridimensional de laser scanner terrestre a partir do uso de uma peça em aço com três faces planas e perpendiculares, formando-se um sistema de eixos tridimensionais (x, y, z), conforme ilustra a Figura 5.3.5.

Figura 5.3.4 – Sistemas de planos perpendiculares 3D construído para implementação do novo método proposto.

5.3.2.1. Calibração do sistema de planos 3D

A peça tridimensional foi fabricada em aço, sendo que cada face apresenta as dimensões de $5/8" \times 500mm \times 500mm$. Esta peça foi fabricada pela empresa *Sempre Projetos e Ferramentaria Ltda.*, especializada em usinagem de precisão, localizada na cidade de Campinas – SP.

Definindo o sistema de referência da nuvem de pontos coincidente com a intersecção dos três planos, pode-se avaliar os valores dos desvios padrões obtidos para os três eixos (σ_x, σ_y e σ_z) calculados a partir de uma densa nuvem de pontos para cada face plana.

Visando avaliar a qualidade e acurácia do sistema de planos perpendiculares 3D, bem como obter os valores de referência quanto à perpendicularidade dos eixos e distância dos planos para a esfera posicionada no

centro do plano Z, utilizou-se um braço de medição portátil, modelo *Homer Absolute*, fabricado pela *Hexagon Metrology*. Este procedimento foi realizado pela empresa *Exata Serviços de medições 3D Portáteis Ltda.*, especializada na medição de produtos e dispositivos de montagem e inspeção, executando também serviços na montagem de conjuntos, alinhamento e nivelamento de máquinas e equipamentos. O objetivo da calibração foi determinar a distância de cada plano para o centro de uma esfera de poliacetal com diâmetro nominal de 100 mm, posicionada no centro da peça que define o plano horizontal (eixo Z), bem como avaliar a perpendicularidade entre os eixos. O relatório dimensional resultante do processo de calibração do sistema de planos 3D encontra-se no Anexo II.

Figura 5.3.5 – Pontos de alinhamento 3D. Linha de referência usada na definição do alinhamento geométrico PLP 1.

FONTE: AUTOR.

Abaixo, têm-se as especificações de precisão do equipamento utilizado:

Tabela 5.3.4 – especificações técnicas do braço de medição portátil.

Modelo	Alcance de Medição	Repetitividade Ponto Apalpação	Exatidão Volumétrica	Pesos do Braço (incluindo a base)
7125	2.5 m (8.2 ft)	0.050 mm (0.0020 in)	0.069 mm (0.0027 in)	7.9 kg (17.42 lb)

Observa-se que o equipamento apresenta uma precisão de 5 centésimos de milímetro apresentando, portanto, precisão bem superior a um equipamento TLS.

Figura 5.3.6 – Profissional executando os serviços de aferição da peça 3D fabricada para calibração de TLS e a peça preparada para o processo de varredura após ser pintada na cor branca.

FONTE: Fotos do AUTOR.

Após o processo de calibração, determinaram-se as distâncias nominais entre o centro da esfera para cada face, obtendo-se os valores ΔX , ΔY e ΔZ de referência. Determinou-se ainda a perpendicularidade entre os eixos, de forma a garantir que as variações das diferenças de coordenadas em cada eixo para o centro da esfera se mantenha constante com precisão ao nível do centésimo de milímetro. Abaixo, têm-se os valores obtidos após a calibração:

Quadro 5.3.4 – Determinação da distância nominal (mm) do centro da esfera ao plano X e do desvio angular do plano X para o plano Z.

Ângulo entre Plano 1 / Plano 3 (Referências: Plano Base Ref., Plano 3)						
Ângulo	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
	0.100°	-0.100°	90.000°	89.988°	-0.012°	-

Pt. C1 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)						
Ponto	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Y	0.200	-0.200	235.050	234.947	-0.103	-

Pt. C2 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)						
Ponto	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Y	0.200	-0.200	235.050	234.851	-0.199	-

Pt. C3 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)						
Ponto	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Y	0.200	-0.200	235.050	235.213	0.163	-

Pt. C4 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)						
Ponto	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Y	0.200	-0.200	235.050	235.118	0.068	-

Pt. C5 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)						
Ponto	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Y	0.200	-0.200	235.050	235.032	-0.018	-

Para o processo de varredura tridimensional da peça de calibração, definiu-se um experimento variando distâncias e resoluções. Foram sete diferentes distâncias para o posicionamento do TLS: 1, 3, 5, 10, 15, 20 e 25 metros. Para as distâncias de 1 a 25 metros realizaram-se 5 varreduras com diferentes resoluções: 1/2, 1/4, 1/5, 1/8 e 1/10 da resolução máxima do TLS (Faro Photon 80) que é de 120.000 pontos por segundo. Devido ao tamanho da peça de calibração, optou-se por realizar a varredura com resolução máxima (1/1) para as distâncias de 20 e 25 metros.

Uma vez realizada a varredura, a interseção entre os três eixos do TLS (ver Figura 5.1.2) é utilizada como ponto de referência para a determinação das coordenadas de cada vértice na nuvem de pontos. Para este ponto de referência atribuiu-se as coordenadas zero para X, Y e Z.

Visando facilitar o processo de calibração, optou-se por transferir o ponto de referência de cada varredura para um ponto em comum, neste caso, a intersecção das três faces planas da peça de calibração. Este processo consiste em uma transformação afim com três rotações e três translações, sem escala, e foi realizado no software de consolidação e registro Faro Scene Versão 4.8.4.26611. Para isso

utilizou-se a ferramenta de reconhecimento e ajuste automático de planos. Neste processo, definiu-se um polígono para cada face plana da peça de calibração, a partir do qual foram determinados os planos X, Y e Z na nuvem de pontos. Em seguida foram definidos os três planos de referência a partir dos valores normais teóricos, a serem utilizados para o posicionamento da nuvem de pontos a partir da nova referência.

Figura 5.3.7 – Valores normais teóricos para os três planos de referência.

FONTE: Software Faro Scene Versão 4.8.4.26611.

Na Figura 5.3.7, têm-se os resultados deste processo para uma das varreduras do TLS.

Figura 5.3.8 – Resultados do processo de consolidação da nuvem de pontos para a nova referência.

FONTE: Software Faro Scene Versão 4.8.4.26611.

Observando-se os resultados apresentados percebe-se que os erros inerentes ao processo de consolidação e posicionamento da nuvem de pontos na nova referência apresentam valores insignificantes (menores que o milésimo de milímetro).

O desvio padrão da normal (variação dos valores medidos em relação a um plano normal médio), que é determinado utilizando-se os resultados preliminares do ajuste, permite indicar se uma área selecionada é ou não tão plana quanto deveria ser. Um desvio padrão alto indica que pode haver uma ondulação ou outros objetos no plano escolhido. No software Faro Scene este desvio padrão é dividido em um desvio transversal e um longitudinal. Segundo o manual do fabricante FARO, a qualidade desse critério indicará valores adequados quando for menor que $1,15^\circ$ e valores inaceitáveis quando for maior que $2,29^\circ$. Observando-se a Figura 5.3.7, destaca-se o desvio padrão determinado para a distância dos pontos de varredura ao plano, utilizado como um ótimo indicativo para a medição de ruídos. Observa-se ainda um baixíssimo erro entre o plano teórico e o plano médio gerado pela nuvem de pontos, comprovando a qualidade na fabricação do sistema de planos perpendiculares 3D.

5.3.2.2. Cálculos estatísticos utilizados para calibração

Finalizada a etapa de consolidação e registro de todas as cenas obteve-se uma nuvem de pontos para cada face plana da peça de calibração, constatando-se que os valores observados para as coordenadas (x, y, z) em cada nuvem se aproximaram do valor zero. Uma vez que foram feitas varreduras a diferentes distâncias e com diferentes resoluções, pode-se calcular algumas estatísticas para cada nuvem de pontos.

Uma medida de tendência central procura sintetizar as informações da amostra em um único e informativo valor. Ao examinar uma distribuição amostral simétrica ou aproximadamente simétrica, nota-se que geralmente, eles são mais frequentes perto de um valor central e mais raros ao afastar-se deste. A obtenção deste valor central é de suma importância nos levantamentos amostrais

Neste processo optou-se pelo cálculo dos valores de média aritmética, mediana, moda, variância amostral, desvio padrão amostral, máximo, mínimo, curtose, assimetria, amplitude, erro padrão da média e o coeficiente de variação.

Devido à grande quantidade de pontos na nuvem de cada plano, da ordem de centenas de milhares, para o cálculo das estatísticas, desenvolveu-se um algoritmo de cálculo utilizando-se o software MATLAB® R2015a Versão 8.5.0.197613. O algoritmo permitiu a leitura dos arquivos textos em formato *.pts, exportados pelo software Faro Scene e os respectivos cálculos, bem como a geração do gráfico da distribuição normal (histograma de frequências) para os três eixos.

Inicialmente foram realizadas as varreduras com a peça apoiada no solo. Após a análise dos resultados alcançados, decidiu-se repetir o experimento modificando a posição do sistema de planos, posicionando-se a peça sobre um suporte metálico com inclinação de 45° . Este procedimento foi necessário devido a ocorrência de desvios maiores que o esperado, principalmente no plano horizontal com ângulo de incidência mais próximo da tangente, podendo ter como causa a não perpendicularidade entre o eixo do feixe laser e os planos em cada face. A Figura 5.3.10 ilustra a posição da peça em cada um dos experimentos.

Figura 5.3.9 – 2 métodos de posicionamento da peça de calibração para realização do experimento.

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. AUTO-CALIBRAÇÃO DO TLS.

Durante a execução dos experimentos foram realizadas a auto-calibração de dois modelos de TLS: o Faro Photon 80 detalhado no tópico 3.1 e o Faro Focus3D mostrado no tópico 3.2. Em função da alteração de alguns alvos foi necessário o reposicionamento dos mesmos após a calibração do TLS Faro Photon 80, assim suas coordenadas foram medidas novamente. A varredura dos alvos foi realizada em diferentes resoluções (1:2, 1:4 e 1:8) a fim de avaliar a degradação da precisão do TLS em função da resolução escolhida. Para o cálculo das coordenadas de referência das 4 posições onde foram instaladas o TLS utilizou-se a melhor resolução utilizada (1:2).

6.1.1. Cálculo das coordenadas e desvios da posição do TLS

6.1.1.1. Equipamento Faro LS Photon 80

Após as medições efetuadas nos alvos posicionados na sala de calibração a partir da estação TM30, obtiveram-se as coordenadas de referência apresentadas no Apêndice A. Conhecendo-se as coordenadas dos alvos determinaram-se as coordenadas do scanner e seus respectivos desvios padrões a partir do ajustamento por MMQ obtendo-se os resultados apresentados nas tabelas 6.1.1 e 6.1.2 relativos a cada uma das quatro posições j do scanner. Inicialmente foram posicionados 56 alvos, porém devido à geometria em relação à posição da estação total não foi possível a obtenção das coordenadas de referência dos alvos A044 e A045. Assim, foram utilizados 54 alvos no ajustamento, mas após a análise da presença de *outliers* via cálculo com a equação 5.1.2.8, algumas observações foram eliminadas.

Tabela 6.1.1 – Coordenadas (mm) do centro do TLS Faro Photon 80 na posição j e valores de desvios padrões correspondente a cada posição.

Vértice	X	σ_x	Y	σ_y	Z	σ_z
P01	1001535,97	0,79	2001587,85	0,90	501633,62	1,02
P02	1000237,73	0,70	2002561,85	0,63	501631,42	0,80
P03	998859,90	0,68	2001107,61	0,77	501639,99	0,87
P04	1000126,43	0,74	2000072,83	0,66	501638,19	0,84

Tabela 6.1.2 – Resultados da estatística do qui-quadrado – cálculo da posição do TLS Faro Photon 80.

Vértice	Observações	Parâmetros	GL	Lim. Superior	Lim. Inferior	χ^2_c
P01	54	3	51	72,616	33,162	✓ 51,000
P02	52	3	49	70,222	31,555	✓ 49,000
P03	53	3	50	71,420	32,357	✓ 50,000
P04	53	3	50	71,420	32,357	✓ 50,000

Sabendo-se que as coordenadas do TLS durante a varredura para aplicação do método de auto-calibração é igual a zero nos três eixos, as coordenadas da tabela 6.1.1 referem-se aos parâmetros de translação de Helmert ΔX , ΔY e ΔZ .

6.1.1.2. Equipamento Faro Focus 3D X330

A partir das coordenadas conhecidas dos alvos, determinadas com a estação TM30 calcularam-se, por meio de um ajustamento MMQ, as coordenadas do scanner em cada uma das 4 posições, apresentadas na Tabela 6.1.3 a seguir

Tabela 6.1.3 – Coordenadas (mm) do centro do TLS Faro Focus 3D X330 na posição j e valores de desvios padrões correspondente a cada posição.

Vértice	X	σ_x	Y	σ_y	Z	σ_z
P01	9997,69	0,45	20002,34	0,39	51369,61	0,48
P02	8364,03	0,52	19977,74	0,46	51400,19	0,58
P03	8406,37	0,48	22037,66	0,44	51376,12	0,52
P04	9997,93	0,49	22102,34	0,45	51403,05	0,55

Inicialmente havia-se posicionado 56 alvos, porém devido a dificuldades de visualização para medição com a estação total, eliminou-se o alvo A043. Assim o cálculo da posição do scanner e também da auto-calibração foi realizado com um total de 55 alvos. Após o ajustamento, em função de possíveis erros grosseiros, alguns alvos foram eliminados, conforme pode ser observado na Tabela 6.1.4.

A análise estatística a partir da distribuição do qui-quadrado foi realizada após o ajustamento e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.1.4 a seguir.

Tabela 6.1.4 – Resultados da estatística do qui-quadrado – cálculo da posição do TLS Faro Focus 3D X330.

Vértice	Observações	Parâmetros	GL	Lim. Superior	Lim. Inferior	χ^2_c
P01	53	3	50	71.420	32.357	✓ 40.775
P02	54	3	51	72.616	33.162	✓ 58.154
P03	55	3	52	73.810	33.968	✓ 51.755
P04	54	3	51	72.616	33.162	✓ 53.786

Observando-se os valores de desvio padrão na determinação das coordenadas do TLS, percebe-se que o scanner novo Faro Focus 3D X330 apresentou uma melhor precisão.

6.1.2. Cálculo dos parâmetros de calibração do TLS

Uma vez determinadas as coordenadas referentes à posição do TLS no sistema de referência externo pôde-se realizar a auto-calibração. Para iniciar a discussão dos resultados obtidos apresentam-se abaixo os resultados iniciais do teste global do qui-quadrado sobre o fator de variância a *posteriori* $\hat{\sigma}_0^2$ antes da aplicação do método Dinamarquês para detecção de *outliers*. Os resultados obtidos para os dois equipamentos encontram-se nas Tabelas 6.1.5 e 6.1.6 abaixo.

Tabela 6.1.5 – Estimativas do fator de variância a posteriori $\hat{\sigma}_0^2$, ao nível de 95%, antes da aplicação do método Dinamarquês – TLS Faro Photon 80

Resolução	Observações	Parâmetros	GL	Lim. Superior	Lim. Inferior	$\hat{\sigma}_0^2$	χ^2_c
1:2	648	16	632	703,557	564,231	4,739	✗ 2901,403
1:4	648	16	632	703,557	564,231	5,068	✗ 3202,941
1:8	648	16	632	703,557	564,231	6,275	✗ 3966,000

Tabela 6.1.6 – Estimativas do fator de variância a posteriori $\hat{\sigma}_0^2$, ao nível de 95%, antes da aplicação do método Dinamarquês – TLS Faro Focus 3D X330

Resolução	Observações	Parâmetros	GL	Lim. Superior	Lim. Inferior	$\hat{\sigma}_0^2$	χ^2_c
1:2	660	16	644	716.215	575.572	1.871	✗ 1204.700
1:4	660	16	644	716.215	575.572	1.546	✗ 995.925
1:8	660	16	644	716.215	575.572	9.369	✗ 6033.323

Após a aplicação do método Dinamarquês foram encontrados *outliers*, cujas observações com presença de erros grosseiros foram automaticamente eliminadas. Os resultados da estatística do qui-quadrado após a finalização da auto-calibração para os dois equipamentos encontram-se nas Tabelas 6.1.7 e 6.1.8 abaixo.

Tabela 6.1.7 – Estimativas do fator de variância a posteriori $\hat{\sigma}_0^2$, ao nível de 95%, após a aplicação do método Dinamarquês e a finalização da auto-calibração – TLS Faro Photon 80

Resolução	Observações	Parâmetros	GL	Lim. Superior	Lim. Inferior	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_c^2
1:2	624	16	608	678,220	541,567	1,105	✓ 675,413
1:4	621	16	605	675,052	538,736	1,095	✓ 662,357
1:8	627	16	611	681,389	544,399	1,088	✓ 664,634

Tabela 6.1.8 – Estimativas do fator de variância a posteriori $\hat{\sigma}_0^2$, ao nível de 95%, após a aplicação do método Dinamarquês e a finalização da auto-calibração – TLS Faro Focus 3D X330

Resolução	Observações	Parâmetros	GL	Lim. Superior	Lim. Inferior	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_c^2
1:2	597	16	581	649.685	516.103	1.067	✓ 620.025
1:4	588	16	572	640.166	507.622	1.050	✓ 600.827
1:8	570	16	554	621.114	490.674	0.891	✓ 493.576

Observando-se os resultados obtidos para o TLS Faro Photon 80 na varredura com resolução de 1/2, verifica-se que foram eliminadas 24 observações, correspondentes a 8 alvos. Destes, 4 alvos coletados na posição P01, 2 alvos na posição P02 e 1 alvo para as posições P03 e P04.

Utilizando-se os dados coletados com a resolução de 1/4 foram eliminadas 27 observações, correspondendo a 9 alvos. Observou-se a eliminação de 4 alvos coletados na posição P01, 2 alvos na posição P03 e 3 alvos para a posição P04.

Por fim, foi necessária a eliminação de 21 observações para a varredura com resolução de 1/8, sendo 4 alvos coletados na posição P01, 2 alvos na posição P03 e 1 alvo na posição P04.

Já para o scanner Faro Focus 3D X330 foram eliminadas 63 observações para os dados coletados na resolução de 1/2, o que corresponde a 21 alvos. Destes, 6 foram eliminados da posição P01, 9 da posição P02 e mais 3 da cada das posições P03 e P04. Para a resolução de 1/4 foram eliminadas 72 observações, correspondendo a um total de 24 alvos, sendo 7 deles para cada uma das posições P01, P02 e P03 e 3 alvos para a posição P04. Na resolução de 1/8 foram eliminadas

90 observações totalizando 30 alvos, sendo 7 alvos para as posições P01 e P04, 6 alvos para a posição P02 e 10 alvos para a posição P03.

Os resultados com os valores dos parâmetros relativos aos ângulos de rotação primário, secundário e terciário ω_j, ϕ_j e κ_j , respectivamente, bem como os parâmetros de calibração e correção sistemática adicional para a distância, o eixo horizontal, o erro no eixo de colimação e erro de índice na direção vertical, $\Delta\rho$, $\Delta\theta$, Δc e $\Delta\alpha$, respectivamente, são apresentados na Tabela 6.1.9 a seguir.

Tabela 6.1.9 – Resultados finais dos parâmetros de calibração do scanner Faro Photon 80, para as diferentes resoluções.

Parâmetros de Calibração	Resolução 1:2		Resolução 1:4		Resolução 1:8	
	Valor	Desvio σ	Valor	Desvio σ	Valor	Desvio σ
P01 - Rotação Primária ω (°)	0,019154	0,000276	0,002648	0,000280	0,032719	0,000299
P01 - Rotação Secundária ϕ (°)	-0,027426	0,000260	-0,023269	0,000256	-0,028957	0,000270
P01 - Rotação Terciária κ (°)	133,419178	0,000306	133,435717	0,000302	133,434836	0,000316
P02 - Rotação Primária ω (°)	0,001859	0,000231	-0,000304	0,000232	-0,013482	0,000246
P02 - Rotação Secundária ϕ (°)	-0,030343	0,000277	-0,037728	0,000277	-0,030754	0,000294
P02 - Rotação Terciária κ (°)	121,800453	0,000311	121,813588	0,000313	121,798496	0,000331
P03 - Rotação Primária ω (°)	-0,002206	0,000272	0,014743	0,000274	0,020171	0,000291
P03 - Rotação Secundária ϕ (°)	-0,014916	0,000239	-0,021709	0,000242	-0,029458	0,000257
P03 - Rotação Terciária κ (°)	41,090707	0,000293	41,096789	0,000294	41,104678	0,000311
P04 - Rotação Primária ω (°)	0,021178	0,000246	0,016301	0,000250	0,026238	0,000262
P04 - Rotação Secundária ϕ (°)	-0,024428	0,000277	-0,020428	0,000288	-0,038954	0,000299
P04 - Rotação Terciária κ (°)	222,938503	0,000316	222,949731	0,000319	222,944000	0,000336
Erro Zero $\Delta\rho$ (mm)	-3,52	0,47	-4,23	0,47	-4,25	0,50
Erro de Colimação Δc (°)	0,066972	0,000118	0,075862	0,000120	0,086779	0,000126
Erro Eixo Horizontal $\Delta\theta$ (°)	0,011028	0,000245	0,013248	0,000252	0,009290	0,000265
Erro Índice Vertical $\Delta\alpha$ (°)	0,004635	0,000130	0,009176	0,000133	0,009749	0,000140

Observando-se os resultados das correções sistemáticas horizontais verifica-se um maior valor para o erro de colimação Δc . Este resultado já era

esperado uma vez que a determinação das coordenadas do centro de cada alvo não é obtida como em uma estação total (a partir de um único ponto) e sim por meio de uma nuvem de pontos relativas ao círculo do alvo plano. À medida que o ângulo de incidência se torna muito agudo haverá um erro maior na determinação das coordenadas do centro do alvo conforme ilustra a Figura 6.1.1, onde o scanner se encontra-se no centro de perspectiva. O alvo posicionado à esquerda apresenta uma configuração geométrica que dificulta o processo de determinação de sua coordenada.

Figura 6.1.1 – Exemplo em que o ângulo de incidência influencia na determinação das coordenadas do centro do alvo.

Avaliando-se os resultados obtidos para os demais parâmetros $\Delta\rho$, $\Delta\theta$ e $\Delta\alpha$ para o TLS Faro Photon 80, os erros encontram-se ligeiramente acima das especificações do fabricante.

Após os cálculos para o scanner Faro Focus 3D X330 obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 6.1.10.

Tabela 6.1.10 – Resultados finais dos parâmetros de calibração do scanner Faro Focus 3D X330, para as diferentes resoluções.

Parâmetros de Calibração	Resolução 1:2		Resolução 1:4		Resolução 1:8	
	Valor	Desvio σ	Valor	Desvio σ	Valor	Desvio σ
P01 - Rotação Primária ω (°)	-0.188486	0.000120	-0,218647	0,000121	-0.161889	0.000113
P01 - Rotação Secundária ϕ (°)	-0.095380	0.000128	-0,108501	0,000130	-0.102556	0.000118
P01 - Rotação Terciária κ (°)	351.163650	0.000272	351,122975	0,000290	351.116297	0.000264
P02 - Rotação Primária ω (°)	-0.163751	0.000120	-0,164418	0,000119	-0.159768	0.000109
P02 - Rotação Secundária ϕ (°)	-0.035292	0.000131	-0,049501	0,000127	-0.049546	0.000116
P02 - Rotação Terciária κ (°)	359.612445	0.000268	359,568046	0,000286	359.572191	0.000262
P03 - Rotação Primária ω (°)	0.060659	0.000117	0,025703	0,000119	0.031854	0.000116
P03 - Rotação Secundária ϕ (°)	0.120745	0.000126	0,145539	0,000129	0.133461	0.000123
P03 - Rotação Terciária κ (°)	176.614656	0.000278	176,558718	0,000291	176.563586	0.000267
P04 - Rotação Primária ω (°)	-0.064389	0.000114	-0,040996	0,000115	-0.047108	0.000109
P04 - Rotação Secundária ϕ (°)	-0.115415	0.000124	-0,117102	0,000125	-0.122131	0.000121
P04 - Rotação Terciária κ (°)	352.477515	0.000271	352,425384	0,000289	352.439466	0.000265
Erro Zero Δp (mm)	-1.50	0.16	-1,61	0,16	-1.52	0.15
Erro de Colimação Δc (°)	0.033751	0.000234	0,050995	0,000250	0.052055	0.000229
Erro Eixo Horizontal $\Delta \theta$ (°)	-0.005948	0.000104	-0,008015	0,000105	-0.005641	0.000100
Erro Índice Vertical $\Delta \alpha$ (°)	0.005762	0.000075	0,007075	0,000078	0.004247	0.000073

Avaliando-se os resultados obtidos, observa-se, como esperado, que os erros do TLS Faro Focus 3D X330 foram bem menores que o outro e ligeiramente inferiores aos erros especificados pelo fabricante. Chama-se atenção a ocorrência de uma degradação da precisão quando se diminui a resolução.

Visando avaliar a precisão e a acurácia das coordenadas dos alvos obtidos com o TLS realizaram-se os cálculos através das equações 5.1.3.1 e 5.1.3.2. Os resultados finais da estimativa de precisão obtidos encontram-se nas Tabelas 6.1.11 a 6.1.13 a seguir.

Tabela 6.1.11 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/2 - Faro Photon 80.

Alvo	Precisão Total 3D (mm)				Alvo	Precisão Total 3D (mm)			
	P01	P02	P03	P04		P01	P02	P03	P04
A001	5,9	4,7	6,3	5,4	A028	7,5	4,3	X	7,5
A002	3,1	5,4	7,1	7,6	A029	4,5	2,4	5,6	9,4
A003	5,4	7,0	4,2	4,0	A030	5,2	3,9	8,7	8,8
A004	9,3	9,3	4,2	1,9	A031	6,8	2,3	7,1	7,5
A005	5,8	5,2	3,9	4,8	A032	7,9	3,3	5,9	7,3
A006	6,7	6,2	3,7	5,9	A033	3,0	3,1	5,5	5,1
A007	6,2	8,4	3,5	4,3	A034	7,7	X	4,7	6,0
A008	13,1	9,7	6,0	7,1	A035	5,8	1,9	5,2	6,5
A009	5,1	5,0	3,8	4,2	A036	3,6	2,9	4,2	6,4
A010	3,3	6,0	3,6	6,3	A037	5,2	5,1	3,0	7,9
A011	8,0	8,0	2,6	7,6	A038	5,6	1,7	4,1	8,2
A012	13,3	10,8	6,4	5,0	A039	1,4	6,1	3,5	7,6
A013	11,4	10,1	6,3	5,4	A040	7,3	1,9	4,1	7,5
A014	8,0	9,4	4,3	6,5	A041	2,3	5,1	2,6	9,0
A015	9,7	9,4	0,6	7,2	A042	3,8	2,5	2,9	6,4
A016	13,6	11,3	6,4	2,3	A043	1,6	4,0	2,4	5,5
A017	7,3	10,4	3,3	4,3	A046	1,0	4,0	8,7	10,5
A018	X	8,4	2,2	5,1	A047	5,5	0,7	11,4	9,5
A019	X	11,1	8,0	4,3	A048	7,5	4,7	8,3	11,7
A020	9,0	10,2	7,0	6,1	A049	2,2	1,4	7,5	8,7
A021	8,8	5,7	5,7	9,7	A050	4,3	3,3	9,1	5,1
A022	X	6,9	5,2	7,5	A051	8,9	5,6	7,0	9,4
A023	8,0	5,1	4,9	7,1	A052	5,1	4,2	4,8	5,2
A024	8,4	1,8	8,7	7,1	A053	4,2	8,4	6,1	3,6
A025	X	6,1	10,2	7,2	A054	14,1	7,3	5,0	9,3
A026	8,3	3,9	6,2	7,8	A055	10,6	8,8	1,0	X
A027	8,7	X	6,9	5,9	A056	7,9	10,3	4,3	7,5

Tabela 6.1.12 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/4 - Faro Photon 80.

Alvo	Precisão Total 3D (mm)				Alvo	Precisão Total 3D (mm)			
	P01	P02	P03	P04		P01	P02	P03	P04
A001	4,6	4,0	6,3	5,9	A028	6,3	7,5	X	6,9
A002	2,3	5,9	8,1	10,0	A029	4,3	3,2	4,2	8,6
A003	4,5	6,8	4,0	5,1	A030	6,0	6,2	4,9	8,1
A004	9,7	8,9	4,1	3,3	A031	6,9	2,0	6,4	8,7
A005	5,7	4,8	4,7	5,4	A032	9,0	3,1	7,5	8,0
A006	6,1	6,7	4,0	7,4	A033	3,6	2,9	6,4	6,6
A007	6,8	8,2	3,9	4,1	A034	8,4	6,1	5,0	8,2
A008	10,6	10,4	6,3	7,7	A035	4,2	1,3	3,7	8,0
A009	5,3	5,4	3,4	5,9	A036	3,4	2,5	4,3	6,0
A010	4,6	5,8	3,7	8,2	A037	5,2	4,7	1,8	8,6
A011	6,6	8,6	2,5	7,7	A038	2,3	2,2	2,5	8,4
A012	11,2	11,2	6,8	2,2	A039	1,3	6,0	3,0	7,3
A013	12,3	9,7	8,6	6,0	A040	8,6	3,4	4,5	7,4
A014	11,5	9,0	5,3	6,0	A041	1,1	5,8	2,4	10,1
A015	X	8,7	1,4	X	A042	X	1,2	2,4	7,2
A016	13,2	11,2	9,7	4,2	A043	2,3	5,9	3,1	5,9
A017	11,0	10,6	2,5	2,8	A046	2,0	7,4	8,1	8,7
A018	10,4	8,2	1,6	6,4	A047	8,2	1,8	7,7	9,6
A019	X	10,2	9,8	4,8	A048	5,7	4,9	8,7	11,0
A020	X	11,1	8,3	4,9	A049	1,0	1,4	X	5,8
A021	7,9	5,3	5,7	7,1	A050	5,1	2,6	7,7	7,0
A022	8,8	6,6	5,2	9,5	A051	11,6	4,8	8,2	X
A023	7,7	6,2	6,1	7,5	A052	4,2	4,1	5,7	9,8
A024	8,2	1,6	8,3	7,1	A053	4,1	5,9	5,0	X
A025	8,3	5,0	8,9	7,8	A054	8,8	6,7	7,3	5,7
A026	7,4	3,4	6,0	7,7	A055	9,1	7,4	1,4	2,9
A027	9,9	7,5	6,1	6,4	A056	6,6	8,0	4,7	7,8

Tabela 6.1.13 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/8 - Faro Photon 80.

Alvo	Precisão Total 3D (mm)				Alvo	Precisão Total 3D (mm)			
	P01	P02	P03	P04		P01	P02	P03	P04
A001	4,2	3,8	6,3	6,1	A028	6,8	9,3	X	7,1
A002	1,7	6,8	8,1	10,3	A029	4,6	4,9	3,7	8,7
A003	4,7	8,2	4,1	5,4	A030	5,6	3,0	3,8	7,5
A004	11,8	10,8	4,0	1,7	A031	6,6	1,4	6,7	8,5
A005	5,6	5,4	4,8	4,9	A032	6,4	2,9	7,6	8,3
A006	5,2	7,6	4,2	7,0	A033	3,7	3,0	6,0	7,0
A007	7,2	9,2	4,2	4,3	A034	8,1	5,6	5,0	8,7
A008	12,6	11,7	6,9	7,4	A035	6,0	1,8	5,1	7,5
A009	5,4	6,0	3,5	6,2	A036	3,7	6,3	4,7	5,7
A010	3,7	6,3	3,8	9,6	A037	4,6	5,7	2,4	8,6
A011	8,4	9,4	2,4	8,6	A038	7,6	3,0	3,2	8,0
A012	13,3	11,9	8,1	2,3	A039	1,0	6,1	3,2	6,4
A013	13,2	10,8	9,4	5,8	A040	X	3,9	5,3	9,2
A014	11,2	10,3	4,5	5,5	A041	1,3	6,8	3,2	9,6
A015	X	9,7	1,6	X	A042	5,0	3,3	3,6	7,0
A016	14,3	12,4	10,1	4,2	A043	3,3	5,2	3,7	6,4
A017	11,6	11,6	2,6	3,4	A046	3,1	4,2	8,5	9,5
A018	11,5	8,4	1,6	5,6	A047	6,5	1,4	5,4	8,1
A019	X	12,4	10,9	4,7	A048	4,8	4,4	8,8	10,8
A020	9,1	11,9	8,6	5,5	A049	X	1,3	X	8,8
A021	8,6	5,0	6,2	7,1	A050	1,6	2,2	7,7	5,9
A022	9,7	6,4	6,9	9,0	A051	5,7	5,4	7,4	11,0
A023	7,6	6,9	6,3	7,3	A052	8,4	5,1	5,5	6,2
A024	8,3	1,8	9,1	6,7	A053	4,8	6,9	4,3	3,1
A025	9,1	5,1	8,8	8,4	A054	5,7	7,3	7,6	10,0
A026	7,6	3,9	5,9	7,7	A055	9,5	9,0	1,2	8,3
A027	9,6	7,1	8,0	6,3	A056	3,9	8,3	4,9	9,9

A mesma avaliação foi realizada para o TLS Faro Focus 3D e os resultados são apresentados nas Tabelas 6.1.14 a 6.1.16 a seguir.

Tabela 6.1.14 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/2 - Faro Focus 3D X330.

Alvo	Precisão Total 3D (mm)				Alvo	Precisão Total 3D (mm)			
	P01	P02	P03	P04		P01	P02	P03	P04
A001	0.6	2.9	1.2	1.8					
A002	2.3	2.7	2.8	1.1	A029	3.2	3.2	3.0	3.6
A003	1.9	1.5	1.8	2.1	A030	3.9	3.1	2.8	X
A004	2.3	2.0	3.4	3.1	A031	1.5	1.5	2.6	2.2
A005	1.5	3.4	2.9	2.8	A032	2.5	0.8	2.5	2.1
A006	2.3	1.3	1.5	1.8	A033	1.8	1.1	4.0	2.3
A007	2.1	1.5	2.1	4.3	A034	1.7	X	X	1.3
A008	2.0	1.3	3.4	2.9	A035	1.2	3.0	2.7	2.3
A009	2.3	5.9	2.1	2.8	A036	4.0	X	3.9	3.8
A010	X	X	2.0	2.7	A037	5.4	2.5	2.4	4.4
A011	3.4	4.1	0.6	4.7	A038	X	1.8	X	2.9
A012	4.5	X	2.8	4.4	A039	5.3	X	2.1	X
A013	1.7	1.5	2.7	3.8	A040	X	3.5	1.9	2.5
A014	2.3	1.0	2.4	2.4	A041	2.0	4.6	2.5	1.8
A015	3.5	1.4	4.8	3.3	A042	X	1.0	4.1	2.7
A016	2.4	2.2	2.4	2.2	A044	X	1.5	2.9	1.7
A017	2.9	2.6	1.9	2.1	A045	2.4	1.3	2.1	1.6
A018	2.4	2.3	3.5	3.2	A046	X	X	2.3	5.8
A019	3.4	4.3	3.0	2.6	A047	1.6	0.5	2.6	2.1
A020	3.8	3.8	2.5	2.6	A048	1.1	1.3	3.4	2.2
A021	2.9	3.2	2.8	3.8	A049	3.0	X	2.0	5.1
A022	2.4	1.1	3.4	2.5	A050	1.0	2.4	2.6	0.4
A023	1.5	1.3	X	1.6	A051	1.6	4.7	2.1	1.8
A024	1.0	2.3	2.6	0.9	A052	1.3	1.2	3.3	0.6
A025	2.1	1.9	1.1	3.1	A053	1.6	1.7	2.3	0.6
A026	1.8	2.5	1.6	2.7	A054	2.0	1.5	3.2	5.9
A027	0.6	4.0	2.1	1.8	A055	1.2	X	3.0	1.4
A028	4.6	2.8	0.8	X	A056	1.0	X	2.0	1.8

Tabela 6.1.15 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/4 - Faro Focus 3D X330.

Alvo	Precisão Total 3D (mm)				Alvo	Precisão Total 3D (mm)			
	P01	P02	P03	P04		P01	P02	P03	P04
A001	0.6	2.4	3.7	1.7					
A002	1.5	1.6	3.8	1.1	A029	1.6	3.3	1.4	4.7
A003	1.9	2.0	4.3	1.8	A030	1.8	3.7	2.2	3.4
A004	2.1	2.8	3.0	2.8	A031	1.9	2.6	3.5	3.5
A005	1.3	3.4	2.7	2.4	A032	2.3	1.4	3.6	1.4
A006	2.3	2.3	1.8	3.0	A033	1.4	1.4	4.7	1.2
A007	1.8	1.9	1.6	2.7	A034	1.6	1.1	3.4	3.0
A008	1.8	1.6	3.1	3.6	A035	X	2.4	3.1	2.1
A009	3.2	X	1.9	2.9	A036	1.3	X	4.1	2.9
A010	X	X	2.2	3.0	A037	6.5	5.6	2.8	3.8
A011	4.3	4.1	3.5	3.2	A038	5.6	1.2	2.0	2.7
A012	4.1	2.3	3.2	3.7	A039	X	X	4.8	3.2
A013	1.8	1.6	3.0	3.1	A040	X	2.4	2.5	4.1
A014	1.8	1.4	3.6	0.8	A041	1.1	3.2	X	X
A015	2.3	2.1	3.4	2.7	A042	4.9	3.7	2.2	1.8
A016	2.0	2.2	3.3	2.3	A044	X	1.1	1.9	2.5
A017	2.7	2.5	2.1	1.5	A045	3.4	1.5	2.9	1.5
A018	3.2	2.7	1.8	2.0	A046	X	X	3.3	2.0
A019	3.7	3.9	X	3.2	A047	2.4	3.5	3.6	1.2
A020	4.0	3.7	2.1	3.0	A048	2.2	0.9	4.6	2.6
A021	2.9	3.0	1.2	4.6	A049	1.1	X	X	2.5
A022	1.3	0.8	3.6	2.3	A050	2.8	1.9	3.7	1.4
A023	1.1	1.9	2.9	1.8	A051	1.1	1.2	X	1.1
A024	1.6	2.9	3.2	1.2	A052	1.4	2.8	X	3.1
A025	2.0	2.2	2.0	3.5	A053	1.4	1.3	X	X
A026	1.7	2.9	1.2	2.1	A054	1.1	1.1	2.8	0.5
A027	0.9	3.0	2.4	0.9	A055	1.3	1.6	3.0	1.7
A028	2.2	3.1	1.4	X	A056	X	X	X	0.7

Tabela 6.1.16 – Resultados finais da estimativa de precisão 3D para as coordenadas dos alvos – Varredura com resolução 1/8 - Faro Focus 3D X330.

Alvo	Precisão Total 3D (mm)				Alvo	Precisão Total 3D (mm)			
	P01	P02	P03	P04		P01	P02	P03	P04
A001	1.7	2.2	2.7	1.8					
A002	1.4	2.6	3.9	1.1	A029	1.6	2.5	2.1	4.1
A003	1.8	2.4	2.3	1.9	A030	2.5	3.7	1.6	2.9
A004	2.2	4.2	2.9	2.8	A031	2.4	2.0	3.3	1.1
A005	1.5	3.1	1.7	2.9	A032	3.0	1.6	3.6	2.0
A006	2.1	1.0	1.5	2.7	A033	2.1	1.1	4.3	1.6
A007	1.7	1.9	1.4	2.5	A034	1.9	X	3.3	1.1
A008	1.8	3.6	3.3	X	A035	1.8	2.1	3.0	1.8
A009	2.7	X	1.2	3.3	A036	4.0	X	3.5	3.2
A010	X	X	1.7	3.4	A037	5.1	2.0	2.5	1.8
A011	2.7	4.0	3.4	X	A038	5.1	3.9	1.3	2.4
A012	3.1	3.1	2.8	3.7	A039	X	X	X	2.9
A013	1.8	1.7	3.7	1.2	A040	X	1.4	1.8	1.4
A014	2.3	1.3	4.1	0.6	A041	1.1	2.7	1.7	X
A015	2.8	2.4	X	2.4	A042	X	3.1	2.2	1.8
A016	2.1	2.3	3.5	2.3	A044	X	4.7	X	2.4
A017	3.2	2.6	2.0	1.5	A045	3.4	1.2	2.0	2.2
A018	3.2	2.6	2.6	2.3	A046	X	1.8	2.5	1.0
A019	2.6	3.7	X	4.0	A047	X	X	X	1.0
A020	3.0	3.7	1.9	3.1	A048	2.2	3.1	3.5	X
A021	2.2	3.0	X	4.3	A049	1.8	0.6	2.8	X
A022	1.5	1.8	1.7	2.2	A050	1.3	1.7	2.4	2.6
A023	1.4	1.8	3.5	1.8	A051	2.0	1.0	2.4	2.8
A024	1.3	2.7	2.9	1.3	A052	0.5	1.7	X	4.9
A025	2.1	2.2	2.4	3.2	A053	0.6	2.7	1.1	X
A026	1.9	2.7	1.3	2.3	A054	1.6	1.5	X	0.8
A027	0.9	2.9	2.3	0.9	A055	1.3	1.6	X	0.7
A028	2.0	4.4	1.8	X	A056	1.0	2.2	X	1.0

Para uma melhor visualização dos resultados da precisão 3D apresentados anteriormente foram gerados alguns gráficos de distribuição dos resíduos e seus respectivos valores médios para os dois TLS, conforme pode ser visualizado nas Figuras 6.1.2 e 6.1.3.

Figura 6.1.2 – Distribuição dos resíduos 3D para as coordenadas dos alvos – TLS Faro Photon 80

Figura 6.1.3 – Distribuição dos resíduos 3D para as coordenadas dos alvos – TLS Faro Focus 3D X330

Observando-se os valores de precisão média e desvio padrão apresentados nos gráficos fica nítido o melhor desempenho alcançado com o TLS Faro Focus 3D X330.

Avaliando-se a precisão dos valores observados para o TLS Faro Photon 80, verifica-se que os resultados apresentam discrepâncias em torno da estimativa um pouco superior quando comparado com o erro nominal esperado. É conveniente ressaltar a influência dos erros nos três eixos no resultado bem como as correções que foram efetuadas na inclinação através dos ângulos de rotação primário e secundário (nivelamento do instrumento). Comparando-se a precisão média e respectivo desvio padrão em cada uma das resoluções, percebe-se a degradação da precisão à medida que diminui a resolução de varredura. Entretanto, ao avaliar a precisão para o TLS Faro Focus 3D X330 verifica-se que os resultados ficam coerentes com a precisão nominal especificada pelo fabricante, apresentando valores ligeiramente superiores, como se pode observar através das distribuições de frequência apresentadas na Figura 6.1.3.

Para o TLS Faro Focus 3D X330 os resultados ficaram dentro do esperado e muito próximo das especificações do fabricante que é de 2mm, conforme especificações apresentadas na Tabela 3.2.1.

O próximo passo foi avaliar a acurácia 3D. Os gráficos com os resultados alcançados são apresentados nas Figuras 6.1.4 e 6.1.5 a seguir.

Figura 6.1.4 – Distribuição da acurácia das coordenadas dos alvos, obtidas em função das distâncias entre os alvos – TLS Faro Photon 80.

Figura 6.1.5 – Distribuição da acurácia das coordenadas dos alvos, obtidas em função das distâncias entre os alvos – TLS Faro Focus 3D X330.

Novamente através da análise da acurácia média e respectivo desvio padrão verifica-se a degradação no desempenho do TLS conforme há a diminuição da resolução de varredura, bem como o melhor desempenho do TLS Faro Focus 3D X330.

Em seguida, visando facilitar a análise da possível presença de erros sistemáticos adicionais, plotaram-se os resíduos das distâncias em função da distância de varredura e os resíduos da direção vertical em função da direção horizontal. Os resultados para o scanner Faro Photon 80 são apresentados nas Figuras 6.1.6 a 6.1.11.

Figura 6.1.6 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/2.

Figura 6.1.7 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/4.

Figura 6.1.8 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/8.

Figura 6.1.9 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/2.

Figura 6.1.10 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/4.

Figura 6.1.11 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Photon 80 - Resolução 1/8.

Os gráficos com a plotagem dos resíduos também foram feitos para o scanner Faro Focus 3D X330 e podem ser visualizados nas Figuras 6.1.12 a 6.1.17 a seguir.

Figura 6.1.12 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/2.

Figura 6.1.13 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/4.

Figura 6.1.14 – Resíduos da distância em função da distância de varredura para o scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/8.

Figura 6.1.15 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/2.

Figura 6.1.16 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/4.

Figura 6.1.17 – Resíduos da direção vertical α em função da direção horizontal θ após a auto-calibração do scanner Faro Focus 3D X330 - Resolução 1/8.

Com a plotagem dos resíduos é possível avaliar a presença de erros sistemáticos adicionais não modelados na metodologia proposta. Nesta análise percebe-se que os resíduos não apresentam uma distribuição normal com média zero. Entretanto é importante lembrar que a precisão dos parâmetros de transformação e a magnitude dos resíduos não são definidas única e exclusivamente em função da acurácia do TLS, mas também, em função da determinação das coordenadas do centro de cada alvo ser obtida a partir de um ponto médio da nuvem de pontos referente à sua circunferência. Lichti (2007) propõe uma modelagem mais elaborada em que é possível avaliar e quantificar a presença de erros sistemáticos adicionais em cada um dos parâmetros $\Delta\rho$, $\Delta\theta$ e $\Delta\alpha$, possibilitando sua posterior utilização para correção da nuvem de pontos, que poderá ser objeto de trabalhos futuros..

6.2. CALIBRAÇÃO DO DISTANCIÔMETRO DE UM TLS EM LINHA BASE DE CALIBRAÇÃO EDM

6.2.1. Determinação dos parâmetros de calibração do TLS Faro Photon 80

A partir da nuvem de pontos obtiveram-se as coordenadas do centro da esfera de referência, utilizando o software FARO Scene Versão 4.8.4.26611, que disponibiliza o algoritmo de reconhecimento automático de alvos esféricos a partir da nuvem de pontos. Sabendo-se que as coordenadas x , y e z do centro O do TLS são conhecidas $(0,0,0)$ e obtendo-se as coordenadas do centro do alvo esférico, calculou-se a distância inclinada observada entre os pilares. As Tabelas 6.2.1 e 6.2.2 apresentam as coordenadas obtidas para cada alvo e as respectivas distâncias inclinadas calculadas:

Tabela 6.2.1 – Coordenadas obtidas para o centro das esferas de referência e cálculo da distância inclinada entre os pilares para a 1ª série de leitura.

1ª Série de Varredura – Cálculo da distância inclinada					
Pilares		Coordenadas de Centro da Esfera em (mm)			Di (mm)
TLS	Esfera	x	y	z	
P0	P1A	4932,18	-466,71	-16,18	4954,24
P0	P1	19548,74	-1773,74	-70,25	19629,17
P0	P2A	29688,67	-2666,00	-84,82	29808,26
P0	P2	*	*	*	*
P1A	P1	14665,77	-596,27	-54,60	14677,99
P1A	P2A	24835,79	-996,20	-74,84	24855,87
P1A	P2	*	*	*	*
P1	P2A	10179,22	-571,96	-10,16	10195,28
P1	P2	*	*	*	*
P2A	P2	38280,96	-1388,75	-21,06	38306,15

Tabela 6.2.2 – Coordenadas obtidas para o centro das esferas de referência e cálculo da distância inclinada entre os pilares para a 2ª série de leitura.

2ª Série de Varredura – Cálculo da distância inclinada					
Pilares		Coordenadas de Centro da Esfera em (mm)			Di (mm)
TLS	Esfera	x	y	z	
P0	P1A	4942,89	-296,66	-13,31	4951,80
P0	P1	19624,11	-471,83	-77,76	19629,94
P0	P2A	29790,98	-708,09	-60,65	29799,46
P0	P2	*	*	*	*
P1A	P1	14665,71	-642,69	-52,34	14679,88
P1A	P2A	24818,64	-1067,63	-56,13	24841,66
P1A	P2	*	*	*	*
P1	P2A	10189,55	-340,40	-11,60	10195,24
P1	P2	*	*	*	*
P2A	P2	38279,97	-1404,52	-13,54	38305,73

Observando-se os resultados apresentados verifica-se que o scanner testado não conseguiu obter uma nuvem de pontos suficiente para definição das esferas posicionadas nos pilares P2, quando escaneadas a partir dos pilares P0, P1A e P1. Este problema ocorreu devido à baixa resolução do scanner, que não permitiu obter uma quantidade suficiente de pontos para definição das esferas. Entretanto, as demais leituras serão suficientes para o ajustamento MMQ.

Executados os processamentos necessários para obtenção das distâncias entre os pilares, realizou-se a correção dos efeitos atmosféricos, obtendo-se os resultados apresentados nas Tabelas 6.2.1 e 6.2.2 a seguir.

Tabela 6.2.3 – Cálculo da distância reduzida ao horizonte após a correção da distância inclinada pela constante meteorológica – 1ª Série de leitura.

1ª Série de Varredura - Cálculo de Cm e redução ao horizonte										
Pilares		Di (mm)	Hora Local	t °C	t' °C	Pressão mmHg	Cm	Dm (mm)	DN (mm)	Dh (mm)
TLS	Esfera									
P0	P1A	4951,80	9:31	20,5	20,6	703,5	1,00004088	4952,00	-16,18	4951,97
P0	P1	19629,94	9:39	20,5	20,6	703,5	1,00004088	19630,74	-70,25	19630,61
P0	P2A	29799,46	9:47	20,5	20,5	703,1	1,00004101	29800,68	-84,82	29800,56
P0	P2	*	9:55	20,7	20,9	703,4	1,00004109	*	*	*
P1A	P1	14679,88	10:29	22,2	20,4	703,1	1,00004249	14680,50	-54,60	14680,40
P1A	P2A	24841,66	10:21	20,5	21,8	703,1	1,00004105	24842,68	-74,84	24842,56
P1A	P2	*	10:13	20,7	21,5	703,1	1,00004121	*	*	*
P1	P2A	10195,24	10:45	20,2	21,4	703,1	1,00004077	10195,66	-10,16	10195,65
P1	P2	*	10:37	19,0	21,0	703,1	1,00003971	*	*	*
P2A	P2	38305,73	10:54	21,0	22,3	703,1	1,00004149	38307,32	-21,06	38307,31

Tabela 6.2.4 – Cálculo da distância reduzida ao horizonte após a correção da distância inclinada pela constante meteorológica – 2ª Série de leitura.

2ª Série de Varredura - Cálculo de Cm e redução ao horizonte										
Pilares		Di (mm)	Hora Local	t °C	t' °C	Pressão mmHg	Cm	Dm (mm)	DN (mm)	Dh (mm)
TLS	Esfera									
P0	P1A	4951,80	12:43	25,3	24,3	701,4	1,00004586	4952,02	-13,31	4952,01
P0	P1	19629,94	12:34	25,2	24,2	701,6	1,00004569	19630,83	-77,76	19630,68
P0	P2A	29799,46	12:23	25,5	24,5	701,6	1,00004596	29800,83	-60,65	29800,77
P0	P2	*	12:10	24,8	25,0	702,0	1,00004524	*	*	*
P1A	P1	14679,88	11:58	22,9	24,7	702,4	1,00004346	14680,52	-52,34	14680,43
P1A	P2A	24841,66	11:49	21,5	24,5	702,4	1,00004225	24842,71	-56,13	24842,64
P1A	P2	*	11:41	21,5	24,7	702,4	1,00004225	*	*	*
P1	P2A	10195,24	11:30	19,6	22,5	702,8	1,00004041	10195,65	-11,60	10195,65
P1	P2	*	11:22	20,0	22,5	702,8	1,00004076	*	*	*
P2A	P2	38305,73	11:09	20,2	23,4	702,8	1,00004096	38307,30	-13,54	38307,29

Em seguida realizou-se o ajustamento por MMQ para a determinação do erro de zero ou constante aditiva e o erro de escala. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.2.5 abaixo.

Tabela 6.2.5 – Resultados da calibração em linha de base EDM para o scanner Faro Photon 80.

Laser Scanner Faro Photon 80	
Erro de Zero z_0 (mm)	10,21
Fator de Escala m	0,99966
A – Amplitude do erro cíclico (mm)	1,59711
B – Comprimento relativo ao ângulo de fase inicial do erro cíclico (mm)	153,29
Sigma Posteriori $\hat{\sigma}_0^2$	1,00
Estatística χ_c^2	12,00
Limite Inferior (95% significância)	4,40
Limite Superior (95% significância)	23,34

Observando-se os resultados verifica-se que o erro de zero ficou bem acima da especificação do fabricante (2 mm), bem como o erro de escala correspondente a 34 ppm. Este erro maior que o esperado se justifica devido à distância entre os pilares serem grandes e o scanner não possuir resolução suficiente para determinação precisa do centro da esfera a partir da nuvem, principalmente nas distâncias maiores, o que pode ser constatado nas observações de campo que foram utilizadas no ajustamento. Utilizando-se os parâmetros A e B do erro cíclico e

a equação 5.2.3.6, obtêm-se os valores do erro cíclico para cada uma das distâncias padrões, os quais estão apresentados na Tabela 6.2.6 a seguir.

Tabela 6.2.6 – Cálculo do erro cíclico para o scanner Faro Photon 80.

Alinhamento	DH (mm)	Erro Cíclico (mm)
P0_P1A	4967,0	-0,61
P0_P1	19618,9	-1,00
P0_P2A	29808,4	-0,09
P0_P2	68166,2	X
P1A_P1	14651,9	0,87
P1A_P2A	24841,4	-0,06
P1A_P2	63199,2	X
P1_P2A	10189,5	1,42
P1_P2	48547,3	X
P2A_P2	38357,8	1,59

Assim como na determinação do erro de zero verifica-se que os valores inerentes ao erro cíclico também se encontram muito elevados mostrando que a metodologia não ficou adequada para o estudo do scanner Faro Photon 80.

Com o objetivo de avaliar melhor esta metodologia foi utilizado um novo equipamento, o laser scanner Stonex X300 com maior autonomia de alcance, segundo as especificações do fabricante apresentadas no item 3.3, este equipamento possui um alcance de até 300 metros.

6.2.2. Determinação dos parâmetros de calibração do TLS Stonex X300

Neste experimento optou-se pela utilização de alvos planos em virtude da dificuldade encontrada no experimento anterior quando se utilizaram os alvos esféricos. A Figura 6.2.1 ilustra os novos alvos utilizados

Figura 6.2.1 – Alvos Planos utilizados para as medições de distâncias entre pilares com o scanner Stonex X300.

Realizada a coleta de dados, utilizou-se o software de processamento *Stonex 3D Reconstructor* para o processamento da nuvem de pontos e a obtenção das coordenadas dos alvos. Em seguida foram determinadas as distâncias horizontais para uso no ajustamento. Em virtude de o equipamento possuir um sensor de temperatura e pressão, as medidas de distâncias obtidas já se encontravam corrigidas dos efeitos climáticos.

A Tabela 6.2.7 a seguir mostram as coordenadas obtidas para cada um dos alvos planos nas diferentes linhas de base. Convém lembrar que as coordenadas do centro do scanner possuem o valor zero nos três eixos.

Tabela 6.2.7 – Coordenadas obtidas para o centro dos alvos planos de referência e cálculo das distâncias inclinada e horizontal entre os pilares para o scanner Stonex X300.

Varredura scanner Stonex X300 – Cálculo da distância inclinada						
Pilares		Coordenadas de Centro da Esfera em (mm)			DI (mm)	DH (mm)
TLS	Esfera	x	y	z		
P0	P1A	0,0263	4,9353	-0,1101	4,9366	4,9353
P0	P1	0,0261	19,5920	-0,1061	19,5923	19,5920
P0	P2A	0,0208	29,7794	-0,0915	29,7795	29,7794
P0	P2	0,0330	68,1400	0,0219	68,1400	68,1400
P1A	P1	-0,2445	14,6539	-0,1136	14,6564	14,6559
P1A	P2A	-0,4103	24,8366	-0,0945	24,8402	24,8400
P1A	P2	-1,0378	63,1793	0,0343	63,1878	63,1878
P1	P2A	-0,0560	10,1773	-0,0921	10,1779	10,1775
P1	P2	-0,2395	48,5113	0,0075	48,5119	48,5119
P2A	P2	-0,5022	38,3232	0,0421	38,3265	38,3265

Após a realização do ajustamento por MMQ para a determinação dos parâmetros de calibração, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 6.2.8 abaixo.

Tabela 6.2.8 – Resultados da calibração em linha de base EDM para o scanner Stonex X300.

Laser Scanner Stonex X300	
Erro de Zero z_0 (mm)	-15,76
Fator de Escala m	0,99986
A – Amplitude do erro cíclico (mm)	0,32929
B – Comprimento relativo ao ângulo de fase inicial do erro cíclico (mm)	423,33
Sigma Posteriori $\hat{\sigma}_0^2$	1,00
Estatística χ_c^2	8,00
Limite Inferior (95% significância)	2,18
Limite Superior (95% significância)	17,53

A partir dos parâmetros A e B determinaram-se os valores do erro cíclico para cada uma das distâncias padrão, obtendo-se os resultados da tabela 6.2.9 a seguir.

Tabela 6.2.9 – Cálculo do erro cíclico para o scanner Stonex X300.

Alinhamento	DH (mm)	Erro Cíclico (mm)
P0_P1A	4967,0	-0,31
P0_P1	19618,9	-0,30
P0_P2A	29808,4	0,17
P0_P2	68166,2	-0,23
P1A_P1	14651,9	0,06
P1A_P2A	24841,4	0,15
P1A_P2	63199,2	0,32
P1_P2A	10189,5	-0,08
P1_P2	48547,3	0,28
P2A_P2	38357,8	-0,13

Observando-se os resultados obtidos e considerando-se que haviam distâncias entre os pilares acima de 50 metros, podemos entender que os resultados foram satisfatórios e se aproximam das especificações nominais fornecidas pelo fabricante, conforme apresentado na Tabela 3.3.1. Destaca-se ainda o fator de escala obtido que corresponde ao valor de 14 ppm.

6.3. CALIBRAÇÃO DE TLS UTILIZANDO UMA PLACA DE ESFERAS 3D.

Inicia-se a apresentação e discussão dos resultados deste experimento avaliando-se a precisão na determinação das coordenadas do centro de cada esfera e cada posição j do scanner. Para isso, fez-se uma análise comparativa de todas as possíveis distâncias entre as esferas obtidas da nuvem de pontos em relação às distâncias nominais. Os valores das coordenadas nominais do centro de cada esfera foram apresentados na Tabela 5.3.2. As distâncias nominais entre cada par de esferas foram apresentadas na Tabela 5.3.3. Na Tabela 6.3.1 tem-se um exemplo de coordenadas do centro das esferas obtidas a partir da nuvem de pontos.

Tabela 6.3.1 – Coordenadas nominais para o centro de cada esfera coletadas com a configuração de resolução de 1:2 para a distância de 1 metro.

Esfera	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
ESF01	-399,956	100,023	5,090
ESF02	-249,957	100,066	5,023
ESF03	-99,913	100,089	4,970
ESF04	-400,115	250,013	5,398
ESF05	-250,014	250,091	4,910
ESF06	-100,027	250,097	4,962
ESF07	-400,066	400,095	5,113
ESF08	-250,076	400,090	4,772
ESF09	-100,079	400,088	4,933

Na Tabela 6.3.2 apresenta-se um exemplo com as distâncias calculadas a partir da nuvem de pontos e suas respectivas discrepâncias em relação às distâncias nominais. As distâncias foram posicionadas acima da diagonal principal e as discrepâncias abaixo.

Tabela 6.3.2 – Distâncias (mm) calculadas entre o centro de cada par de esferas e as respectivas discrepâncias (mm) para a nuvem de pontos obtida com a configuração de resolução de 1:2 para a distância de 1 metro.

Esfera	ESF01	ESF02	ESF03	ESF04	ESF05	ESF06	ESF07	ESF08	ESF09
ESF01	0,000	152,601	304,228	153,392	219,241	340,963	306,239	343,526	432,636
ESF02	-2,602	0,000	151,649	215,145	154,674	215,977	342,152	306,846	342,414
ESF03	-4,185	-1,605	0,000	339,069	214,445	153,371	431,491	341,166	306,152
ESF04	-3,402	-2,938	-3,512	0,000	153,708	302,692	152,888	216,614	340,112
ESF05	-7,102	-4,649	-2,240	-3,606	0,000	148,994	217,098	152,212	213,402
ESF06	-5,583	-3,873	-3,363	-2,604	0,993	0,000	340,512	214,336	152,784
ESF07	-6,167	-6,667	-7,114	-2,805	-4,926	-5,068	0,000	154,574	305,440
ESF08	-8,110	-6,821	-5,681	-4,399	-2,213	-2,174	-4,584	0,000	150,958
ESF09	-8,412	-7,039	-6,153	-4,636	-1,318	-2,793	-5,453	-0,961	0,000

Para uma melhor visualização dos resultados obtidos para as demais distâncias e resoluções elaboraram-se os gráficos das Figuras 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3, 6.3.4, 6.3.5 e 6.3.6 mostrando a variação dos resultados para cada situação.

Figura 6.3.1 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 1 metro.

Figura 6.3.2 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 3 metros.

Figura 6.3.3 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 5 metros.

Figura 6.3.4 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 10 metros.

Figura 6.3.5 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 15 metros.

Figura 6.3.6 – Discrepâncias (m) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 20 metros.

Observando-se os gráficos apresentados, verifica-se que à medida em que se aumenta a distância de varredura, a resolução não se mostrou suficiente para definição das esferas, não permitindo assim a avaliação do método proposto nas resoluções de 1:10 para a distância de 10 metros e 1:10, 1:8, 1:5 e 1:4 para as distâncias de 15 e 20 metros. Para a distância de 25 metros não foi possível a definição precisa das esferas em nenhuma das resoluções disponíveis no TLS.

De maneira geral observa-se que as variações nas discrepâncias aumentam à medida em que aumenta a distância de varredura mostrando que esta metodologia permite avaliar a qualidade da nuvem de pontos obtida nas diferentes situações.

Visando calcular a acurácia das coordenadas dos centros das esferas obtidas a partir da nuvem de pontos, utilizou-se a equação 5.1.3.2, permitindo assim o cálculo em função das distâncias entre cada par de esferas. As Figuras 6.3.7 a 6.3.12 mostram a distribuição da acurácia calculada para cada distância e cada uma das resoluções utilizadas.

Figura 6.3.7 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 1 m.

Figura 6.3.8 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 3 m.

Nestas duas primeiras resoluções verifica-se que a acurácia para a distância de 3 metros foi em média menor que para a distância de 1 metro. Uma das causas pode estar relacionada a uma melhor configuração geométrica nesta distância permitindo um ângulo de incidência mais favorável. A seguir têm-se as distribuições para as demais distâncias.

Figura 6.3.9 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 5 m.

Para a distância de 5 metros percebe-se um aumento no valor da acurácia média à medida que se diminui a resolução, comprovando a degradação decorrente da diminuição da quantidade de pontos para definição das esferas.

Figura 6.3.10 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 10 m.

Figura 6.3.11 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 15 m.

Figura 6.3.12 – Acurácia das coordenadas das esferas – TLS a 20 m.

Os valores das acurácias médias e respectivos desvios padrões para cada distância e resolução são apresentados na Tabela 6.3.3 a seguir.

Tabela 6.3.3 – Acurácia e respectivo desvio padrão médio calculados para cada distância e resolução.

Distância	Scanner a 1 Metro						Scanner a 3 Metros					
Resolução	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10
Média (mm)	-	3,1	2,7	2,8	2,9	2,8	-	1,7	1,8	1,8	1,6	1,6
Desvio (mm)	-	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	-	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
	Scanner a 5 Metros						Scanner a 10 Metros					
	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10
Média (mm)	-	1,8	1,8	1,9	2,1	3,1	-	1,6	2,1	1,5	5,1	X
Desvio (mm)	-	1,3	1,3	1,5	1,8	2,1	-	1,3	1,8	1,2	3,2	X
	Scanner a 15 Metros						Scanner a 20 Metros					
	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10
Média (mm)	1,8	2,1	X	X	X	X	2,8	3,4	X	X	X	X
Desvio (mm)	1,3	1,5	X	X	X	X	2,5	2,1	X	X	X	X

Observando-se os valores das acurácias médias apresentados na Tabela 6.3.3, verifica-se que não há uma influência significativa da distância de varredura nos resultados obtidos, evidenciando que a metodologia de cálculo atendeu as expectativas uma vez que os valores se aproximaram da especificação nominal do fabricante para determinação de distâncias (2 mm). O que se observa na maioria dos casos quando se diminuía a resolução, foi o aumento na acurácia média, o que pode ser mais bem representado através do gráfico da Figura 6.3.13.

Figura 6.3.13 – Comportamento da acurácia média em função da distância e diferentes resoluções.

Realizadas as análises das distâncias entre as esferas realizaram-se os cálculos para avaliação da segunda metodologia proposta para análise dos dados de varredura coletados sobre a placa de esferas. Os cálculos necessários foram executados após a elaboração de uma rotina no software MATLAB® R2015a Versão 8.5.0.197613, visando facilitar a execução do ajustamento pelo MMQ.

Após o ajustamento obteve-se o cálculo da posição do scanner na estação j para cada distância e resolução propostas. Vale ressaltar que as coordenadas da posição do scanner referem-se à projeção ortogonal do centro do scanner sobre o sistema de referência da Placa de Esferas 3D conforme ilustra a Figura 6.3.14.

Figura 6.3.14 – Sistema de Eixos da Placa de Esferas 3D.

FONTE: Foto do AUTOR.

Uma vez que as coordenadas para a posição do scanner foram consideradas como parâmetros no ajustamento pelo MMQ, obteve-se ainda a estimativa de precisão para estas coordenadas, que foram consideradas como sendo o erro do scanner em cada eixo. Para avaliar a qualidade do ajustamento aplicou-se o teste estatístico do qui-quadrado. Em função do posicionamento dos nove furos na placa de esferas foi possível a medição de nove observações de distâncias visando o cálculo de três parâmetros. Com isso o número de graus de liberdade será de $\nu = 9 - 3 = 6$. Considerando-se o número de graus de liberdade calculado e o valor $\alpha = 5\%$ de significância, obtém-se da tabela de distribuição estatística do qui-quadrado os seguintes valores para os limites superior e inferior:

$$\text{limite superior} \rightarrow \chi^2_{6;0,5\alpha} = 14,449 \quad (6.3.1)$$

$$\text{limite inferior} \rightarrow \chi^2_{6;1-0,5\alpha} = 1,237 \quad (6.3.2)$$

O resumo dos resultados obtidos após o ajustamento pelo MMQ é apresentado na Tabela 6.3.4 a seguir.

Tabela 6.3.4 – Coordenadas do centro do TLS na posição j, valores de desvios padrões correspondente a cada posição e resultado da estatística do qui-quadrado calculada.

Distância do TLS	Posição J do Scanner			Resolução	Desvio X (mm)	Desvio Y (mm)	Desvio Z (mm)	Estatística Xc
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
1 Metro	-299,3	-291,3	1955,7	1:2	8,3	8,3	2,4	✓ 3,319
	-298,8	-292,1	1956,1	1:4	6,8	6,8	1,9	✓ 2,247
	-296,5	-291,9	1956,7	1:5	6,6	6,6	1,9	✓ 2,102
	-296,1	-292,2	1957,0	1:8	6,8	6,8	1,9	✓ 2,255
	-295,9	-292,3	1957,4	1:10	6,0	6,0	1,7	✓ 1,729
3 Metros	-351,4	1119,0	3371,3	1:2	8,3	8,3	3,7	✓ 6,000
	-350,3	1123,1	3370,7	1:4	8,7	8,7	3,9	✓ 6,000
	-344,9	1126,3	3370,5	1:5	9,1	9,1	4,1	✓ 6,000
	-361,7	1111,9	3373,3	1:8	9,4	9,4	4,2	✓ 1,306
	-336,2	1125,3	3372,2	1:10	14,6	14,6	6,5	✓ 3,116
5 Metros	-505,4	2537,2	4746,7	1:2	23,9	23,9	14,5	✓ 3,706
	-488,0	2542,4	4746,6	1:4	22,5	22,5	13,7	✓ 3,277
	-499,9	2523,3	4755,6	1:5	30,8	30,8	18,6	✓ 6,155
	-499,9	2544,9	4743,3	1:8	22,5	22,5	13,7	✓ 3,270
	-499,0	2577,2	4724,2	1:10	27,9	27,9	17,2	✓ 5,031
10 Metros	-619,6	6125,6	8398,4	1:2	22,8	22,8	17,5	✓ 6,000
	-636,5	6138,9	8386,7	1:4	40,9	40,9	31,4	✓ 2,961
	-638,2	6095,0	8420,0	1:5	36,5	36,5	27,8	✓ 2,363
	-689,8	6170,3	8358,1	1:8	33,2	33,2	25,7	✓ 1,947
15 Metros	-267,5	9449,9	-11987,7	1:1	63,7	63,7	51,6	✓ 3,345
	-257,2	9524,0	-11930,9	1:2	50,7	50,8	41,7	✓ 2,125
20 Metros	-145,6	12789,2	-15725,7	1:1	120,4	120,4	99,9	✓ 6,754
	-401,5	12929,4	-15600,6	1:2	131,6	131,6	111,4	✓ 8,070

Observando-se os resultados apresentados verifica-se que a metodologia de cálculo proposta se adequa melhor quando o TLS está posicionado próximo à placa de esferas. Ainda assim os valores dos desvios padrões ficam bem superiores quando comparado à acurácia obtida no método de cálculo anterior. Para distâncias maiores, os valores dos desvios padrões calculados aumentam muito, levando-se ao entendimento que tais erros não são devidos aos erros provenientes do instrumento. Esta análise tem sua fundamentação baseada nos valores das discrepâncias entre as esferas analisadas anteriormente. Observando-se os gráficos das Figuras 6.3.1 a 6.3.6 verifica-se que os valores das diferenças não são tão altos quantos àqueles desvios apresentados nas observações realizadas com distâncias de 5, 10, 15 e 20 metros. Sendo assim, pode-se afirmar que a metodologia de cálculo proposta é recomendada apenas para distâncias curtas (< 5 metros) uma vez que o processo

de cálculo da posição do scanner é dependente da geometria dos pontos de controle (esferas) diminuindo-se a rigidez da rede à medida que se aumenta a distância.

Quanto à análise estatística, verifica-se que em todas as situações conseguiu-se a aceitação da hipótese básica, indicando a ausência de erros grosseiros ou *outliers*.

6.4. CALIBRAÇÃO DE TLS UTILIZANDO UM SISTEMA DE PLANOS PERPENDICULARES 3D

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos para o scanner Faro Photon 80 e ainda, como forma de validar a metodologia, os resultados para o scanner de referência Faro Focus 3D X330. Este último, por se tratar de um scanner novo e com pouquíssimo uso, deve apresentar valores de calibração mais próximos às especificações do fabricante, quando comparados com o scanner mais antigo.

6.4.1. Resultados de calibração do TLS Faro Photon 80

Finalizada a etapa de consolidação e registro de todas as cenas, obteve-se uma nuvem de pontos para cada face plana da peça de calibração, onde os valores observados para as coordenadas X, Y e Z em cada nuvem se aproximaram do valor zero. Uma vez que foram feitas varreduras a diferentes distâncias e com diferentes resoluções, calcularam-se algumas estatísticas descritivas para cada nuvem de pontos.

Uma medida de tendência central (média) procura sintetizar as informações da amostra em um único e informativo valor. Ao examinar uma distribuição amostral simétrica ou aproximadamente simétrica, nota-se que geralmente, eles são mais frequentes perto de um valor central e mais raros ao afastar-se deste. A obtenção deste valor central é de suma importância nos levantamentos amostrais.

Neste processo optou-se pelo cálculo dos valores de média aritmética, mediana, moda, variância amostral, desvio padrão amostral, máximo, mínimo, curtose, assimetria, amplitude, erro padrão da média e o coeficiente de variação.

Com o objetivo de eliminar possíveis erros grosseiros em cada amostra, adotou-se um critério de rejeição de possíveis observações atípicas (outliers), ou seja, valores muito discrepantes em relação ao conjunto de dados. Inicialmente determinaram-se os valores de probabilidade relativa à distribuição normal para valores até 8 desvios para mais ou para menos. Em seguida, em função do número de amostras de cada nuvem de pontos nos respectivos eixos, obteve-se o valor de desvio padrão para que apenas uma amostra ficasse fora do intervalo. Como critério de rejeição de valores observados, calcularam-se as estatísticas eliminando-se as

observações que apresentaram valores observados acima ou abaixo do valor médio mais ou menos o desvio padrão calculado. A Tabela 6.4.1 apresenta os valores de desvios calculados em função do número de amostras em cada nuvem de pontos.

Tabela 6.4.1 – Valores de desvios padrões correspondente a uma amostra, calculados em função do número total de observações – TLS Faro Photon 80

Resolução	Distâncias (m)	Desvio X (mm)	Desvio Y (mm)	Desvio Z (mm)	Amostras em X	Amostras em Y	Amostras em Z
1:1	15	4,08	4,10	3,53	22548	25044	2512
	20	3,75	3,95	3,28	5787	13150	994
	25	3,86	3,83	2,82	9088	7931	215
1:2	1	4,70	4,60	4,71	401748	248205	413131
	3	4,44	4,41	4,32	111932	93065	64354
	5	4,25	4,22	4,03	47535	42516	18313
	10	3,95	3,93	3,49	13101	11936	2173
	15	3,76	3,75	3,15	6040	5803	633
	20	3,61	3,60	2,68	3344	3254	141
	25	3,50	3,48	2,22	2237	2044	39
1:4	1	4,41	4,31	4,41	99420	62815	100625
	3	4,13	4,11	4,00	27766	25531	15963
	5	3,92	3,91	3,69	11848	11005	4598
	10	3,61	3,58	3,02	3343	3030	411
	15	3,41	3,38	2,66	1579	1397	134
1:5	1	4,31	4,21	4,33	63827	40131	67866
	3	4,02	3,98	3,88	17466	14904	9894
	5	3,81	3,79	3,57	7425	6811	2862
	10	3,49	3,45	2,60	2173	1808	112
1:8	1	4,10	3,99	4,11	24610	15369	25909
	3	3,79	3,74	3,64	6780	5681	3718
	5	3,58	3,54	3,30	2953	2585	1049
	10	3,22	3,19	1,94	814	733	20
1:10	1	4,00	3,89	4,01	15965	10214	17267
	3	3,67	3,63	3,52	4236	3658	2414
	5	3,45	3,42	3,15	1809	1667	641

Devido à grande quantidade de pontos na nuvem de cada plano, para o cálculo das estatísticas, desenvolveu-se um algoritmo de cálculo utilizando-se o software MATLAB® R2015a Versão 8.5.0.197613. O algoritmo permitiu a leitura dos arquivos textos em formato *.pts, exportados pelo software Faro Scene e os respectivos cálculos, bem como a geração do gráfico da distribuição normal

(histograma de frequências) para os três eixos. Abaixo seguem os resultados obtidos, onde o número de observações refere-se ao número efetivamente utilizado, após a eliminação das medidas eivadas de erros grosseiros.

Tabela 6.4.2 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 1 metro de distância – TLS Faro Photon 80.

Estatísticas	Resolução 1/2			Resolução 1/4			Resolução 1/5		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0.06	-0.02	0.51	0.07	-0.03	0.53	0.08	-0.02	0.45
Desvio Padrão	1.82	1.54	2.32	1.81	1.42	2.21	1.82	1.46	2.34
Variância	3.31	2.36	5.38	3.26	2.03	4.87	3.31	2.13	5.46
Máximo	5.40	4.60	6.90	5.40	4.20	6.60	5.40	4.30	7.00
Mínimo	-5.40	-4.60	-6.90	-5.40	-4.20	-6.60	-5.40	-4.30	-7.00
Moda	0.10	-0.10	0.90	0.60	0.00	0.60	0.50	-0.20	0.80
Mediana	0.10	0.00	0.60	0.10	0.00	0.60	0.10	0.00	0.50
Curtose	2.72	2.87	3.06	2.67	2.79	3.13	2.63	2.90	3.26
Assimetria	-0.11	0.03	-0.27	-0.13	0.04	-0.20	-0.13	0.08	-0.24
Amplitude	10.80	9.20	13.80	10.80	8.40	13.20	10.80	8.60	14.00
Erro Padrão	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Coef. de Variação	3014.30	-8388.70	452.79	2561.10	-4592.50	414.58	2323.00	-7969.10	524.74
Nº Observações	401750	248210	413130	99420	62815	100630	63827	40131	67866
Obs. Eliminadas	712	760	2595	175	186	861	93	216	630

Tabela 6.4.3 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 1 metro de distância – TLS Faro Photon 80.

Estatísticas	Resolução 1/8			Resolução 1/10		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0.11	0.01	0.47	0.11	0.09	0.43
Desvio Padrão	1.76	1.48	2.31	1.84	1.48	2.44
Variância	3.11	2.18	5.35	3.37	2.18	5.96
Máximo	5.20	4.40	6.90	5.50	4.40	7.30
Mínimo	-5.20	-4.40	-6.90	-5.50	-4.40	-7.30
Moda	0.40	0.00	0.50	0.30	-0.20	0.80
Mediana	0.20	0.00	0.50	0.20	0.10	0.50
Curtose	2.64	2.87	3.13	2.70	2.87	3.17
Assimetria	-0.11	0.05	-0.18	-0.13	0.11	-0.16
Amplitude	10.40	8.80	13.80	11.00	8.80	14.60
Erro Padrão	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Coef. de Variação	1550.50	17508.00	494.59	1635.10	1701.10	563.92
Nº Observações	24610	15369	25909	15965	10214	17267
Obs. Eliminadas	26	65	223	17	64	118

Tabela 6.4.4 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 3 metros de distância – TLS Faro Photon 80.

Estatísticas	Resolução 1/2			Resolução 1/4			Resolução 1/5		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0.03	0.03	0.13	0.00	0.05	0.12	0.00	0.04	0.18
Desvio Padrão	1.84	1.89	2.17	1.84	1.86	2.23	1.86	1.87	2.21
Variância	3.39	3.59	4.70	3.39	3.46	4.98	3.47	3.51	4.89
Máximo	5.50	5.60	6.40	5.50	5.50	6.60	5.50	5.60	6.40
Mínimo	-5.50	-5.60	-6.50	-5.50	-5.50	-6.60	-5.40	-5.60	-6.60
Moda	-0.30	-0.20	0.90	-0.20	-0.10	0.90	-0.30	0.20	0.50
Mediana	0.00	0.00	0.20	-0.10	0.00	0.20	-0.10	0.00	0.30
Curtose	2.77	2.75	2.47	2.79	2.72	2.52	2.77	2.76	2.57
Assimetria	0.11	0.07	-0.14	0.14	0.08	-0.12	0.12	0.05	-0.14
Amplitude	11.00	11.20	12.90	11.00	11.00	13.20	10.90	11.20	13.00
Erro Padrão	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
Coef. de Variação	5659.30	6860.20	1654.10	181560.00	4018.40	1801.30	-41659.00	4772.30	1250.80
Nº Observações	111930	93065	64353	27766	23531	15963	17466	14904	9894
Obs. Eliminadas	252	204	14	59	62	3	39	33	5

Tabela 6.4.5 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 3 metros de distância – TLS Faro Photon 80.

Estatísticas	Resolução 1/8			Resolução 1/10		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0.04	0.00	0.14	0.00	0.06	0.15
Desvio Padrão	1.85	1.84	2.45	1.85	1.92	2.55
Variância	3.41	3.39	6.00	3.42	3.68	6.50
Máximo	5.50	5.50	7.10	5.50	5.50	7.30
Mínimo	-5.40	-5.50	-7.20	-5.50	-5.70	-7.60
Moda	-0.10	0.10	0.00	-0.10	-0.60	0.20
Mediana	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20
Curtose	2.84	2.80	2.47	2.75	2.71	2.76
Assimetria	0.15	0.12	-0.09	0.07	0.20	-0.21
Amplitude	10.90	11.00	14.30	11.00	11.20	14.90
Erro Padrão	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.05
Coef. de Variação	4836.30	-46726.00	1756.10	-100230.00	3273.10	1699.60
Nº Observações	6780	5681	3718	4235	3658	2414
Obs. Eliminadas	12	19	1	9	13	0

Tabela 6.4.6 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 5 metros de distância – TLS Faro Photon 80.

Estatísticas	Resolução 1/2			Resolução 1/4			Resolução 1/5		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	-0.01	0.00	0.22	-0.04	-0.04	0.03	-0.01	0.09	-0.12
Desvio Padrão	1.74	1.91	2.46	1.73	1.89	2.52	1.69	1.92	2.72
Variância	3.04	3.63	6.07	2.99	3.58	6.34	2.85	3.70	7.42
Máximo	5.20	5.70	7.30	5.10	5.60	7.40	5.00	5.60	7.70
Mínimo	-5.20	-5.70	-7.30	-5.10	-5.50	-7.30	-5.00	-5.70	-7.90
Moda	-0.40	-0.10	-0.20	-0.20	-0.20	-0.40	0.40	0.40	-1.60
Mediana	0.00	0.00	0.10	0.00	-0.10	-0.10	0.00	0.10	-0.30
Curtose	2.81	2.69	2.62	2.75	2.73	2.60	2.80	2.65	2.58
Assimetria	0.01	-0.02	0.07	-0.01	-0.01	0.12	0.03	-0.04	0.16
Amplitude	10.40	11.40	14.60	10.20	11.10	14.70	10.00	11.30	15.60
Erro Padrão	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.05
Coef. de Variação	-17974.00	135320.00	1111.20	-4931.60	-5367.30	7726.30	-18124.00	2080.90	-2283.50
Nº Observações	47535	42516	18313	11848	11005	4598	7425	6811	2862
Obs. Eliminadas	173	67	19	44	25	10	30	7	6

Tabela 6.4.7 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 5 metros de distância – TLS Faro Photon 80.

Estatísticas	Resolução 1/8			Resolução 1/10		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	-0.04	0.01	0.00	0.01	0.04	0.05
Desvio Padrão	1.77	1.96	2.98	1.81	1.98	3.27
Variância	3.14	3.85	8.88	3.27	3.94	10.71
Máximo	5.00	5.50	7.50	5.40	5.90	8.90
Mínimo	-5.30	-5.80	-8.60	-5.30	-5.10	-8.60
Moda	-0.50	-0.80	1.60	-0.60	-0.40	0.60
Mediana	0.00	0.00	0.10	-0.10	0.00	0.20
Curtose	2.85	2.71	2.57	2.85	2.82	2.80
Assimetria	-0.09	-0.01	-0.02	0.01	0.19	-0.02
Amplitude	10.30	11.30	16.10	10.70	11.00	17.50
Erro Padrão	0.03	0.04	0.09	0.04	0.05	0.13
Coef. de Variação	-3961.80	19121.00	89160.00	19695.00	4588.20	6327.10
Nº Observações	2953	2585	1049	1809	1667	641
Obs. Eliminadas	23	11	2	11	11	1

Tabela 6.4.8 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 10 metros de distância – TLS Faro Photon 80.

Estatísticas	Resolução 1/2			Resolução 1/4		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0.01	0.04	-0.28	0.00	0.10	0.08
Desvio Padrão	2.25	2.48	2.89	2.33	2.55	3.86
Variância	5.07	6.15	8.36	5.41	6.48	14.92
Máximo	6.70	7.40	8.60	6.80	7.60	10.90
Mínimo	-6.70	-7.40	-8.60	-6.60	-7.60	-8.50
Moda	-0.10	0.20	-1.80	1.40	1.10	-0.20
Mediana	0.00	0.10	-0.50	0.00	0.30	-0.20
Curtose	2.84	2.81	3.41	2.70	2.82	2.75
Assimetria	-0.06	-0.08	0.44	-0.01	-0.17	0.32
Amplitude	13.40	14.80	17.20	13.40	15.20	19.40
Erro Padrão	0.02	0.02	0.06	0.04	0.05	0.19
Coef. de Variação	18661.00	5923.50	-1038.80	350210.00	2638.20	5121.20
Nº Observações	13101	11936	2173	3343	3030	411
Obs. Eliminadas	45	38	36	30	8	0

Tabela 6.4.9 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 10 metros de distância – TLS Faro Photon 80.

Estatísticas	Resolução 1/5			Resolução 1/8		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0.08	0.20	-0.34	0.19	0.18	-0.28
Desvio Padrão	2.43	2.50	3.79	2.53	2.65	4.85
Variância	5.91	6.25	14.37	6.42	7.03	23.50
Máximo	7.10	7.50	6.70	7.50	7.70	8.70
Mínimo	-7.00	-7.40	-8.60	-7.00	-7.90	-9.40
Moda	-0.50	0.00	-0.70	-0.20	-0.30	-7.10
Mediana	0.10	0.20	-0.45	0.20	0.10	0.00
Curtose	2.78	2.89	2.15	2.96	2.99	2.39
Assimetria	0.04	-0.05	-0.09	0.11	0.13	-0.14
Amplitude	14.10	14.90	15.30	14.50	15.60	18.10
Erro Padrão	0.05	0.06	0.36	0.09	0.10	1.08
Coef. de Variação	3180.60	1250.50	-1111.40	1360.70	1446.20	-1731.30
Nº Observações	2172	1808	112	814	733	20
Obs. Eliminadas	97	30	0	16	32	0

Tabela 6.4.10 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 15 metros de distância – TLS Faro Photon 80.

Estatísticas	Resolução 1/1			Resolução 1/2			Resolução 1/4		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0.03	0.22	-0.04	-0.21	0.19	-0.12	-0.28	0.25	-0.34
Desvio Padrão	2.49	2.72	3.04	2.67	2.77	2.90	2.00	1.95	2.32
Variância	6.22	7.38	9.25	7.13	7.67	8.42	4.02	3.80	5.37
Máximo	7.30	8.10	9.10	7.80	8.30	8.30	5.00	5.50	5.90
Mínimo	-7.40	-8.10	-9.10	-7.90	-8.30	-8.70	-6.00	-5.70	-6.80
Moda	0.20	1.10	1.00	0.30	-1.10	-0.30	-0.10	-0.50	0.40
Mediana	0.10	0.30	0.10	-0.10	0.30	0.00	-0.10	0.30	-0.20
Curtose	2.85	2.89	2.76	2.85	2.93	2.79	2.86	2.89	2.64
Assimetria	-0.11	-0.18	-0.17	-0.10	-0.12	-0.17	-0.25	-0.17	-0.24
Amplitude	14.70	16.20	18.20	15.70	16.60	17.00	11.00	11.20	12.70
Erro Padrão	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.06	0.05	0.07
Coef. de Variação	9885.70	1243.40	-7689.50	-1301.30	1479.00	-2432.70	-723.83	767.80	-686.31
Nº Observações	19903	22281	21234	4372	5267	5235	1137	1270	1191
Obs. Eliminadas	77	86	32	24	6	25	9	2	1

Tabela 6.4.11 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 20 metros de distância – TLS Faro Photon 80.

Estatísticas	Resolução 1/1			Resolução 1/2		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0.00	0.58	-0.02	-0.26	0.14	0.09
Desvio Padrão	4.48	4.30	6.38	3.54	3.74	4.20
Variância	20.03	18.49	40.69	12.54	13.99	17.64
Máximo	12.60	12.90	14.30	10.00	11.20	12.20
Mínimo	-13.40	-12.90	-18.60	-10.40	-11.20	-11.10
Moda	-0.10	0.70	5.30	0.20	-1.50	-1.10
Mediana	0.20	0.60	1.70	-0.20	0.15	0.00
Curtose	2.82	2.89	2.24	2.79	2.82	2.60
Assimetria	-0.21	-0.07	-0.45	-0.05	-0.03	0.07
Amplitude	26.00	25.80	32.90	20.40	22.40	23.30
Erro Padrão	0.06	0.04	0.20	0.07	0.07	0.08
Coef. de Variação	116490.00	739.14	-35916.00	-1374.40	2650.30	4562.70
Nº Observações	5787	13150	994	2399	2842	2760
Obs. Eliminadas	61	84	3	11	4	4

Tabela 6.4.12 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 25 metros de distância – TLS Faro Photon 80.

Estatísticas	Resolução 1/1			Resolução 1/2		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0,63	1,08	1,32	0,11	1,02	0,15
Desvio Padrão	9,13	6,22	6,19	8,31	6,34	6,28
Variância	83,43	38,66	38,28	68,98	40,20	39,44
Máximo	36,60	24,50	13,50	31,20	24,60	13,80
Mínimo	-29,50	-21,90	-13,50	-28,70	-20,40	-12,40
Moda	-1,40	4,60	-8,40	2,20	2,00	-2,70
Mediana	0,80	1,20	2,30	0,40	1,40	-1,70
Curtose	3,55	3,06	2,42	2,86	3,06	3,02
Assimetria	0,17	-0,07	-0,51	-0,18	-0,13	0,46
Amplitude	66,10	46,40	27,00	59,90	45,00	26,20
Erro Padrão	0,10	0,07	0,42	0,18	0,14	1,01
Coef. de Variação	1460,60	575,36	468,05	7576,40	620,59	4151,20
Nº Observações	9070	7928	215	2224	2031	39
Obs. Eliminadas	18	3	0	13	13	0

Observando-se os resultados apresentados verifica-se que para as distâncias de 10, 15, 20 e 25 metros não foi possível a obtenção de dados em todas as resoluções, uma vez que não havia pontos suficientes em todas as faces, impossibilitando a geração dos planos necessários para a consolidação e registro da nuvem de pontos na nova referência. Com o objetivo de avaliar se os dados observados apresentaram uma distribuição normal, geraram-se os histogramas de frequências bem como os gráficos *quantil-quantil plot* ou *q-q plot*. Como exemplo, os gráficos obtidos para dois casos (curta e longa distância) são apresentados nas Figuras 6.4.1 e 6.4.2 a seguir.

Figura 6.4.1 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos em varredura realizada à distância de 1 metro com resolução de 1/2.

Figura 6.4.2 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos em varredura realizada à distância de 25 metros com resolução de 1/1.

Figura 6.4.3 – Histogramas de frequências obtidos para os três eixos em varredura realizada à distância de 1 metro com resolução de 1/2.

Figura 6.4.4 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varredura realizada à distância de 1 metro com resolução de 1/2.

Figura 6.4.5 – Histogramas de frequências obtidos para os três eixos em varredura realizada à distância de 20 metros com resolução de 1/1.

Figura 6.4.6 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varredura realizada à distância de 25 metros com resolução de 1/1.

O gráfico qq-plot possui seus eixos construídos de forma a visualizar um contraste entre os quantis teóricos de uma distribuição (sendo neste caso realizada a análise com a distribuição normal) com os quantis observados a partir do conjunto de dados coletados. Quanto mais os pontos se aproximam da reta de 45° (em vermelho), mais próxima é a distribuição dos dados em relação à distribuição estudada. Diante desta análise, percebe-se que a maioria dos valores observados apresentam o comportamento referente a uma distribuição normal, indicando fortes indícios de que os resíduos são normais. Avaliando-se os gráficos *quantil-quantil plot* obtidos a partir das diferentes nuvens, a maioria apresenta um comportamento favorável com indícios de referência à uma distribuição normal. Apenas para o eixo Z percebe-se em alguns casos de varreduras obtidas nas distâncias de 15, 20 e 25 metros uma fuga nos extremos. Este comportamento sugere a possibilidade de ocorrência de uma mistura de distribuições, que também pode ser observada a partir da análise dos histogramas de frequências (Figura 6.4.5).

De posse dos valores de desvio padrão amostral para cada distância de varredura e para cada resolução, gerou-se um gráfico apresentando a variação dos valores obtidos para cada eixo em função da distância de varredura.

Figura 6.4.7 – Desvios padrões obtidos para o Eixo X nas diferentes varreduras.

Figura 6.4.8 – Desvios padrões obtidos para o Eixo Y nas diferentes varreduras.

Figura 6.4.9 – Desvios padrões obtidos para o Eixo Z nas diferentes varreduras.

Observando-se os resultados obtidos nas diferentes resoluções e distâncias de varreduras verifica-se que a metodologia proposta conseguiu indicar uma precisão entre 2 mm e 3 mm para os eixos X e Y nas distâncias de 1, 3, 5, 10 e 15 metros de varredura, correspondendo portanto à precisão nominal esperada para o instrumento. Nas distâncias de 20 e 25 metros encontraram-se desvios entre 4 mm e 6mm, evidenciando a influência da distância na qualidade da nuvem de pontos.

No eixo Z, observaram-se valores entre 2 mm e 3 mm para as distâncias de 1, 3 e 5 m de varredura. À medida que se aumentou a distância do TLS para o sistema de aferição, verificou-se um erro maior para o eixo Z, chegando-se a um

valor em torno de 6 mm nas distâncias de 10, 15, 20 e 25 metros. Uma explicação para estas variações significativas nas distâncias maiores refere-se ao fato do plano Z estar na posição horizontal, o que acarreta um menor ângulo de incidência do feixe laser e consequentemente maior dispersão, comprometendo assim a qualidade posicional da nuvem de pontos. Uma proposta para verificar esta possível causa foi realizar uma nova varredura da peça para as distâncias de 15, 20 e 25 metros posicionando-a com uma inclinação de 45° em relação ao plano horizontal utilizando-se o mesmo suporte para o método da placa de esferas 3D. Com isso foi possível otimizar o ângulo de incidência do feixe laser.

Após o processamento dos dados e cálculo das novas estatísticas geraram-se novamente os gráficos com as variações dos desvios padrões para as três distâncias avaliadas, obtendo-se os resultados apresentados nas Figuras 6.4.10, 6.4.11 e 6.4.12 a seguir.

Figura 6.4.10 – Novos desvios padrões obtidos para o Eixo X nas diferentes varreduras – peça inclinada.

Figura 6.4.11 – Novos desvios padrões obtidos para o Eixo Y nas diferentes varreduras – peça inclinada.

Figura 6.4.12 – Novos desvios padrões obtidos para o Eixo Z nas diferentes varreduras – peça inclinada.

Como exemplo, os gráficos *quantil-quantil plot* e das curvas de distribuição normal para os três eixos nas distâncias de 15, 20 e 25 metros utilizando-se a resolução de 1:2 são apresentados nas Figuras 6.4.13 a 6.4.18 a seguir.

Figura 6.4.13 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 15 metros com resolução de 1/2.

Figura 6.4.14 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 20 metros com resolução de 1/2.

Figura 6.4.15 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 25 metros com resolução de 1/2.

Figura 6.4.16 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 15 metros com resolução de 1/2.

Figura 6.4.17 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 20 metros com resolução de 1/2.

Figura 6.4.18 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos em varredura da peça inclinada realizada à distância de 25 metros com resolução de 1/2.

Observando-se os gráficos apresentados percebe-se que a melhoria fica evidente, pois foi possível a varredura em resoluções menores nas quais antes da inclinação da peça não foi possível obter nuvem suficiente para a consolidação e registro. Para a distância de 15 metros obtiveram-se dados extras para as resoluções de 1/5, 1/8 e 1/10; na distância de 20 metros dados para as resoluções de 1/4 e 1/5 e na distância de 25 metros, dados extras na resolução de 1/4. O mesmo se diz quanto à melhoria dos valores dos desvios padrões obtidos que passaram a apresentar valores médios entre 3 e 4 mm.

Outra metodologia adotada para avaliar a normalidade dos dados foi realizar testes isolados sobre os valores de assimetria (S_k) e curtose (K). Segundo Ramos (1999), pode-se utilizar como indicativo de que os dados amostrais seguem uma distribuição normal, os valores de assimetria dentro do intervalo $-0,5 \leq S_k \leq 0,5$ e de curtose entre os limites $2,5 \leq K \leq 3,5$. Após esta análise obteve-se a seguinte tabela com os resultados para as diferentes amostras:

Tabela 6.4.13 – Avaliação dos valores de assimetria e curtose para as diferentes amostras.

Varreduras	Assimetria ($-0,5 < Sk < 0,5$)			Curtose ($2,5 < K < 3,5$)		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Dist. 1m - Resolução 1/2	✓ -0.11	✓ 0.03	✓ -0.27	✓ 2.72	✓ 2.87	✓ 3.06
Dist. 1m - Resolução 1/4	✓ -0.13	✓ 0.04	✓ -0.20	✓ 2.67	✓ 2.79	✓ 3.13
Dist. 1m - Resolução 1/5	✓ -0.13	✓ 0.08	✓ -0.24	✓ 2.63	✓ 2.90	✓ 3.26
Dist. 1m - Resolução 1/8	✓ -0.11	✓ 0.05	✓ -0.18	✓ 2.64	✓ 2.87	✓ 3.13
Dist. 1m - Resolução 1/10	✓ -0.13	✓ 0.11	✓ -0.16	✓ 2.70	✓ 2.87	✓ 3.17
Dist. 3m - Resolução 1/2	✓ 0.11	✓ 0.07	✓ -0.14	✓ 2.77	✓ 2.75	✗ 2.47
Dist. 3m - Resolução 1/4	✓ 0.14	✓ 0.08	✓ -0.12	✓ 2.79	✓ 2.72	✓ 2.52
Dist. 3m - Resolução 1/5	✓ 0.12	✓ 0.05	✓ -0.14	✓ 2.77	✓ 2.76	✓ 2.57
Dist. 3m - Resolução 1/8	✓ 0.15	✓ 0.12	✓ -0.09	✓ 2.84	✓ 2.80	✗ 2.47
Dist. 3m - Resolução 1/10	✓ 0.07	✓ 0.20	✓ -0.21	✓ 2.75	✓ 2.71	✓ 2.76
Dist. 5m - Resolução 1/2	✓ 0.01	✓ -0.02	✓ 0.07	✓ 2.81	✓ 2.69	✓ 2.62
Dist. 5m - Resolução 1/4	✓ -0.01	✓ -0.01	✓ 0.12	✓ 2.75	✓ 2.73	✓ 2.60
Dist. 5m - Resolução 1/5	✓ 0.03	✓ -0.04	✓ 0.16	✓ 2.80	✓ 2.65	✓ 2.58
Dist. 5m - Resolução 1/8	✓ -0.09	✓ -0.01	✓ -0.02	✓ 2.85	✓ 2.71	✓ 2.57
Dist. 5m - Resolução 1/10	✓ 0.01	✓ 0.19	✓ -0.02	✓ 2.85	✓ 2.82	✓ 2.80
Dist. 10m - Resolução 1/2	✓ -0.06	✓ -0.08	✓ 0.44	✓ 2.84	✓ 2.81	✓ 3.41
Dist. 10m - Resolução 1/4	✓ -0.01	✓ -0.17	✓ 0.32	✓ 2.70	✓ 2.82	✓ 2.75
Dist. 10m - Resolução 1/5	✓ 0.04	✓ -0.05	✓ -0.09	✓ 2.78	✓ 2.89	✗ 2.15
Dist. 10m - Resolução 1/8	✓ 0.11	✓ 0.13	✓ -0.14	✓ 2.96	✓ 2.99	✗ 2.39
Dist. 15m - Resolução 1/1	✓ -0.10	✓ -0.14	✓ 0.20	✓ 2.77	✓ 2.93	✓ 3.22
Dist. 15m - Resolução 1/2	✓ -0.03	✓ -0.03	✓ -0.40	✓ 2.79	✓ 2.85	✓ 3.06
Dist. 15m - Resolução 1/4	✓ -0.14	✓ -0.03	✓ 0.01	✓ 2.81	✓ 2.91	✓ 2.50
Dist. 20m - Resolução 1/1	✓ -0.21	✓ -0.07	✓ -0.45	✓ 2.82	✓ 2.89	✗ 2.24
Dist. 20m - Resolução 1/2	✓ -0.04	✓ 0.00	✓ -0.21	✓ 2.85	✓ 2.81	✗ 2.35
Dist. 25m - Resolução 1/1	✓ -0.10	✓ -0.09	✗ -0.51	✓ 2.78	✓ 2.79	✗ 2.42
Dist. 25m - Resolução 1/2	✓ -0.18	✓ -0.18	✓ 0.46	✓ 2.66	✓ 2.78	✓ 3.02

Após a análise de assimetria é possível verificar que os dados coletados possuem um comportamento referente a uma distribuição simétrica, considerando-se os limites estabelecidos. Nesta análise excetuam-se apenas os dados observados na resolução de 1/1 para o eixo Z na distância de 25 metros, com assimetria negativa, porém muito próxima do limite.

Avaliando-se os valores de curtose ou achatamento pode-se medir o grau de afilamento da curva relativamente à normal. As medidas de curtose permitem indicar a intensidade das frequências na vizinhança dos valores centrais, aproximando-se da média com valor zero. Uma curva leptocúrtica indica uma medida de curtose maior que a da distribuição normal. Observando-se os valores apresentados

percebe-se um maior grau de achatamento no eixo Z, indicando uma maior dispersão dos valores observados em torno da média, também verificado a partir da análise dos desvios encontrados para este eixo.

Em seguida gerou-se a nova tabela de valores de assimetria e curtose para os dados das novas varreduras realizadas com a peça inclinada. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.4.14 a seguir.

Tabela 6.4.14 – Avaliação dos valores de assimetria e curtose para as diferentes amostras após as novas varreduras com a peça inclinada.

Varreduras	Assimetria ($-0,5 < S_k < 0,5$)			Curtose ($2,5 < K < 3,5$)		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Dist. 15m - Resolução 1/1	✓ -0.11	✓ -0.18	✓ -0.17	✓ 2.85	✓ 2.89	✓ 2.76
Dist. 15m - Resolução 1/2	✓ -0.10	✓ -0.12	✓ -0.17	✓ 2.85	✓ 2.93	✓ 2.79
Dist. 15m - Resolução 1/4	✓ -0.25	✓ -0.17	✓ -0.24	✓ 2.86	✓ 2.89	✓ 2.64
Dist. 15m - Resolução 1/5	✓ -0.05	✓ -0.21	✓ -0.33	✓ 2.72	✓ 2.81	✓ 2.76
Dist. 15m - Resolução 1/8	✓ -0.24	✓ -0.40	✗ -0.51	✓ 2.78	✓ 2.88	✓ 2.80
Dist. 15m - Resolução 1/10	✓ 0.11	✓ -0.21	✓ -0.09	✓ 2.72	✓ 2.82	✓ 2.64
Dist. 20m - Resolução 1/1	✓ -0.21	✓ -0.07	✓ -0.45	✓ 2.82	✓ 2.89	✗ 2.24
Dist. 20m - Resolução 1/2	✓ -0.05	✓ -0.03	✓ 0.07	✓ 2.79	✓ 2.82	✓ 2.60
Dist. 20m - Resolução 1/4	✓ 0.30	✓ 0.07	✓ -0.08	✓ 2.98	✓ 2.76	✗ 2.42
Dist. 20m - Resolução 1/5	✓ -0.02	✓ -0.11	✓ -0.02	✓ 2.80	✓ 3.50	✓ 2.70
Dist. 25m - Resolução 1/1	✓ -0.05	✓ -0.05	✓ 0.02	✓ 2.80	✓ 2.82	✓ 2.81
Dist. 25m - Resolução 1/2	✓ -0.04	✓ -0.06	✓ 0.00	✓ 2.77	✓ 2.91	✓ 3.05
Dist. 25m - Resolução 1/4	✓ 0.02	✓ -0.21	✓ -0.23	✓ 2.65	✓ 3.00	✓ 2.77

Pode-se observar que na distância de 15 metros houve sucesso na análise para as resoluções de 1/1, 1/2 1/4, 1/5 e 1/10, o que havia ocorrido anteriormente apenas na resolução 1/1. Para a distância de 20 metros, houve sucesso nas resoluções de 1/2 e 1/5 para todos os eixos, e anteriormente não houve aprovação em nenhuma das resoluções. Por fim para a distância de 25 metros conseguiu-se aprovação para as resoluções de 1/1, 1/2 e 1/4, evidenciando-se assim a melhora significativa nos resultados após a adequação da inclinação da peça para a realização das varreduras.

6.4.2. Resultados de calibração do TLS Faro Focus 3D X330

Para mais um teste de validação da metodologia utilizou-se o novo scanner Faro Focus 3D X330 realizando as varreduras nas resoluções de 1/2, 1/5 e 1/10 para as distâncias de 1, 3 e 5 metros. Em seguida executaram-se os cálculos para obtenção das estatísticas após a eliminação dos possíveis erros grosseiros. Para a detecção de outliers realizou-se o cálculo, em função do número de amostras, dos valores de sigmas em que apenas uma amostra ficasse fora dos limites de uma distribuição normal. Em seguida aplicou-se o Método Dinamarquês modificado para detecção de possíveis erros grosseiros remanescentes. Neste método, utilizam-se as observações como sendo os resíduos e calcula-se o desvio padrão em cada eixo, aplicando-se a equação 5.1.2.8. Os resultados são apresentados na Tabela 6.4.15 abaixo e o número de observações eliminadas, bem como as demais estatísticas nas Tabelas 6.4.16 a 6.4.18 a seguir.

Tabela 6.4.15 – Valores de desvios padrões correspondente a uma amostra, calculados em função do número total de observações – TLS Faro Focus 3D X330.

Resolução	Distâncias (m)	Desvio X (mm)	Desvio Y (mm)	Desvio Z (mm)	Amostras em X	Amostras em Y	Amostras em Z
1:2	1	4.52	4.64	4.68	164550	295810	364340
	3	4.27	4.50	4.40	53215	152500	95407
	5	4.41	4.46	4.28	101250	126210	54176
1:5	1	4.46	4.50	4.50	124280	152660	147480
	3	3.85	4.09	3.99	8863	23572	15548
	5	4.00	4.05	3.84	16495	19900	8467
1:10	1	4.16	4.20	4.19	32211	38618	36351
	3	3.49	3.74	3.64	2109	5667	3719
	5	3.65	3.70	3.48	3891	4870	2054

Tabela 6.4.16 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 1 metro de distância – TLS Faro Focus 3D X330.

Estatísticas	Resolução 1/2			Resolução 1/5			Resolução 1/10		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	-0.44	0.00	0.12	0.04	0.02	-0.08	0.03	0.00	-0.27
Desvio Padrão	0.82	0.25	0.41	0.94	0.39	0.59	0.68	0.45	1.03
Variância	0.68	0.06	0.17	0.88	0.15	0.35	0.46	0.21	1.05
Máximo	2.00	0.70	1.20	2.30	1.10	1.70	2.00	1.30	2.90
Mínimo	-2.40	-0.70	-1.20	-2.80	-1.10	-1.70	-2.00	-1.30	-3.00
Moda	0.00	0.00	0.10	0.00	0.10	-0.20	0.30	0.00	-0.60
Mediana	-0.30	0.00	0.10	0.10	0.00	-0.10	0.00	0.00	-0.30
Curtose	2.08	2.80	2.56	2.55	2.79	2.60	3.34	2.85	2.51
Assimetria	-0.12	0.02	-0.01	-0.29	-0.24	-0.17	0.32	-0.19	-0.12
Amplitude	4.40	1.40	2.40	5.10	2.20	3.40	4.00	2.60	5.90
Erro Padrão	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Coef. de Variação	-188.34	-13151.00	353.63	2354.50	2249.00	-756.84	2345.10	9451.60	-385.59
Nº Observações	164550	295810	364340	124280	152660	147480	32211	38618	36351
Descartados	200	773	3751	87	1017	5435	204	162	507

Tabela 6.4.17 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 3 metros de distância – TLS Faro Focus 3D X330.

Estatísticas	Resolução 1/2			Resolução 1/5			Resolução 1/10		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0.18	0.11	-0.01	0.61	0.10	-0.01	0.17	0.05	0.03
Desvio Padrão	3.54	0.46	0.79	3.72	0.31	0.78	2.79	0.97	0.55
Variância	12.53	0.21	0.62	13.83	0.10	0.61	7.79	0.94	0.30
Máximo	8.60	1.30	1.90	9.70	0.90	1.70	6.60	2.50	1.10
Mínimo	-10.60	-1.30	-2.30	-11.10	-0.90	-2.30	-8.30	-2.80	-1.60
Moda	4.00	0.20	0.50	2.60	0.10	0.60	1.20	0.70	0.50
Mediana	0.60	0.10	0.00	1.00	0.10	0.00	0.30	0.10	0.10
Curtose	3.00	2.66	2.25	3.14	2.82	2.12	3.19	2.21	2.51
Assimetria	-0.60	-0.15	-0.24	-0.50	-0.08	-0.19	-0.21	-0.20	-0.51
Amplitude	19.20	2.60	4.20	20.80	1.80	4.00	14.90	5.30	2.70
Erro Padrão	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.06	0.01	0.01
Coef. de Variação	2007.00	406.33	-10967.00	613.39	299.31	-9128.30	1628.70	1954.70	2120.00
Nº Observações	53215	152500	95407	8863	23572	15548	2109	5667	3719
Descartados	835	326	88	108	107	13	19	3	6

Tabela 6.4.18 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 5 metros de distância – TLS Faro Focus 3D X330.

Estatísticas	Resolução 1/2			Resolução 1/5			Resolução 1/10		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0.01	-0.03	0.04	0.04	0.01	0.01	0.02	-0.02	0.02
Desvio Padrão	0.40	0.48	0.38	0.38	0.47	0.40	0.37	0.47	0.47
Variância	0.16	0.23	0.15	0.14	0.22	0.16	0.14	0.22	0.22
Máximo	1.20	1.40	1.10	1.10	1.30	1.10	1.10	1.20	1.40
Mínimo	-1.20	-1.40	-1.10	-1.10	-1.40	-1.10	-1.10	-1.40	-1.40
Moda	0.20	0.20	0.00	0.20	0.20	0.00	0.20	0.30	0.00
Mediana	0.10	0.00	0.00	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00
Curtose	2.63	2.70	2.84	2.93	2.64	2.82	2.64	2.64	2.74
Assimetria	-0.36	-0.40	-0.17	-0.45	-0.34	-0.21	-0.38	-0.34	-0.04
Amplitude	2.40	2.80	2.20	2.20	2.70	2.20	2.20	2.60	2.80
Erro Padrão	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Coef. de Variação	2688.60	-1687.70	1044.40	965.75	5733.20	2824.40	1479.30	-2404.00	2095.50
Nº Observações	101250	126210	54176	16495	19900	8467	3891	4870	2054
Descartados	261	1071	264	381	38	45	2	44	12

Com o objetivo de avaliar a influência do ângulo de incidência do feixe laser nos resultados, realizou-se um posicionamento modificado para a peça na distância de 3 metros, onde os dados referentes ao eixo X foram observados a partir da face à direita em destaque na Figura 6.4.19 abaixo.

Figura 6.4.19 – Posicionamento do sistema de planos 3D visando um menor ângulo de incidência durante a varredura da peça realizada à distância de 3 metros.

Como consequência, pode-se observar um maior valor de desvio padrão justamente para este eixo na distância de 3 metros, conforme mostram os gráficos das Figuras 6.4.20 a 6.4.22 a seguir.

Figura 6.4.20 – Valores de desvios padrões obtidos para o Eixo X para as diferentes resoluções e distâncias de varredura – TLS Faro Focus 3D X330.

Figura 6.4.21 – Valores de desvios padrões obtidos para o Eixo Y para as diferentes resoluções e distâncias de varredura – TLS Faro Focus 3D X330.

Figura 6.4.22 – Valores de desvios padrões obtidos para o Eixo Z para as diferentes resoluções e distâncias de varredura – TLS Faro Focus 3D X330.

Para todos os demais eixos com observações coletadas em diferentes resoluções e distâncias os valores de desvios padrões apresentaram valores até 1 mm, evidenciando o melhor desempenho do TLS Faro Focus 3D X330, bem como validando a metodologia proposta, uma vez que eram esperados desvios menores em função do TLS ser novo e sem uso.

Para finalizar a análise dos dados realizou-se a avaliação dos valores de assimetria e curtose para as três diferentes resoluções e distâncias. Os resultados são apresentados na Tabela 6.4.19 a seguir.

Tabela 6.4.19 – Avaliação dos valores de assimetria e curtose para as diferentes amostras a partir das varreduras com o TLS Faro Focus 3D X330.

Varreduras	Assimetria ($-0,5 < Sk < 0,5$)						Curtose ($2,5 < K < 3,5$)					
	Eixo X		Eixo Y		Eixo Z		Eixo X		Eixo Y		Eixo Z	
Dist. 1m - Resolução 1/2	✓	-0.12	✓	0.02	✓	-0.01	✗	2.08	✓	2.80	✓	2.56
Dist. 1m - Resolução 1/5	✓	-0.29	✓	-0.24	✓	-0.17	✓	2.55	✓	2.79	✓	2.60
Dist. 1m - Resolução 1/10	✓	0.32	✓	-0.19	✓	-0.12	✓	3.34	✓	2.85	✓	2.51
Dist. 3m - Resolução 1/2	✗	-0.60	✓	-0.15	✓	-0.24	✓	3.00	✓	2.66	✗	2.25
Dist. 3m - Resolução 1/5	✗	-0.50	✓	-0.08	✓	-0.19	✓	3.14	✓	2.82	✗	2.12
Dist. 3m - Resolução 1/10	✓	-0.21	✓	-0.20	✗	-0.51	✓	3.19	✗	2.21	✓	2.51
Dist. 5m - Resolução 1/2	✓	-0.36	✓	-0.40	✓	-0.17	✓	2.63	✓	2.70	✓	2.84
Dist. 5m - Resolução 1/5	✓	-0.45	✓	-0.34	✓	-0.21	✓	2.93	✓	2.64	✓	2.82
Dist. 5m - Resolução 1/10	✓	-0.38	✓	-0.34	✓	-0.04	✓	2.64	✓	2.64	✓	2.74

7. CONCLUSÕES

Nesta dissertação foram apresentadas diferentes propostas para calibração e testes em Lasers Scanners Terrestres.

Foi proposto o uso de um modelo que inclui observações de coordenadas esféricas (distâncias e direções horizontais e verticais) para a auto-calibração de TLS. Foram modelados quatro parâmetros de calibração (Δ_ρ , Δ_C , Δ_θ e Δ_α) e testados dois diferentes scanners. O TLS Faro Focus 3D X330 foi utilizado como scanner de referência a fim de validar a metodologia e os resultados apresentados para todos os parâmetros foram ligeiramente menores e, portanto, mais preciso que as especificações estabelecidas pelo fabricante. A auto-calibração realizada no TLS Faro Photon 80 mostrou resultados que indicam que o scanner, por estar em uso há muito tempo, não apresentou o mesmo desempenho, onde os erros ficaram superiores aos indicados nas especificações do fabricante. Com isso conclui-se que a metodologia de auto-calibração de TLS proposta conseguiu indicar com confiabilidade os parâmetros de calibração dos dois TLS testados, mostrando-se um excelente método para avaliar as condições de precisão e acurácia em que se encontra o scanner. O refinamento do modelo matemático proposto incluindo-se novos parâmetros de correções sistemáticas adicionais, conforme proposto por Lichti (2007), é um caminho para permitir o desenvolvimento de modelos de correções a serem aplicados a uma nuvem de pontos, visando à obtenção de observações livres de erros sistemáticos inerentes ao TLS utilizado.

Uma segunda metodologia de avaliação de TLS proposta foi a utilização de linhas bases de calibração EDM para determinar e quantificar o erro de zero ou constante aditiva, o erro de escala e o erro cíclico de um scanner terrestre. Após os testes realizados, concluiu-se que a linha base de calibração deve ser cuidadosamente planejada a fim de permitir a calibração de diferentes equipamentos TLS, uma vez que a distância entre os pilares é um fator determinante nos resultados finais. A calibração efetuada no scanner Faro Photon 80 permitiu concluir que este equipamento possui deficiências na definição de pequenos objetos à medida que se aumenta a distância. Em distâncias maiores que 40 metros o equipamento não apresentou resolução suficiente para determinação dos alvos

esféricos utilizados para obtenção de todas as distâncias entre pilares. Com as observações obtidas nas linhas de base menores foi possível o ajustamento pelo MMQ e o cálculo dos três parâmetros, entretanto, os resultados obtidos indicaram a influência da dificuldade na determinação das coordenadas do centro dos alvos esféricos, não refletindo a mesma precisão alcançada pelo TLS em distâncias menores. Visando avaliar melhor a metodologia utilizou-se o TLS Stonex X300 que possui maior alcance. Os resultados para este novo instrumento foram satisfatórios e apresentaram valores próximos àqueles definidos pelo fabricante. Assim concluiu-se que a metodologia é confiável desde que a distância entre pilares esteja coerente com o alcance proposto pelo equipamento TLS a ser testado.

Visando o uso de metodologias de fácil utilização e que simplificasse o processo de aferição da acurácia tridimensional de um TLS realizou-se a proposta de utilização de duas peças pré-fabricadas. A primeira delas foi a utilização de uma placa de esferas 3D composta de nove furos para alojamento de nove esferas, fabricadas especialmente para aplicação do método, cujo raio foi aferido com precisão ao nível do centésimo de milímetro. A proposta de determinação da acurácia a partir das distâncias entre as esferas na nuvem de pontos, quando comparadas às distâncias nominais, mostrou-se um bom método de aferição tridimensional. Embora os cálculos da acurácia apresentados nas diferentes distâncias e resoluções não terem mostrado grandes oscilações, a metodologia proposta se mostrou eficiente quando realizadas medições em curtas distâncias, mostrando-se um método alternativo de fácil utilização e resultados rápidos. A segunda metodologia proposta de cálculo da posição do scanner a partir das coordenadas conhecidas das esferas não se mostrou eficiente, uma vez que os resultados são sensíveis à rigidez da rede formada entre os alvos de referência e a posição do scanner, aumentando-se os erros à medida que se aumentava a distância de varredura. Mesmo nas distâncias curtas, os resultados alcançados mostraram erros superiores àqueles determinados pela análise das distâncias entre as esferas.

Por fim, utilizou-se a segunda peça fabricada para calibração do TLS referente a um sistema de planos perpendiculares 3D. A metodologia proposta se mostrou eficiente e apresentou resultados coerentes com os erros calculados no

método de auto-calibração. Entretanto um fator determinante refere-se à incidência do feixe laser sobre os planos durante a varredura, onde ângulos de incidência muito agudos influenciam sobremaneira nos resultados, conforme foi mostrado durante a calibração do scanner de referência Faro Focus 3D X330. Assim a proposta de adequação do posicionamento da peça 3D conseguiu obter resultados satisfatórios e confiáveis, além da vantagem de ser um método de fácil implantação com rápidos resultados.

Como recomendações para trabalhos futuros sugere-se um estudo mais aprimorado do método de auto-calibração visando uma análise completa dos erros sistemáticos inerentes ao instrumento de forma a permitir o desenvolvimento de aplicações a serem utilizadas para a correção da nuvem de pontos. Com isso, após a determinação dos parâmetros de calibração do scanner será possível a correção da nuvem de pontos obtidas com o instrumento. Utilizando-se das metodologias propostas nesta dissertação é possível implantar um laboratório para a aferição e calibração sistemática de qualquer dispositivo de varredura laser scanner terrestre, sem a necessidade de envio do instrumento ao fabricante para avaliação de suas reais condições de uso e aplicabilidade.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACT, 2014. **EDM Calibration Handbook Edition 15**, Office of the Surveyor-General of the Australian Capital Territory, Australia, 30p.

AMANN, M.-C.; BOSCH, T.; LESCURE, M.; MYLLYLA, R.; RIOUX, M., 2001. **Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement**. Optical Engineering, Vol. 40 No. 1.

ANDREWS, L. C.; PHILLIPS, R. L., 1998. **Laser Beam Propagation through Random Media**. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington.

BAE, K. H., LICHTI, D.D., 2008. **A method for automated registration of unorganized point clouds**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 63, 36-54.

BARROS, W. S., 2002. **Implementação e validação de método comparativo de calibração de sistema por interferometria a laser para medição linear**. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico da PUC.

BOEHLER, W.; BORDAS, V.; MARBS, A., 2003. **Investigating Laser Scanner Accuracy** - The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, part 5/C15, pp696-701. Antalya.

COSARCA, C., JOCEA, A., SAVU, A., 2009. **Analysis of errors sources in terrestrial laser scanner**. Journal of Geodesy and Cadastre.

CHOW, J. C. K., LICHTI, D.D., TESKEY, W. F., 2010. **Self-calibration of the TRIMBLE (MENSI) GS200 terrestrial laser scanner**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK, 161-166.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R., 2003. **Sistema Laser Scanner: Conceitos e princípios de funcionamento**. Edição revisada, Curitiba, UFPR.

GEMAEL, C., 1994. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**, Curitiba, Editora da UFPR, 319p.

GONÇALES, R., 2007. **Dispositivo de varredura laser 3D terrestre e suas aplicações na Engenharia, com ênfase em túneis**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GRIPP, J. Jr., 1986 **Calibração de Distanciômetros Eletrônicos com medidas de campo**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

HANCOCK, J. A., 1999. **Laser Intensity-Based Obstacle Detection and Tracking**. PhD thesis, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania.

INGENSAND, H.; RYF, A.; SCHULZ, T., 2003. **Performances and Experiences in Terrestrial Laserscanning**. Proceedings of the 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques. Zürich.

INGENSAND, H., 2006. **Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology**. In Proceedings of the 3rd IAG Symposium of Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th. FIG Symposium on Deformation Measurements. May 22 – 24, Baden, Austria.

KAASALAINEN, S., KROOKS, A., KUKKO, A., KAARTINEN, H., 2009. **Radiometric calibration of terrestrial laser scanners with external reference targets**. Remote Sens. 2009, 1, 144–158.

KENNIE, T.J.M. PETRIE, G., 1999. **Engineering Surveying Technology**, 1^a edição, Blackie Academic & Professional – USA, Halsted Press.

KERSTEN, Th., STERNBERG, H. and MECHELKE, K., 2005. **Investigations into the accuracy behavior of the terrestrial laser scanning system MENSIGS 100**. In Optical 3-D Measurement Techniques VII, A. Grün / H. Kahmen (Eds.), pp. 122 – 131.

LATORRE, M.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; SHIMABUKURO, Y. E., 2002. **Correção Atmosférica: Conceitos e Fundamentos**. Espaço & Geografia, Vol.5, No 1, 153-178, ISSN: 1516-9375.

LICHTI, D.D.; STEWART, M.P.; TSAKIRI, M.; SNOW, A.J., 2000. **Calibration and testing of a terrestrial laser scanner**. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B5, 485-492.

LICHTI, D.D., 2007. **Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 61, 307-324.

LICHTI, D.D., 2008. **A method to test differences between additional parameter sets with a case study in terrestrial laser scanner self-calibration stability analysis**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 63, 169-180.

LICHTI, D.D., 2010. **Terrestrial laser scanner self-calibration: correlation sources and their mitigation**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65, 93-102.

LICHTI, D.D., CHOW, J., LAHAMY, H., 2011. **Parameter de-correlation and model-identification in hybrid-style terrestrial laser scanner self-calibration**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66, 317-326.

NETTO, N. P., 1997. **Campo de provas para instrumentos de medição e posicionamento**. Livre Docência. Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo.

QIANG, Z., WEI, W., 2009. **Calibration of laser scanning system based on a 2D ball plate**. Measurement 42, 963-968.

RAMOS, A.W, 1999. **Uma contribuição aos estudos de capacidade de máquina**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo. 298p.

RESHETYUK, Y., 2006. **Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners**. Licentiate thesis in Geodesy. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.

RESHETYUK, Y., 2010. **A unified approach to self-calibration of terrestrial laser scanning**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65, 445-456.

RICHTER, R., 1985. **Some aspects of the atmospheric radiance model of LOWTRAN 6**. International Journal of Remote Sensing, Vol. 6, Issue 11, 1773-1777.

RÜEGGER, J. M., 1996. **Electronic Distance Measurement**, fourth edition, Springer, Berlin.

SCHOFIELD, W., 1993. **Engineering Surveying**, 4ª edição, Butterworth-Heinemann Ltd.

SCHULZ, T., 2007. **Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy**. A dissertation submitted to ETH ZURICH for the degree of Doctor of Sciences.

SCHULZ, T., INGENSAND, H., 2004. **Terrestrial Laser Scanning – Investigations and Applications for High Precision Scanning**. In Proceedings of FIG Working Week. Athens, Greece, May 22 – 27.

SCHWENDENER, H. R., 1972. **Electronic Distancers for Short Ranges – Accuracy and Checking Procedures**. Survey Review, vol. 21, no. 164.

SOUDARISSANANE, S., LINDENBERGH, R., MENENTI, M., TEUNISSEN, P., 2011. **Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66, 389-399.

TOMMASELLI, A. M. G., 2004: **Um estudo sobre as técnicas de varredura a laser e fotogrametria para levantamentos 3D a curta distância**. Geodésia Online (UFSC).

VILLATE, J. E., 2012: **Física 2. Eletricidade e Magnetismo**. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. ISBN: 978-972-99396-2-4.

WEICHEL, H., 1990. **Laser Beam Propagation in the Atmosphere**. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington.

WOLF, P. R., 1969. **Horizontal position adjustment**. Surveying and mapping, v. XXIX, n. 4, p. 635-644, Dec. Washington.

WUTKE, J. D. 2006. **Métodos para avaliação de um sistema Laser Scanner terrestre**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

APÊNDICE A – Coordenadas dos alvos utilizadas na auto-calibração do TLS Faro Photon 80.

Alvo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Alvo	X (m)	Y (m)	Z (m)
A001	1002,2136	2001,6269	502,3605	A029	998,7417	2002,0435	500,3178
A002	1001,8303	2000,7798	502,4790	A030	999,4510	2002,7979	500,3360
A003	1001,0947	2000,0103	502,4833	A031	1000,3590	2003,3584	502,4875
A004	1000,4062	1999,2964	502,4364	A032	1001,2048	2003,0508	502,5189
A005	1002,2138	2001,6391	501,5289	A033	1001,8371	2002,4428	502,4681
A006	1001,8382	2000,7924	501,5317	A034	1000,3777	2003,3583	501,8132
A007	1001,1119	2000,0388	501,5536	A035	1001,1652	2003,1569	501,6330
A008	1000,4093	1999,3069	501,5558	A036	1001,8436	2002,4320	501,5517
A009	1002,2090	2001,6402	500,7047	A037	1000,3640	2003,3569	500,4944
A010	1001,8515	2000,8086	500,3611	A038	1001,1257	2003,1236	500,5145
A011	1001,1137	2000,0431	500,3778	A039	1001,7983	2002,4771	500,5379
A012	1000,4044	1999,3015	500,3697	A040	1000,9496	2002,1187	499,9988
A013	999,5985	1999,0295	502,4956	A041	999,5052	2001,9199	499,9987
A014	998,9793	1999,6206	502,5024	A042	1000,2184	2001,3510	500,0008
A015	998,0028	2000,5493	502,5066	A043	1000,9735	2000,7438	500,0018
A016	999,7383	1998,8975	501,5731	A044	X	X	X
A017	998,9625	1999,6416	501,6203	A045	X	X	X
A018	998,2320	2000,3398	501,5847	A046	1001,1286	2002,1361	502,7546
A019	999,5743	1999,0547	500,3446	A047	1001,5864	2001,6061	502,7541
A020	998,9564	1999,6460	500,3528	A048	999,7014	2002,3695	502,7502
A021	998,1860	2000,3839	500,3598	A049	1000,3286	2001,7577	502,7514
A022	998,0745	2001,3738	502,4644	A050	1001,1083	2000,9902	502,7521
A023	998,7335	2002,0593	502,4592	A051	999,0775	2001,6055	502,7518
A024	999,4242	2002,7700	502,4869	A052	999,6795	2001,1048	502,7530
A025	998,0949	2001,3861	501,5104	A053	1000,3572	2000,2611	502,7541
A026	998,7455	2002,0642	501,4743	A054	998,5149	2000,9543	502,7536
A027	999,4556	2002,8091	501,4698	A055	999,1938	2000,3430	502,7539
A028	998,1029	2001,3692	500,3432	A056	999,8577	1999,7359	502,7530

APÊNDICE B – Coordenadas dos alvos utilizadas na auto-calibração do TLS Faro Focus 3D X330.

Alvo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Alvo	X (m)	Y (m)	Z (m)
A001	8,0549	19,2820	52,3520	A029	10,7805	21,4723	50,3095
A002	7,7190	20,1488	52,4705	A030	10,8228	20,4385	50,3281
A003	7,6813	21,2116	52,4748	A031	10,5896	19,3965	52,4791
A004	7,6522	22,2028	52,4280	A032	9,7782	19,0075	52,5102
A005	8,0638	19,2737	51,5204	A033	8,9015	18,9809	52,4594
A006	7,7215	20,1342	51,5234	A034	10,5760	19,3840	51,8046
A007	7,6901	21,1791	51,5451	A035	9,8815	18,9621	51,6244
A008	7,6572	22,1935	51,5473	A036	7,8908	21,1741	49,9957
A009	8,0678	19,2761	50,6963	A037	10,5852	19,3941	50,4858
A010	7,7235	20,1131	50,3529	A038	9,8858	19,0126	50,5060
A011	7,6918	21,1749	50,3694	A039	8,4932	19,1476	49,9871
A012	7,6574	22,2002	50,3615	A040	9,1339	20,2201	49,9901
A013	8,0259	22,9670	52,4872	A041	10,3160	21,1359	49,9910
A014	8,8814	22,9962	52,4938	A042	9,1260	21,0153	49,9924
A015	10,3906	23,0511	52,5080	A043	X	X	X
A016	7,8341	22,9586	51,5647	A044	9,1831	22,4060	49,9958
A017	8,9082	22,9932	51,6117	A045	10,1148	19,8004	52,7435
A018	9,9178	23,0281	51,5762	A046	9,1775	19,7019	52,7465
A019	8,0608	22,9665	50,3363	A047	8,4788	19,7448	52,7460
A020	8,9156	22,9950	50,3445	A048	10,3697	20,5661	52,7421
A021	9,9816	23,0307	50,3512	A049	9,4846	20,5326	52,7437
A022	10,7670	22,4171	52,4555	A050	8,3450	20,5011	52,7445
A023	10,7964	21,4671	52,4504	A051	10,2324	21,5390	52,7438
A024	10,8218	20,4767	52,4780	A052	9,4814	21,4629	52,7447
A025	10,7621	22,3941	51,5020	A053	8,3762	21,5635	52,7452
A026	10,7920	21,4551	51,4659	A054	10,1864	22,4137	52,7454
A027	10,8277	20,4271	51,4614	A055	9,2479	22,3379	52,7457
A028	10,7445	22,4005	50,3352	A056	8,3500	22,2872	52,7446

ANEXO I – Relatório dimensional da placa de esferas 3D.

Relatório Dimensional

PowerINSPECT
PolyWorks

EXATA

MEDIÇÕES 3D

Tel: 19 992505136 / 19 992748954
E-mail: contato@exata3d.com.br
www.exata3d.com.br

Exata Serviços de Medições 3D Portáteis Ltda.
CNPJ 09.521.174/0001-74
Contato: Rua Luiz de Mattos, 219.
Amparo - SP - Brasil
CEP 13903-201

Cliente	Sempre Ferramentaria	Analista	Rodrigo Vidoti
Descrição	Placa de Esferas	Solicitante	Flavio
Código	N.A	Local de Inspeção	Sempre Ferramentaria
Desenho	N.A	Tolerância	Conforme indicação do cliente
DUM	N.A	Equip. Rastreado RBC	Nº 0469/14/001-1

Relatório Nº: 117114

Pontos de Alinhamento 3D

Ponto 1 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1 (usado na definição de alinhamento))						
--	--	--	--	--	--	--

		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Ponto	X	0.100	-0.100	0.000	0.000	0.000	-
	Y	0.100	-0.100	0.000	-0.000	-0.000	-
	Z	0.100	-0.100	0.000	-0.000	-0.000	-

Pontos Geométricos

Esfera 1 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)						
---	--	--	--	--	--	--

		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Diâmetro		0.100	-0.100	100.000	99.975	-0.025	-
	X	0.100	-0.100	-400.000	-399.956	0.044	-
Centro	Y	0.100	-0.100	100.000	100.023	0.023	-
	Z	0.100	-0.100	5.000	5.090	0.090	-

Número de pontos capturados: 5

Esfera 2 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)						
---	--	--	--	--	--	--

		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Diâmetro		0.100	-0.100	100.000	100.013	0.013	-
	X	0.100	-0.100	-250.000	-249.957	0.043	-
Centro	Y	0.100	-0.100	100.000	100.066	0.066	-
	Z	0.100	-0.100	5.000	5.023	0.023	-

Número de pontos capturados: 5

Esfera 3 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)						
---	--	--	--	--	--	--

		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Diâmetro		0.100	-0.100	100.000	100.055	0.055	-
	X	0.100	-0.100	-100.000	-99.913	0.087	-
Centro	Y	0.100	-0.100	100.000	100.089	0.089	-
	Z	0.100	-0.100	5.000	4.970	-0.030	-

Número de pontos capturados: 5

Esfera 4 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)						
---	--	--	--	--	--	--

		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Diâmetro		0.100	-0.100	100.000	100.028	0.028	-
	X	0.100	-0.100	-400.000	-400.115	-0.115	-0.015
Centro	Y	0.100	-0.100	250.000	250.013	0.013	-
	Z	0.100	-0.100	5.000	5.398	0.398	0.298

Número de pontos capturados: 5

Esfera 5 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)						
---	--	--	--	--	--	--

		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Diâmetro		0.100	-0.100	100.000	100.006	0.006	-
	X	0.100	-0.100	-250.000	-250.014	-0.014	-
Centro	Y	0.100	-0.100	250.000	250.091	0.091	-
	Z	0.100	-0.100	5.000	4.910	-0.090	-

Número de pontos capturados: 5

Esfera 6 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)						
---	--	--	--	--	--	--

		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Diâmetro		0.100	-0.100	100.000	100.050	0.050	-
	X	0.100	-0.100	-100.000	-100.027	-0.027	-
Centro	Y	0.100	-0.100	250.000	250.097	0.097	-
	Z	0.100	-0.100	5.000	4.962	-0.038	-

Número de pontos capturados: 5

Esfera 7 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)

		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Diâmetro	X	0.100	-0.100	100.000	99.998	-0.002	-
		0.100	-0.100	-400.000	-400.066	-0.066	-
Centro	Y	0.100	-0.100	400.000	400.095	0.095	-
	Z	0.100	-0.100	5.000	5.113	0.113	0.013

Número de pontos capturados: 5

Esfera 8 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)

		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Diâmetro	X	0.100	-0.100	100.000	100.045	0.045	-
		0.100	-0.100	-250.000	-250.076	-0.076	-
Centro	Y	0.100	-0.100	400.000	400.090	0.090	-
	Z	0.100	-0.100	5.000	4.772	-0.228	-0.128

Número de pontos capturados: 5

Esfera 9 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)

		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
Diâmetro	X	0.100	-0.100	100.000	100.038	0.038	-
		0.100	-0.100	-100.000	-100.079	-0.079	-
Centro	Y	0.100	-0.100	400.000	400.088	0.088	-
	Z	0.100	-0.100	5.000	4.933	-0.067	-

Número de pontos capturados: 5

ANEXO II – Relatório dimensional do sistema de planos perpendicularidades 3D.

Relatório Dimensional

PowerINSPECT
PolyWorks

EXATA

MEDIÇÕES 3D

Exata Serviços de Medições 3D Portáteis Ltda.
CNPJ 09.521.174/0001-74
Contato: Rua Luiz de Mattos, 239.
Amparo - SP - Brasil
CEP 13903-201

Tel.: 19 992505136 / 19 992748954
E-mail: contato@exata3d.com.br
www.exata3d.com.br

Cliente	Sempre Ferramentaria	Analista	Rodrigo Vidoti
Descrição	Caixa de Aferição	Solicitante	Flavio
Código	N.A	Local de Inspeção	Sempre Ferramentaria
Desenho	N.A	Tolerância	Conforme indicação do cliente
DUM	N.A	Equip. Rastreado RBC	Nº 0469/14/001-1

Relatório Nº: 117214

Pontos Geométricos - Plano 1							
Pt. A1 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	Z	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	-147.690	-147.692	-0.002	-
Pt. A2 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	Z	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	-147.690	-147.692	-0.002	-
Pt. A3 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	Z	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	-147.690	-147.692	-0.002	-
Pt. A4 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	Z	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	-147.690	-147.692	-0.002	-

Pontos Geométricos - Plano 2							
Ângulo entre Plano 1 / Plano 2 (Referências: Plano Base Ref., Plano 2)							
Ângulo		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.100°	-0.100°	90.000°	89.965°	-0.035°	
Pt. B1 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	X	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	234.170	234.350	0.180	
Pt. B2 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	X	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	234.170	234.077	-0.093	
Pt. B3 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	X	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	234.170	234.357	0.187	
Pt. B4 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	X	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	234.170	234.088	-0.082	
Pt. B5 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	X	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	234.170	234.219	0.049

Pontos Geométricos - Plano 3							
Ângulo entre Plano 1 / Plano 3 (Referências: Plano Base Ref., Plano 3)							
Ângulo		Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.100°	-0.100°	90.000°	89.988°	-0.012°	
Pt. C1 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	Y	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	235.050	234.947	-0.103	-
Pt. C2 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	Y	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	235.050	234.851	-0.199	-
Pt. C3 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	Y	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	235.050	235.213	0.163	-
Pt. C4 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	Y	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	235.050	235.118	0.068	-
Pt. C5 (Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1)							
Ponto	Y	Tol. sup.	Tol. inf.	Nominal	Medido	Desvio	Erro
		0.200	-0.200	235.050	235.032	-0.018	-

Declarações gerais de conformidade são inaceitáveis para quaisquer resultados de ensaio.