

JULIANA DIAS WUTKE

**MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA LASER SCANNER
TERRESTRE**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno

**CURITIBA
2006**

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

...A Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de um ótimo curso de Pós-Graduação.

A Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo benefício da bolsa de estudos.

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG), que colocou a disposição as instalações e os equipamentos de seus laboratórios: Laboratório de fotogrametria e sensoriamento remoto, laboratório de topografia (LABTOPO), Laboratório de aferição e instrumentação geodésica (LAIG)

Ao Departamento de Geologia, que através do Projeto IMAGE, colocou a disposição o equipamento laser scanner terrestre Cyrax HDS 3000, da Leica Geosystems. Ao Professor Dr. Sidnei P. Rostirolla, pela oportunidade dos cursos de treinamento para operação do laser scanner, em Curitiba e em São Paulo. E também aos colegas Ronaldo e Mezzomo, que ajudaram muito em todos os levantamentos com o laser scanner.

Ao Professor e Orientador Jorge Antonio Silva Centeno, por todo o incentivo e dedicação e pela oportunidade de trabalharmos juntos.

Ao Professor Romualdo, pela ajuda e disposição em resolver os cálculos de integrais e derivadas, extremamente necessárias nesse trabalho.

Aos Professores Pedro e Luiz, pelo apoio, paciência e esclarecimentos nos levantamentos com a estação total.

Aos colegas Claudionor, Mosar, Juliana, Reginaldo, Elaine, Sandro, Roberto, Alex, Franciely, Jenny, Micheli e Fabiani, pela dedicação e ajuda nos levantamentos, pelas discussões e sugestões muito bem aproveitadas e também pela atenção e amizade em todos os momentos.

A Mônica, nossa querida secretária, que com seu bom humor e alegria, nunca poupou esforços para resolver nossos problemas de forma competente.

A todos os colegas, professores e funcionários, que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização de mais esta etapa vencida, contribuindo para minha formação pessoal e profissional.

A minha família, que com seu amor incondicional sempre me apoiou, acreditando e confiando em mim, estando sempre prontos a me ajudar de todas as formas para que eu chegasse aos meus objetivos.

A Lorna, Paulo e Dolores, minha segunda família, por sempre me incentivarem, torcerem pela vitória e me apoiarem com carinho.

Ao amor da minha vida, Guilherme, que esteve mais do que presente, lutando junto para transpor todos os obstáculos do caminho; seu amor, dedicação, estímulo e presença foram essenciais para a realização de mais essa conquista.

Muito Obrigado!!!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	x
RESUMO.....	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO PROPOSTO	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
1.3 ESTRUTURAÇÃO.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 SISTEMAS LASER SCANNERS	5
2.1.1 Sistemas Estáticos.....	7
2.1.1.1 Princípio “time-of-flight” ou intervalo de tempo	7
2.1.1.2 Princípio baseado na diferença de fase.....	10
2.1.1.3 Princípio baseado na triangulação	12
2.1.2 Sistema Dinâmico.....	14
2.2 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO LASER SCANNER TERRESTRE.....	15
2.2.1 Levantamento Topográfico em Minas a Céu Aberto	16
2.2.2 Levantamento e Modelagem de Objetos (Estruturas).....	16
2.2.3 Modelagem 3D para Plantas Industriais.....	17
2.2.4 Documentação e Preservação do Patrimônio Histórico	18
2.2.4.1 Castelo Neuschwanstein	18
2.2.4.2 Capela de " Neubrueck ", Suíça.....	19
2.3 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DA VARREDURA LASER SCANNER TERRESTRE.....	19
2.3.1 Resolução.....	20
2.3.2 Efeito de bordas	21

2.3.3	Acurácia Linear	22
2.3.4	Acurácia Planimétrica.....	24
2.4	ESTAÇÕES TOTAIS.....	25
3	MATERIAIS	27
3.1	O LASER SCANNER CYRAX HDS 3000.....	27
3.2	ALVOS PLANOS REFLETORES	29
3.3	A ESTAÇÃO TOTAL ELETRONICA TRIMBLE – MODELO 3305 DR.....	30
3.4	SOFTWARES UTILIZADOS	32
3.4.1	Cyclone 5.1	32
3.4.2	Ambiente MatLab.....	32
3.4.3	Auto Cad.....	32
3.4.4	Microsoft Office Excell	32
4	MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA VARREDURA LASER SCANNER TERRESTRE	33
4.1	MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO	33
4.1.1	Método Analítico	33
4.1.1.1	Organização dos dados	36
4.1.1.2	Modelagem matemática.....	38
4.1.1.3	Ajustamento das informações coletadas	41
4.1.2	Método Direto.....	44
4.2	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA.....	45
4.3	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA LINEAR (DISTÂNCIA).....	47
4.4	AVALIAÇÃO DO USO DE ALVOS TRIDIMENSIONAIS ESFÉRICOS	48
4.5	AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO DA NUVEM DE PONTOS	51
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
5.1	AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO – MÉTODO ANALÍTICO	53
5.2	AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO – MÉTODO DIRETO.....	56
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DIRETO E O MÉTODO ANALÍTICO PARA AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO.....	61
5.4	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA.....	64

5.5	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA LINEAR.....	68
5.6	AVALIAÇÃO DO USO DE ALVOS TRIDIMENSIONAIS ESFÉRICOS	69
5.6.1	Acurácia Planimétrica.....	69
5.6.2	Acurácia Linear	73
5.7	AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO DA NUVEM DE PONTOS	75
6	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: PRINCÍPIO TIME OF FLIGHT	7
FIGURA 2.2: SCANNER BASEADO NO PRINCÍPIO “TIME OF FLIGHT”	8
FIGURA 2.3: DETERMINAÇÃO DE DISTANCIAS POR CAMINHO DUPLO.....	10
FIGURA 2.4: ESQUEMA DE UM MEDIDOR DIGITAL DE FASE.....	11
FIGURA 2.5: SCANNER BASEADO NO PRINCÍPIO DA TRIANGULAÇÃO	13
FIGURA 2.6: FUNCIONAMENTO DO LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO	15
FIGURA 2.7: ESTRUTURA DA PONTE.....	17
FIGURA 2.8: OLEODUTO MODELADO - PERSPECTIVA ISOMÉTRICA.....	18
FIGURA 2.9: INTERIOR DO CASTELO NEUSCHWANSTEIN.....	18
FIGURA 2.10: EXEMPLO DA CAPELA DE "NEUBRUECK".....	19
FIGURA 2.11: EXPERIMENTO PARA ANÁLISE DE RESOLUÇÃO.....	20
FIGURA 2.12: EXEMPLOS TÍPICOS DA QUALIDADE DE BORDAS.....	21
FIGURA 2.13: EXPERIMENTO PARA ANÁLISE DA ACURÁCIA LINEAR.....	22
FIGURA 2.14: BASE PARA CALIBRAÇÃO - BENTLEY, AUSTRÁLIA.....	23
FIGURA 2.15: ACURÁCIA PLANIMÉTRICA - ALVOS EM UMA PAREDE.....	25
FIGURA 3.1: LASER SCANNER TERRESTRE	27
FIGURA 3.2: ALVOS PLANOS	29
FIGURA 3.3: ALVOS GIRATÓRIOS.....	30
FIGURA 3.4: ESTAÇÃO TOTAL ELETRÔNICA TRIMBLE - 3305 DR.....	30
FIGURA 4.1: DIFERENÇA DE PENETRAÇÃO DE UM ÚNICO PULSO EM DIFERENTES OBJETOS (PLANOS).....	34
FIGURA 4.2: PLACA TESTE PARA AVALIAR O EFEITO DE BORDAS.....	35
FIGURA 4.3: PLACAS PARA ANÁLISE DO EFEITO DE BORDAS.....	35
FIGURA 4.4: PERFIL DOS PLANOS ANTERIOR E POSTERIOR.....	39
FIGURA 4.5: ÁREA CIRCULAR EM FUNÇÃO DO RAIOS R E DE h	41
FIGURA 4.6: CAIXA PARA ANÁLISE DA RESOLUÇÃO.....	44

FIGURA 4.7: AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA.....	46
FIGURA 4.8: SEQUENCIA DE POSTES ALINHADOS - ACURÁCIA LINEAR ...	47
FIGURA 4.9: ALVOS TRIDIMENSIONAIS ESFÉRICOS	49
FIGURA 4.10: ALVOS PLANOS E TRIDIMENSIONAIS ESFÉRICOS	49
FIGURA 4.11: RECORTE USADO NA AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO.....	51
FIGURA 5.1: PERFIL DAS PLACAS VARRIDAS A 7 e 27 m.....	53
FIGURA 5.2: PERFIL DAS PLACAS VARRIDAS A 47 e 67 m.....	54
FIGURA 5.3: PERFIL DAS PLACAS VARRIDAS A 87 e 107 m.....	54
FIGURA 5.4: DIÂMETRO DA PROJEÇÃO LASER - FUNÇÃO DA DISTÂNCIA	55
FIGURA 5.5: EXEMPLO DE PERFIL IDEAL DA CAIXA PARA RESOLUÇÃO ..	56
FIGURA 5.6: INCIDÊNCIA DO FEIXE NO FUNDO DA CAIXA	57
FIGURA 5.7: RESOLUÇÃO A 10 m DE DISTÂNCIA	58
FIGURA 5.8: RESOLUÇÃO A 30 m DE DISTÂNCIA.....	58
FIGURA 5.9: RESOLUÇÃO A 50 m DE DISTÂNCIA.....	58
FIGURA 5.10: RESOLUÇÃO A 70 m DE DISTÂNCIA	59
FIGURA 5.11: RESOLUÇÃO A 90 m DE DISTÂNCIA	59
FIGURA 5.12: RESOLUÇÃO A 110 m DE DISTÂNCIA	60
FIGURA 5.13: DIÂMETRO DA PROJEÇÃO LASER - FUNÇÃO DA DISTÂNCIA	60
FIGURA 5.14: MÉTODO ANALÍTICO - DIÂMETRO ESTIMADO x MODELADO	62
FIGURA 5.15: MÉTODO DIRETO - DIÂMETRO ESTIMADO x MODELADO ...	63
FIGURA 5.16: PAREDE VARRIDA PELO LASER SCANNER.....	65
FIGURA 5.17: DISTÂNCIAS HORIZONTAIS x VERTICAIS - ALVOS PLANOS	67
FIGURA 5.18: MEDIDAS DE DISTÂNCIAS COM ALVOS PLANOS.....	69
FIGURA 5.19: DETALHE PLACA COM ALVOS	70
FIGURA 5.20: ALVOS PLANOS x ESFÉRICOS - DISTÂNCIAS HORIZONTAIS	71
FIGURA 5.21: ALVOS PLANOS x ESFÉRICOS - DISTÂNCIAS VERTICAIS.....	73
FIGURA 5.22: ACURÁCIA ENTRE ALVOS PLANOS E ESFÉRICOS.....	75
FIGURA 5.23: DISPERSÃO DOS PONTOS - IMAGEM INTENSIDADE.....	75

FIGURA 5.24: DISPERSÃO DOS PONTOS - PERFIL DAS PLACAS.....	76
FIGURA 5.25: VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA DOS PONTOS AO PLANO MÉDIO	76
FIGURA 5.26: HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS	77
FIGURA 5.27: DISPERSÃO DO LASER SCANNER EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA.....	78

LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 2.1: EXEMPLOS DE LASER SCANNERS QUE UTILIZAM O PRINCÍPIO “TIME-OF-FLIGHT”	9
QUADRO 2.2: EXEMPLOS DE LASER SCANNERS QUE UTILIZAM O PRINCÍPIO DA DIFERENÇA DE FASE	12
QUADRO 2.3: EXEMPLOS DE LASER SCANNERS QUE UTILIZAM O PRINCÍPIO DA TRIANGULAÇÃO	14
QUADRO 3.1: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - LASER SCANNER CYRAX HDS 3000	28
QUADRO 3.2: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - ESTAÇÃO TOTAL TRIMBLE 3305 DR*	31
TABELA 5.1: DADOS DE SAÍDA E RESOLUÇÃO ESTIMADA.....	55
TABELA 5.2: RESOLUÇÃO ESTIMADA E MODELADA – MÉTODO ANALÍTICO	62
TABELA 5.3: RESOLUÇÃO ESTIMADA E MODELADA – MÉTODO DIRETO	63
TABELA 5.4: COMPARAÇÃO ENTRE RESOLUÇÃO ESTIMADA: ANALÍTICO x DIRETO.....	64
TABELA 5.5: MEDIDAS DE DISTÂNCIAS HORIZONTAIS USANDO ALVOS PLANOS.....	66
TABELA 5.6: MEDIDAS DE DISTÂNCIAS VERTICAIS USANDO ALVOS PLANOS.....	66
TABELA 5.7: MEDIDAS DE DISTÂNCIAS UTILIZANDO ALVOS PLANOS	68
TABELA 5.8: ALVOS PLANOS E ESFÉRICOS – DISTÂNCIAS HORIZONTAIS	70
TABELA 5.9: ALVOS PLANOS E ESFÉRICOS - DISTÂNCIAS VERTICAIS.....	72
TABELA 5.10: MEDIDAS DE DISTÂNCIAS - ALVOS PLANOS E ESFÉRICOS	74
TABELA 5.11: DISPERSÃO DA NUVEM DE PONTOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA.....	77

RESUMO

Este estudo aborda o desenvolvimento de métodos para a avaliação de sistemas laser scanner terrestres. Para tanto, alguns experimentos foram realizados utilizando-se o sistema laser scanner Cyrax HDS 3000, fabricado pela Leica-Geosystems. Os experimentos elaborados avaliam a resolução do sistema laser scanner, a acurácia de medidas de distância e a acurácia planimétrica. Para a avaliação da resolução, foram desenvolvidos dois métodos: um método direto, que permite uma estimativa do tamanho da projeção do feixe analisando sua capacidade de penetrar nos espaços de uma grade construída para esta finalidade, e um método analítico, que estima esta resolução através da modelagem da projeção do feixe em função da distância utilizando o fenômeno de bordas. Os resultados obtidos com o método analítico se aproximam mais dos valores fornecidos pelo fabricante, atestando que ele é mais robusto e acurado que o método direto. O método de avaliação da acurácia planimétrica é baseado na análise de medidas de distância entre alvos nas direções horizontal e vertical obtidas com o sistema laser scanner, verificando uma melhor acurácia do equipamento Cyrax HDS 3000 na direção vertical. Na avaliação da acurácia linear, medidas de distância obtidas pelo equipamento laser foram comparadas com medidas obtidas com uma estação total. Este experimento permite também analisar a dispersão da nuvem de pontos e uma estimativa de precisão das medidas de distância obtidas. É também apresentado um experimento que compara o uso de alvos esféricos em lugar dos alvos refletores fornecidos pelo fabricante, tendo sido verificada a viabilidade do uso dos alvos esféricos, desde que se observe a precisão desejada para o levantamento. Os métodos desenvolvidos se mostraram eficientes para avaliações e melhorias contínuas da acurácia dos sistemas laser scanner, melhorando assim, a qualidade dos levantamentos de dados realizados com estes equipamentos.

ABSTRACT

This study deals with the development of methods for the evaluation of terrestrial laser scanners. For this purpose, experiments were accomplished using the laser scanner Cyrax HDS 3000, that was produced by Leica-Geosystems. Two methods for the evaluation of the resolution and the beam are compared: the direct method, based on the analysis of the capacity of the laser beam to penetrate in the spaces of a grid, and an analytical method, that models the resolution of the beam based on the border effect. The results prove that the analytical method is more robust and accurate than the direct method. The evaluation of the plane accuracy is based on the analysis of vertical and horizontal distances between targets. For the Cyrax HDS 3000, it was verified that the accuracy in the vertical direction is better. For the evaluation of linear accuracy, the distance, as measured by the laser equipment, is compared to measures obtained with a total station. This experiment also allows analyzing the dispersion of the cloud of points and estimates the precision in distance. An experiment that compares the use of spherical targets in place of the reflecting targets supplied by the manufacturer is also presented. It was verified that the use of the spherical targets is possible, but improvements are still necessary. The proposed methods are efficient for evaluation of the laser scanner systems and they can be used to improve the quality of the surveys using terrestrial laser scanners.

1 INTRODUÇÃO

O levantamento tridimensional de pontos é um problema clássico, que pode ser tratado por distintas metodologias. A mais antiga é o levantamento com medidas de distâncias e direções usando instrumentos topográficos. Esta técnica ganhou significativa eficiência com o advento dos medidores eletrônicos de distâncias e direções, instrumentos que, integrados, convencionou-se chamar de estações totais. Os medidores a laser foram significativamente melhorados e passaram a realizar a medição de distâncias sem a necessidade de refletores, o que permitiu a determinação remota de coordenadas, sem tocar o objeto. Além disso, a evolução da tecnologia de controle de servo-mecanismos, aplicada a estes equipamentos, assegurou o desenvolvimento da estação total robotizada, que permite a medição programada de pontos, mesmo sem o operador [TOMMASELLI, (2003)].

A tecnologia de varredura a laser é um aperfeiçoamento destes princípios. Nos últimos anos, os scanners a laser têm sido utilizados em vários tipos de levantamentos terrestres. Na varredura a laser, a distância aos objetos é medida sem a necessidade de refletores e estas não são efetuadas em feições específicas, mas ao longo de todo o objeto automaticamente, gerando uma nuvem densa de pontos com coordenadas 3D. Existem vários tipos de scanners 3D, variando desde as características do sistema de varredura, passando pelo princípio de medição da distância, até a velocidade e intervalos de medida. A exatidão e a quantidade de pontos medidos variam de acordo com o modelo do scanner.

Esta tecnologia permitiu a solução de vários problemas existentes nas técnicas fotogramétricas, pois reúne boa precisão com a possibilidade de geração de milhões de pontos com coordenadas tridimensionais (x,y,z) em apenas alguns minutos.

O potencial da utilização da varredura laser é grande em diversos campos, como a engenharia, arquitetura, geologia e indústria, por citar alguns. As exigências quanto à qualidade dos dados obtidos dependem da finalidade do levantamento. Fatores como as características do feixe utilizado, detalhes da construção mecânica do sistema, o meio ambiente e as propriedades da superfície dos objetos desempenham um papel importante neste contexto. A qualidade dos levantamentos aplicando esta tecnologia

deve ser então avaliada levando em consideração tais fatores. Esta problemática é a motivação da pesquisa descrita neste estudo.

1.1 OBJETIVO PROPOSTO

1.1.1 Objetivo Geral

Estudo e desenvolvimento de métodos para verificar a qualidade e acurácia de aparelhos laser scanner terrestres.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Elaboração de métodos para avaliação da resolução fornecida pelo sistema de varredura laser scanner, ou seja, avaliar a capacidade do laser para detectar pequenos objetos ou parte destes, na nuvem de pontos obtida;
- Avaliação da acurácia planimétrica (x, y) de equipamentos laser scanners terrestre, ou seja, medidas de distância entre alvos, verificando se existem diferenças de acurácia na direção horizontal e vertical do mesmo equipamento.
- Verificação das diferenças de acurácia na utilização de alvos planos refletivos e alvos tridimensionais esféricos, a fim de validar o uso do alvo esférico, elaborado nesse trabalho com o intuito de reduzir os custos dos experimentos;
- Avaliação da acurácia linear do equipamento laser scanner terrestre, ou seja, medidas de distância entre o equipamento e alvos;
- Avaliação da dispersão da nuvem de pontos em um plano perpendicular à direção de observação do equipamento laser scanner terrestre em diferentes distâncias de obtenção de dados.

1.2 JUSTIFICATIVA

O equipamento laser scanner fornece coordenadas tridimensionais (x,y,z) de pontos, assim como informações de intensidade da reflectância, destacando-se dos demais equipamentos topográficos por sua velocidade na aquisição de dados. Com utilização de uma câmara digital acoplada ao sistema, os dados tridimensionais obtidos podem ser combinados com imagens coloridas, resultando em informação espectral (RGB) para cada ponto. Essa técnica de levantamento tem poucos anos de uso no país e devido ao fato de ainda existirem poucos equipamentos terrestres de varredura a laser, verifica-se uma carência de métodos para avaliar a acurácia e a qualidade dos levantamentos.

Um aspecto importante é avaliar a acurácia das medidas de distâncias e coordenadas fornecidas pelo equipamento laser scanner e testar o comportamento do aparelho quanto à resolução da varredura laser e a dispersão da nuvem de pontos. Esta análise fornecerá subsídios para melhoria contínua da qualidade dos levantamentos de dados para trabalhos e estudos realizados com estes equipamentos. Assim, será possível verificar a acurácia rotineiramente a cada levantamento realizado ou sempre que se achar necessário.

1.3 ESTRUTURAÇÃO

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos. No primeiro capítulo é abordado o problema da crescente utilização de aparelhos laser scanners terrestres, sem a avaliação prévia de sua qualidade. Trata também dos objetivos propostos na realização desse estudo e justificativa para realização do mesmo.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica que abrange tópicos necessários para o desenvolvimento da pesquisa, tais como: os princípios de funcionamento dos sistemas laser scanner, uma breve abordagem sobre estações totais, exemplos de aplicação do laser scanner terrestre e descrições sobre métodos de avaliação da acurácia da varredura de sistemas laser scanner terrestre.

O capítulo 3 descreve os materiais utilizados nessa pesquisa: o equipamento laser scanner terrestre Cyrax HDS 3000 da Leica Geosystems, a Estação Total Eletrônica Trimble 3305 DR, os instrumentos utilizados e elaborados para a realização dos experimentos e os softwares utilizados.

No capítulo 4, são descritos os métodos estudados e desenvolvidos para a avaliação e acurácia da varredura laser scanner terrestre, dentre os quais: avaliação da resolução, avaliação da acurácia planimétrica (x, y), avaliação da acurácia linear (distância, z), avaliação do uso de alvos tridimensionais esféricos e avaliação da dispersão dos dados obtidos pelo laser scanner.

No capítulo 5 são analisados e discutidos os resultados de todos os métodos citados e descritos do capítulo 4.

O capítulo 6 trata das conclusões com relação a todos os métodos desenvolvidos e são abordadas as recomendações para melhoria dos métodos elaborados e estudados e também recomendações para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS LASER SCANNERS

O sistema laser scanner gera coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície. Seu princípio de operação é bastante simples. Os pulsos de laser são gerados e emitidos pelo sistema e com auxílio de um espelho de varredura são direcionados, atingindo a superfície dos objetos em vários pontos. Estes objetos refletem o pulso incidente e parte do pulso volta para o sistema. Com isto, a distância entre o sensor e o objeto é determinada através do intervalo de tempo entre a emissão e a reflexão (retorno) do pulso – DALMOLIN & SANTOS, (2004).

O laser scanner usa um feixe óptico de alta potência com baixa divergência para determinar a distância entre o sensor e a superfície dos objetos. A faixa do espectro a ser utilizada é condicionada por questões de segurança, pois devido à alta potência da energia utilizada, o feixe pode ser nocivo para os olhos humanos. O sistema de varredura laser pode ser dividido em três componentes principais: a unidade de medição laser propriamente dita, encarregada de emitir e receber o sinal laser, um sistema de varredura optomecânico e uma unidade de registro de medições de apoio - BALTSAVIAS, (1999).

Os sistemas de varredura a laser são um aprimoramento das estações totais robotizadas, com maior velocidade de coleta e recursos de automação mais avançados. Os recursos de varredura são implementados por meio de espelhos controlados por servomotores encarregados de redirecionar o feixe emitido. O resultado final do processo de medição e processamento é um conjunto de dados, coordenadas tridimensionais, correspondentes aos pontos na superfície do objeto. Além das coordenadas de cada ponto atingido pelo feixe laser, a intensidade do sinal de retorno, captada pelo sensor, é também registrada e armazenada. O conjunto de dados tridimensionais é geralmente denominado nuvem de pontos, pois pode ser representada por uma densa concentração de observações no espaço tridimensional. A resolução da nuvem de pontos, que determina a distância entre os pontos coletados, pode ser fixada antes da varredura. Este parâmetro depende do tamanho do menor

elemento que se deseja levantar e da distância ao objeto. Dependendo do modelo do scanner, pode-se refazer a varredura de alguns detalhes específicos com maior resolução espacial. Estes equipamentos tem sido cada vez mais usados em levantamentos terrestres, devido às suas vantagens como: alta velocidade de coleta e processamento dos dados; alta densidade de pontos e acurácia homogênea dos pontos medidos - TOMMASELLI, (2003).

A varredura laser apresenta várias características importantes, como cita TOMMASELLI (2003):

- É um método ativo que não depende da luz visível refletida, embora alguns modelos de scanners apresentem comportamento inadequado na ausência total de iluminação;
- Operação remota, o que significa que o objeto não precisa ser tocado;
- O princípio geométrico de cálculo das coordenadas pode ser a triangulação, o intervalo de tempo ou a diferença de fase, dependendo do modelo, mas em todos os casos a varredura pode ser feita com apenas uma estação por visada;
- A resposta está disponível em tempo real, após o término da varredura o operador tem à sua disposição milhões de pontos com coordenadas conhecidas, estando apto a fornecer respostas sobre os objetos, como distâncias entre peças, dimensões, volumes, verticalidade de superfícies, etc.;
- Alta densidade de pontos coletados e, conseqüentemente, altíssima redundância na descrição discreta dos objetos;
- É possível realizar o controle de qualidade durante a coleta e refazer a varredura, caso necessário;
- Operação simples e flexível; basta um operador para posicionar e operar o sistema;
- É possível combinar vários modelos numéricos gerados de diferentes posições, o que permite cobrir quase toda superfície visível dos objetos;
- Alguns sistemas possuem software para a obtenção de descrições paramétricas dos objetos por ajuste à nuvem de pontos, o que permite uma acurácia ainda maior que a dos pontos isolados; além disto, devido à alta densidade de pontos as

ferramentas automáticas de alguns sistemas fazem a busca pelos pontos pertencentes aos mesmos objetos ou superfícies com pouca interação com o operador, o que aumenta substancialmente a produtividade.

Existem dois tipos de sistemas de varredura laser: os sistemas estáticos e os sistemas dinâmicos aerotransportados por aeronaves e/ou helicópteros, ambos são abordados a seguir.

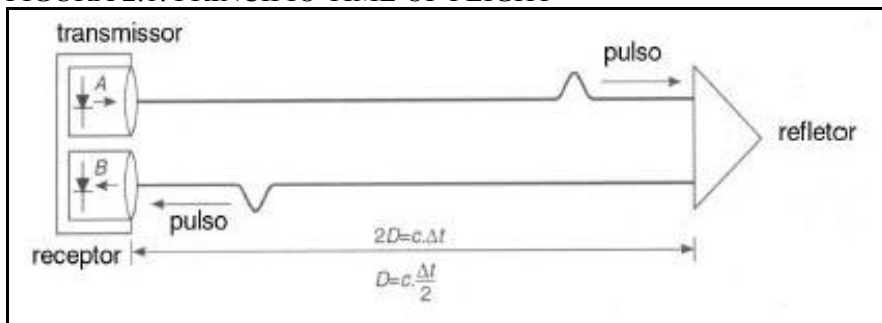
2.1.1 Sistemas Estáticos

Os sistemas de varredura laser estáticos podem ser classificados em três grupos, em função de seu princípio de funcionamento: O primeiro grupo inclui aqueles baseados no princípio “time of flight” ou intervalo de tempo decorrido desde o instante da emissão do pulso até o instante do retorno do mesmo. No segundo grupo, estão os sistemas baseados no método de diferença de fase, onde a distância é calculada através da diferença de fase da onda modulada (MAIA, 1999). Já o terceiro grupo, corresponde aos sistemas baseados no princípio da triangulação [BOEHLER et al, (2001)].

2.1.1.1 Princípio “time-of-flight” ou intervalo de tempo

Este sistema, também denominado LIDAR (Light Detection And Ranging), estima a distância através do tempo de retorno do pulso laser (Time of Flight), emitindo milhares de pulsos por segundo. O pulso é difusamente refletido pelo objeto e parte dele retorna ao sistema (Figura 2.1).

FIGURA 2.1: PRINCÍPIO TIME OF FLIGHT



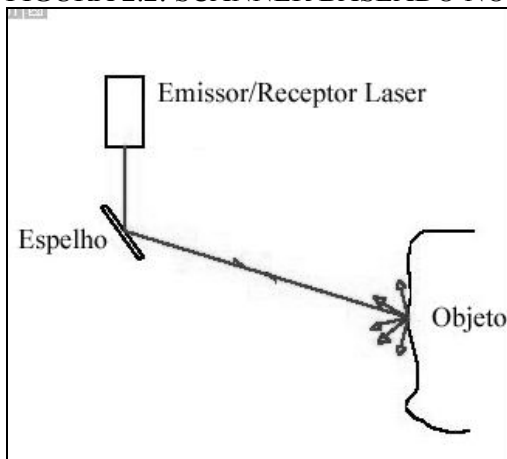
FONTE: MAIA, 1999.

O tempo (Δt) que o sinal leva para ir do transmissor ao objeto e retornar ao sistema é medido. Com isso, calcula-se a distância (D) sensor-objeto utilizando-se a velocidade da luz ($c = 300 \times 10^3$ km/s). A constante $\frac{1}{2}$ é utilizada, pois é considerado o tempo de ida e de volta do sinal (Equação 2.1) – LICHTI & HARVEY, (2002).

$$D = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta t \quad (2.1)$$

O instrumento registra o tempo, a intensidade da energia refletida pelo objeto e os parâmetros de atitude do feixe, que são coordenadas polares do ponto em relação ao referencial do laser (figura 2.2). A partir destes dados é possível calcular a distância e depois as coordenadas cartesianas 3D dos pontos medidos em relação ao sensor. A intensidade pode ser usada para criar uma imagem associada à reflectância da superfície no comprimento de onda utilizado. TOMMASELLI, (2003).

FIGURA 2.2: SCANNER BASEADO NO PRINCÍPIO “TIME OF FLIGHT”



ADAPTADO DE BOEHLER et al, 2001.

Exemplos de sistemas “time-of-flight” são os varredores Cyrax 2500 e 3000, Calidus CP 3200 e Riegl LMS. O Cyrax 2500 usa espelhos para defletir o feixe laser tanto no eixo vertical quanto no horizontal, permitindo um campo de visada de $40^\circ \times 40^\circ$, já no Cyrax 3000, o campo de visada é de 270° no eixo vertical e de 360° no horizontal e ambos os modelos da Cyrax tem alcance de 100 m. Os scanners Calidus

CP 3200 e Riegl LMS usam um prisma para defletir o feixe na vertical, mas rotacionam mecanicamente o scanner no plano horizontal, permitindo uma varredura de 360° para o Callidus e 340° para o Riegl. No quadro 2.1 observam-se alguns exemplos de laser scanners que utilizam o princípio “time-of-flight” ou intervalo de tempo.

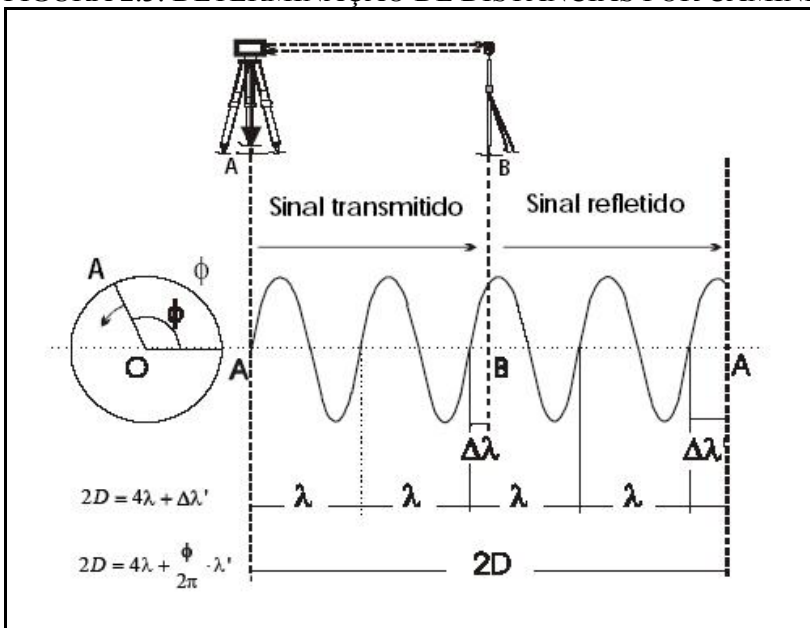
QUADRO 2.1: EXEMPLOS DE LASER SCANNERS QUE UTILIZAM O PRINCÍPIO “TIME-OF-FLIGHT”

Fabricante	Modelo	Distância (m)	Fonte
3rdTech Inc.	DeltaSphere-3000	0,3 – 12,0	http://www.3rdtech.com/
CALLIDUS	CP 3200	0,5 – 32,0	http://www.callidus.de/
Leica-Geosystems/ Cyra Technologies	HDS-3000	1,0 – 100,0	http://www.cyra.com/
Leica-Geosystems/ Cyra Technologies	HDS-2500	1,5 – 100,0	http://www.cyra.com/
I-SiTE Pty Ltd	I-SiTE 4400	2,0 – 400,0	http://www.isite3d.com/
Measurement Devices Ltda	LaserAce Scanner	5,0 – 700,0	http://www.laserace.com/
Mensi	GS 100	1,0 – 150,0	http://www.mensi.com/
Mensi	GS 200	1,0 – 350,0	http://www.mensi.com/
MetricVision/Leica Geosystems	MV220/LR200	2,0 – 60,0	http://www.metricvision.com/
Optech	ILRIS-3D	3,0 – 1500,0	http://www.optech.on.ca/
Optech	ALTM 30/70	200,0 – 3000,0	http://www.optech.on.ca/
Riegl Laser Measurement Systems	LMS-Z420i LMS-Z360i LMS-Z210i LPM-i800HA LPM-2K	2,0 – 800,0 1,0 – 200,0 4,0 – 400,0 10,0 – 800,0 10,0 – 2500,0	http://www.riegl.com/

2.1.1.2 Princípio baseado na diferença de fase

Os scanners baseados no método da diferença de fase funcionam a partir da seguinte comprovação: a medida de diferença de fase, entre os sinais transmitidos e refletidos, da parte fracional do comprimento total, é menor que o valor da parte inteira do comprimento de onda modulada (MAIA, 1999). A figura 2.3 representa graficamente a medida da distancia AB.

FIGURA 2.3: DETERMINAÇÃO DE DISTANCIAS POR CAMINHO DUPLO



FONTE: MAIA, 1999.

A distância do sensor até o objeto é calculada conforme a equação 2.2:

$$D = M\lambda + \Delta\lambda \quad (2.2)$$

Onde:

M é o numero inteiro de comprimento de onda (neste caso igual a 2);

$\Delta\lambda$ é a parte fracional do comprimento de onda.

Como o sinal é refletido de volta ao instrumento (sensor), a distancia entre o objeto e o sensor é calculada pela equação 2.3:

$$2D = N\lambda + \Delta\lambda \quad (2.3)$$

Onde:

N é o número inteiro de revoluções do vetor AO (4 neste caso);

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

Na figura 2.3, tem-se que $\Delta\lambda = \frac{\phi}{2\pi} \cdot \lambda$; substituindo esta expressão na equação

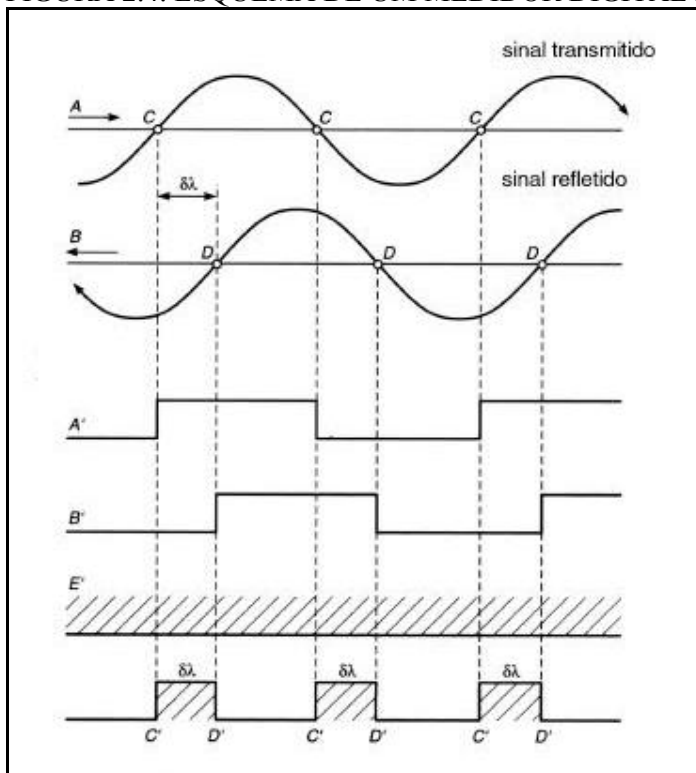
2.3, obtêm-se as equações 2.4 e 2.5:

$$2D = N\lambda + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \lambda \quad (2.4)$$

$$D = N \frac{\lambda}{2} + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2.5)$$

A diferença de fase $\Delta\lambda$ pode ser medida por métodos analógicos ou digitais. A figura 2.4 ilustra a medida digital de diferença de fase $\Delta\lambda$.

FIGURA 2.4: ESQUEMA DE UM MEDIDOR DIGITAL DE FASE.



FONTE: MAIA, 1999.

Exemplos de equipamentos laser scanners que utilizam este princípio, podem ser observados no quadro 2.2:

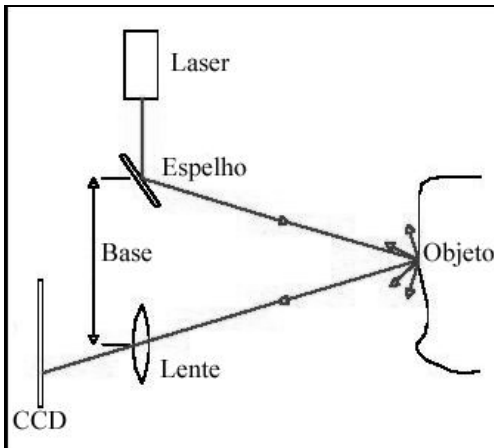
QUADRO 2.2: EXEMPLOS DE LASER SCANNERS QUE UTILIZAM O PRINCÍPIO DA DIFERENÇA DE FASE

Fabricante	Modelo	Distância (m)	Fonte
Leica-Geosystems/ Cyra Technologies	HDS-4500	0,4 – 25,2	http://www.cyra.com/
Leica-Geosystems/ Cyra Technologies	HDS-450	0,4 – 53,3	http://www.cyra.com/
iQsun 880	iQvolution	0,2 – 76,0	http://www.iqsun.com/ http://www.iqvolution.com
Visi Image	3Dguru	0,2 – 36,5	http://www.3d-gurus.com/
Zoller+Froehlich GmbH	IMAGER 5003	0,4 – 53,5	http://www.zofre.de/

2.1.1.3 Princípio baseado na triangulação

Os scanners baseados no princípio da triangulação funcionam da seguinte maneira: um pulso de laser é emitido pelo sistema e a luz refletida pelo objeto é registrada por um ou mais sensores CCD's (Charge Coupled Device) de câmaras digitais. Esse tipo de sensor transforma a luz refletida em sinais elétricos que por sua vez, são convertidos em bits através de um circuito denominado conversor analógico-digital. O ângulo de varredura dos pulsos é registrado no sistema laser scanner a cada pulso emitido. Conhecendo-se a base fixa entre o sensor laser e a câmara, por meio de um processo de calibração determina-se a posição dos pontos refletidos pelo objeto (figura 2.5). A geometria entre o emissor laser e o sensor CCD é conhecida e permite o cálculo das coordenadas tridimensionais dos pontos iluminados pelo feixe laser utilizando os conceitos da intersecção fotogramétrica. A precisão da reconstrução do modelo do objeto depende de elementos geométricos semelhantes, como a relação base/distância [TOMMASELLI, (2003)].

FIGURA 2.5: SCANNER BASEADO NO PRINCÍPIO DA TRIANGULAÇÃO



ADAPTADO DE BOEHLER et al, 2001.

Este sistema é adequado para a reconstrução de objetos pequenos e a distância máxima de operação dependerá da base empregada pelo scanner, como no método fotogramétrico. Como a base é normalmente fixa, há uma distância máxima de operação para a qual a precisão é satisfatória. A precisão das coordenadas 3D neste sistema laser está no nível sub-milimétrico, dependendo da distância ao objeto. As coordenadas calculadas estarão no referencial da base e, para transformá-las para um referencial do espaço objeto deve-se conhecer a orientação da base ou, então, colocar alvos no campo de varredura do scanner [TOMMASELLI, (2003)].

Um problema comum aos varredores, tanto por triangulação quanto os do tipo “time-of-flight” ou diferença de fase, é a refletância dos materiais presentes na cena. Se o sinal laser não for refletido adequadamente por um determinado material, não haverá como obter a distância e conseqüentemente as coordenadas dos pontos.

Os sistemas que funcionam com o princípio de intervalo de tempo são capazes de medir objetos posicionados a distâncias maiores que os sistemas baseados no princípio de triangulação. Uma característica importante desses tipos de scanners é a sua acurácia homogênea em relação à distância do objeto. Enquanto que nos aparelhos que operam por triangulação ou no processo fotogramétrico, a acurácia diminui com o quadrado da distância, nos varredores “time-of-flight” há uma discreta diminuição da precisão da medida com o aumento da distância. Isto ocorre porque o erro na medida do tempo de retorno não é influenciado significativamente pelo aumento da distância.

Exemplos de varredores que utilizam o princípio da triangulação são fabricados pelas empresas MINOLTA, MENSI e CALLIDUS (quadro 2.3). Outro problema com o método de triangulação é a identificação do ponto laser refletido pelo objeto e registrado pelo CCD, que pode ser limitada pela iluminação do ambiente e pela distância ao objeto.

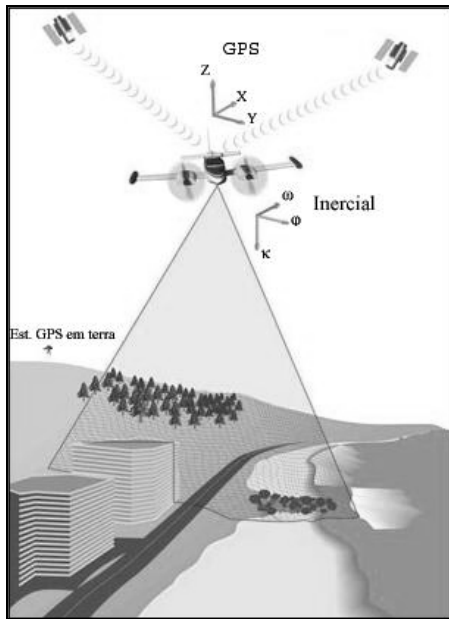
QUADRO 2.3: EXEMPLOS DE LASER SCANNERS QUE UTILIZAM O PRINCÍPIO DA TRIANGULAÇÃO

Fabricante	Modelo	Distância (m)	Fonte
Mensi	S10	0,8 – 10,0	http://www.mensi.com/
Mensi	S25	2,0 – 25,0	http://www.mensi.com/
Minolta	Vivid 910	0,6 – 2,5	http://www.minoltausa.com/
Callidus	CT 180	0,18	http://www.callidus.de/
Callidus	CT 900	0,90	http://www.callidus.de/

2.1.2 Sistema Dinâmico

No sistema dinâmico, o varredor laser é instalado em plataformas, como aviões ou plataformas terrestres, que sobrevoam a área em questão. O varredor laser, neste caso, serve para medir a distância entre os objetos na superfície e o sensor (Figura 2.6). A posição exata dos pontos no terreno e a qualidade dos mesmos é obtida com o auxílio de um sistema de posicionamento com precisão compatível. A posição do sensor no momento da medição de cada ponto é determinada mediante um sistema de GPS diferencial (DGPS), encarregado de obter a posição (X, Y, Z) do avião/sensor no espaço em intervalos fixos (figura 2.6). Um segundo sistema de apoio, a unidade de medição inercial (SMI) é encarregada de calcular a inclinação ω , ϕ , κ do sensor em torno dos eixos X, Y, Z em relação à XGPS, YGPS, ZGPS do sistema de posicionamento GPS - CENTENO, (2003).

FIGURA 2.6: FUNCIONAMENTO DO LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO



ADAPTADO DE: OPTECH, 2005

A precisão do laser dinâmico é de ± 10 cm, por isso os sistemas de apoio devem ter uma precisão igual ou maior. Na prática, os sistemas possuem precisão menor que 10 cm e menor que $0,02^\circ$. Os dados do SMI e DGPS são medidos e armazenados simultaneamente e paralelamente à medição da distância pelo sistema laser. Ou seja, existir um sincronismo entre SMI, GPS e laser é condição básica – DALMOLIN & SANTOS, (2004).

2.2 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO LASER SCANNER TERRESTRE

Com a utilização do equipamento de varredura laser scanner, a aquisição e geração das informações são rápidas e precisas, reduzindo drasticamente o tempo de resposta de levantamentos em inúmeras áreas, tais como:

- Levantamentos topográficos;
- Geologia, mineração;
- Geotecnia, modelagem geofísica e de terrenos;
- Engenharia civil, levantamentos de infra-estruturas civis como estradas e ferrovias;

- Engenharia industrial, modelagem 3D para plantas industriais;
- Documentação e preservação de patrimônios históricos (prédios, estátuas, esculturas);
- Arquitetura e projeto de interiores;
- Engenharia reversa e protótipos rápidos;
- Modelagem aeronáutica, de veículos, embarcações e grandes objetos em geral.

2.2.1 Levantamento Topográfico em Minas a Céu Aberto

Dadas às características, o sistema laser scanner possui claras vantagens em relação aos outros sistemas tradicionais, no que tange à aplicação, ao rendimento, à velocidade, à precisão e à segurança, já que permite capturar informação topográfica em lugares inacessíveis como tetos e galerias irregulares de minas - ROCHA, (2002).

São exemplos de aplicação:

- Controle de ângulo de talude;
- Cubagens de pilhas pulmão e depósito de estéril;
- Levantamento de estruturas geológicas como falhas e dobras;
- Monitoramento de cavidades, erosões, deslizamentos, etc.
- Levantamento de volumes de caçambas e conchas dos equipamentos;

2.2.2 Levantamento e Modelagem de Objetos (Estruturas)

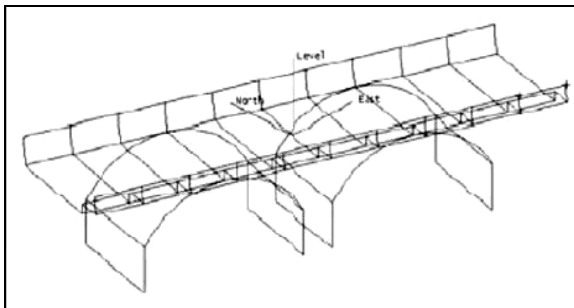
Muitas estruturas antigas não possuem dados de projeto (CAD) disponíveis para futuras manutenções, consertos ou renovações. O levantamento de sua geometria por métodos convencionais demanda muito tempo. Utilizando o sistema de varredura laser, é possível elaborar modelos digitais de estruturas em tempo menor e com alto grau de detalhamento.

Um exemplo de aplicação é o levantamento de uma antiga ponte de concreto que necessita de manutenção, realizado em Brisbane, na Austrália - I-SITE 3D, (2005). A ponte foi varrida com um aparelho laser scanner Riegl LMS-Z210 e assim foi possível elaborar um modelo CAD da estrutura. O varredor laser coletou informações a

distâncias de até 350 m, sem expor os operadores em ambientes perigosos, tal como estrada ocupada e estruturas inseguras.

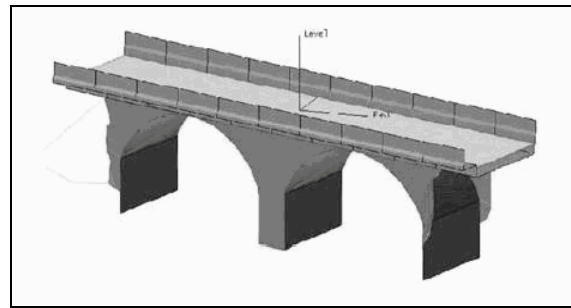
Para este projeto, foram coletadas quatro cenas, cerca de 170.000 pontos. Num sistema CAD, os pontos foram unidos, formando linhas que descrevem o esboço da estrutura de ponte, estrada e paredes laterais (Figura 2.7a) e então estas linhas foram modeladas para criar as superfícies da ponte (Figura 2.7b). O modelo resultante pode ser usado para documentação, planejamento de reparos, alterações de projeto, análise de estruturas e análise de cargas de tráfego, entre outros.

FIGURA 2.7: ESTRUTURA DA PONTE



(a) LINHAS

FONTE: I-SITE 3D,2005

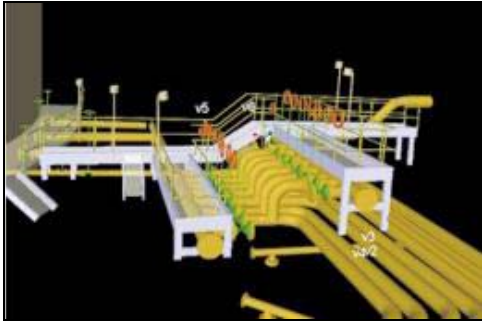


(b) SUPERFÍCIE

2.2.3 Modelagem 3D para Plantas Industriais

Este exemplo de aplicação é um estudo de caso da CYRA TECHNOLOGIES, (2005). Trata-se da modelagem das instalações e tubulações de uma refinaria com 2.000 m de extensão e 30 m de largura. O levantamento foi feito para inspeção precisa, objetivando a certificação ISO e também a documentação para futuros ajustes de projeto. No levantamento utilizou-se o sistema de varredura laser Cyrax 2500, com o que foi possível gerar de forma eficaz, perspectivas isométricas a partir de dados 3D (Figura 2.8) e, ao mesmo tempo, elaborar uma documentação acurada tridimensional, digital e passível de ser modificada posteriormente. A coleta e registro de cenas foram feitos em um dia e meio, com apenas dois operadores, que registraram no total 18 cenas.

FIGURA 2.8: OLEODUTO MODELADO - PERSPECTIVA ISOMÉTRICA



FONTE: CYRA TECHNOLOGIES, 2005

2.2.4 Documentação e Preservação do Patrimônio Histórico

Para aplicações no campo da arquitetura e documentação do patrimônio histórico, além da geometria, são importantes informações de reflectância das superfícies e também das cores para a completa descrição do objeto em estudo. A seguir, são mostrados alguns exemplos de aplicação nessa área:

2.2.4.1 Castelo Neuschwanstein

O objetivo deste projeto foi documentar o interior do Castelo Neuschwanstein, na Alemanha e criar um modelo tridimensional com cores e texturas reais. A figura 2.9 mostra o interior do castelo: A imagem de reflectância é sobreposta com as informações correspondentes ao modelo de cores RGB (Red, Green, Blue) captadas pela máquina fotográfica acoplada ao aparelho laser scanner [ABMAYR et al, (2004)].

FIGURA 2.9: INTERIOR DO CASTELO NEUSCHWANSTEIN



FONTE: ABMAYR ET AL, 2004

2.2.4.2 Capela de "Neubrueck", Suíça

O exemplo da capela de "Neubrueck" (na Suíça) representa uma aplicação típica para resgate histórico e cultural. Foram varridos os quatro lados da capela e também foi feita uma varredura interior. As cenas foram registradas (unidas) usando esferas como alvos. Informações adicionais foram obtidas com base no registro da nuvem de pontos. Como informações matemáticas (volumes, distâncias) e também um modelo 3D foi criado. As figuras seguintes mostram a nuvem de pontos (figura 2.10a) e o modelo 3D com texturas (figura 2.10b) [SCHULZ & INGENSAND, (2004)].

FIGURA 2.10: EXEMPLO DA CAPELA DE "NEUBRUECK"



(a) NUVEM DE PONTOS



(b) MODELO 3D DA CAPELA

FONTE: SCHULZ & INGENSAND, 2004.

2.3 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DA VARREDURA LASER SCANNER TERRESTRE

A qualidade de um levantamento por varredura laser depende de fatores inerentes ao próprio sistema de medição, bem como de influências ambientais e da natureza do alvo. Entre eles estão a acurácia linear (de distância) e a acurácia planimétrica (coordenadas x , y), a resolução e o efeito de bordas - BOEHLER et al, (2003). Cada um destes fatores será discutido a seguir em detalhe.

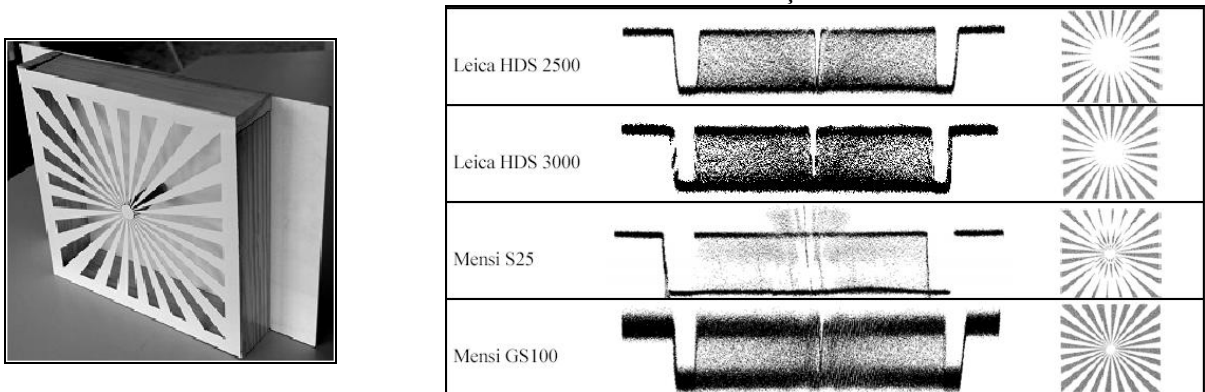
A acurácia linear, a acurácia planimétrica e a resolução estão associadas à emissão e registro do pulso laser e ao mecanismo de varredura encarregado de redirecionar o feixe emitido. O efeito de bordas depende também do objeto a ser varrido.

2.3.1 Resolução

A resolução pode ser definida como a capacidade do laser para detectar pequenos objetos ou parte de objetos na nuvem de pontos. Tecnicamente, duas diferentes especificações de laser scanner contribuem para esta capacidade: o menor incremento possível do ângulo entre dois pontos sucessivos e o tamanho da projeção do raio laser no objeto. A maioria dos manuais dos aparelhos laser scanner fornece o incremento do ângulo entre dois pontos sucessivos para o usuário. A resolução do objeto é obtida, combinando-se os efeitos dos incrementos e tamanho da projeção laser.

BOEHLER et al (2001) propõem o uso de um objeto de teste sob forma de um painel, composto de elementos triangulares dispostos de maneira radial. O espaçamento entre os elementos cresce com a distância ao centro do objeto (Figura 2.11a). O espaçamento entre os elementos cria pequenas aberturas que servem para avaliar a resolução. Se o scanner tem alta resolução, o pulso deve ser refletido não somente pelo painel, mas também por objetos atrás dele, através das fendas. Alta resolução significa pequenos incrementos angulares e projeção do laser pequena. Na figura 2.11b é possível observar alguns resultados obtidos por BOEHLER et al (2001), que testou vários aparelhos laser scanner terrestres, entre os quais se encontra o modelo Leica Cyrax HDS 3000, que é o equipamento utilizado nesta pesquisa.

FIGURA 2.11: EXPERIMENTO PARA ANÁLISE DE RESOLUÇÃO



(a) PAINEL PARA RESOLUÇÃO
FONTE: BOEHLER et al, 2001

(b) RESPOSTA DE LASER SCANNERS

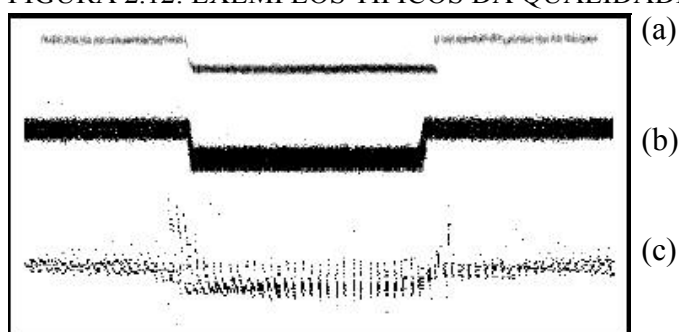
2.3.2 Efeito de bordas

A projeção do raio laser na superfície possui um tamanho que varia conforme o modelo do aparelho e a distância entre o objeto e o aparelho. Quando essa projeção acerta a borda de um determinado objeto, somente uma parte dele será refletida. O resto provavelmente se refletirá a partir de outra superfície adjacente, uma superfície diferente, detrás da borda. Quando o objeto de trás estiver muito distante do scanner, ele poderá não refletir resposta alguma – BOEHLER et al, (2001).

Quando se utiliza alvos padrão com diferentes tipos de bordas, pode-se comparar o desempenho de diferentes tipos de laser scanners. Foi assim que BOEHLER et al (2001) testou o efeito de bordas em diferentes modelos de laser scanners (Figura 2.12). Ele classifica a qualidade das bordas em três níveis:

- Alta qualidade – Borda bem definida e fina, com poucos pontos dispersos (no alto da figura 2.12a).
- Média qualidade – Borda bem definida, mais muito espessa (no meio da figura 2.12b).
- Baixa qualidade – Borda sem forma definida e com muitos pontos dispersos (última da figura 2.12c).

FIGURA 2.12: EXEMPLOS TÍPICOS DA QUALIDADE DE BORDAS



FONTE: BOEHLER et al, 2001

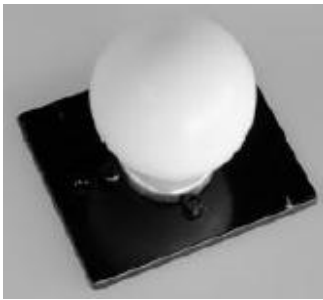
Quando são observados alvos cilíndricos e esféricos em distâncias curtas, é possível detectar efeitos sistemáticos. Nesse caso, nas partes periféricas do objeto, o centro da área de reflectância da superfície não é idêntico ao centro da projeção laser transmitida – BOEHLER et al, (2001).

2.3.3 Acurácia Linear

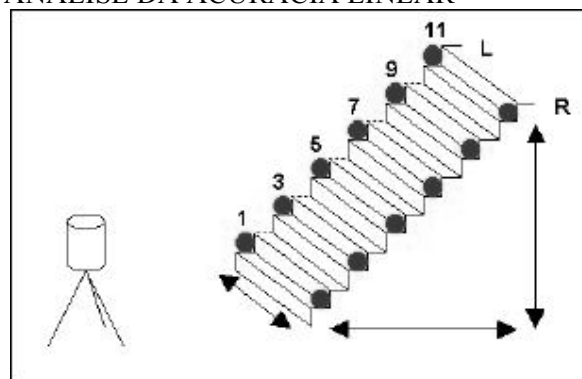
A distância é calculada com base no método time-of-flight (intervalo de tempo) ou com o método de comparação de fase entre o sinal de partida e chegada do pulso laser. Os erros lineares podem ser observados comparando-se a distância obtida pelo laser scanner com métodos tradicionais de maior acurácia, como por exemplo, estações totais ou distanciômetros. Os alvos podem ser planos, cilíndricos ou esféricos e podem ser utilizados desde que tenham posições precisas com instrumentos e métodos mais acurados que o laser scanner – BOEHLER et al, (2001).

BOEHLER et al (2001) testou a acurácia linear de aparelhos laser scanners comparando-se medidas de distâncias feitas por aparelhos laser scanners e por medidores interferométricos. Nesse caso, foram utilizados alvos esféricos brancos, com diâmetros de 76,2 mm fixados em uma placa magnética produzidos pela MENSI, (Figura 2.13a) distribuídos em uma escada ao final de um corredor (Figura 2.13b). Foram feitas várias medidas a diferentes distâncias, variando-se de 3m a 60 m.

FIGURA 2.13: EXPERIMENTO PARA ANÁLISE DA ACURÁCIA LINEAR



(a) ALVOS ESFÉRICOS
FONTE: BOEHLER et al, 2001



(b) ALVOS DISTRIBUÍDOS EM UMA ESCADA

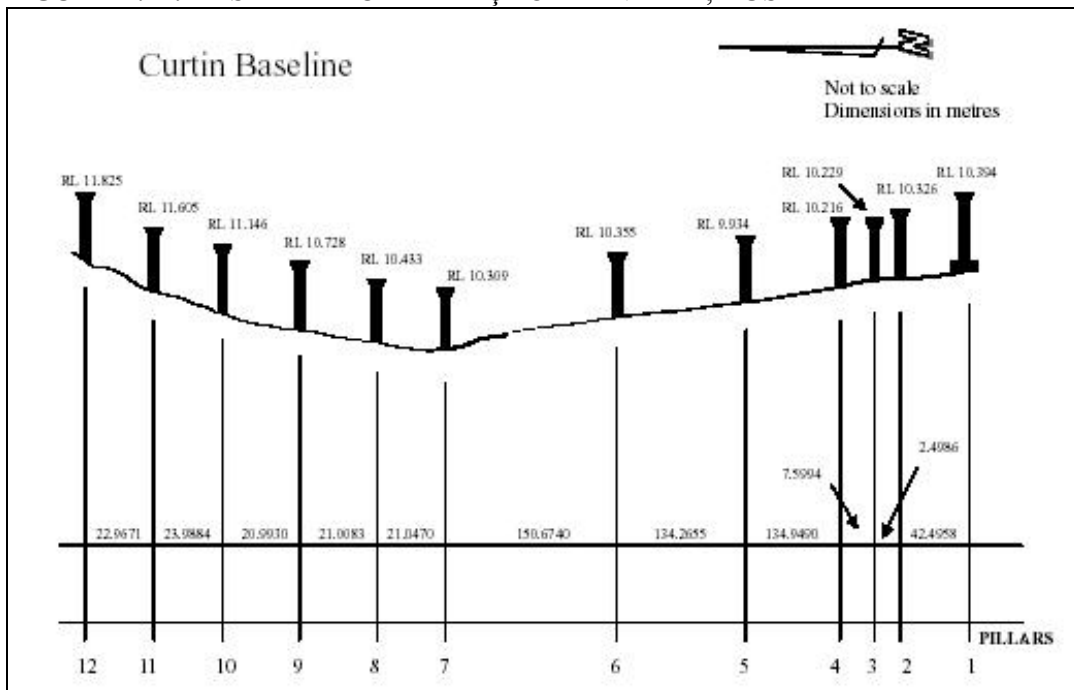
Uma checagem rápida e fácil para o ruído (erro acidental) de medidas lineares pode ser conseguida quando o scanner varre um alvo plano, perpendicular à direção da observação e calculando o desvio padrão das diferenças de distâncias dos pontos à um plano formado através da nuvem de pontos – BOEHLER et al, (2001).

INGENSAND et al (2003) testaram a acurácia linear de sistemas laser scanner terrestre utilizando um campo de calibração de medidores interferométricos, composto

por pilares alinhados, no Instituto de Geodésia e Fotogrametria do Instituto Federal Suíço de Tecnologia. O comprimento da linha de calibração é de 52 m. As medidas de distância obtidas pelo laser scanner foram comparadas com as medidas feitas com o interferômetro laser, que fornece distâncias com acurácia de micrômetros.

LICHTI et al (2000) utilizaram a base para calibração localizada no campus universitário de Bentley, na Austrália Ocidental para verificar a acurácia linear de aparelhos laser scanners. Esta base tem extensão de 600 m e possui 12 pilares alinhados e regularmente monitorados com equipamentos de precisão de primeira ordem (Figura 2.14). Para os testes, o aparelho laser foi posicionado no centro do alinhamento (pilar 6) e um alvo reflectivo foi posicionado na seqüência dos pilares 7 ao 12 e então foram tomadas as distâncias e comparadas com os valores de referência. As medições de distância foram repetidas em até 5 vezes para cada pilar.

FIGURA 2.14: BASE PARA CALIBRAÇÃO - BENTLEY, AUSTRÁLIA



FONTE: LICHTI et al, 2000

2.3.4 Acurácia Planimétrica

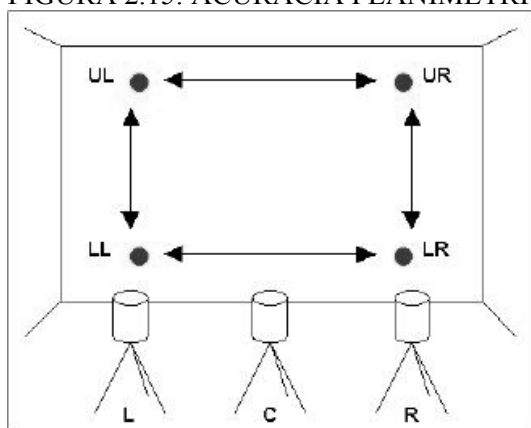
O pulso laser é direcionado por um sistema de espelhos sincronizados. Dois dispositivos (espelhos e/ou prismas) perpendiculares são utilizados para apontar o feixe para diferentes pontos na superfície do objeto. Com a leitura das duas direções no instante de emissão de um pulso, associando a distância instrumento/objeto é possível determinar as coordenadas tridimensionais do objeto [BOEHLER et al, (2001)].

Os erros podem ser detectados comparando-se curtas medidas de distâncias horizontais e verticais entre objetos (alvos), que são colocados a mesma distância do scanner, essa comparação deve ser feita com métodos de maior acurácia que o laser [BOEHLER et al, (2001)].

BOEHLER et al (2001) avalia a acurácia planimétrica com dois testes. O primeiro consiste na utilização de alvos (esferas brancas com uma grade de pontos espaçados de 4 mm) posicionados em pontos bem definidos com métodos topográficos em uma escada ao fim de um corredor de 60 metros. Os alvos são fixados nas extremidades de 6 degraus a uma distância de 1 metro (Figura 2.13). Isso permite o cálculo de 6 distâncias curtas e independentes na direção horizontal e 6 na direção vertical, onde são medidas pequenas diferenças lineares a distâncias maiores de 60 metros.

Outro teste para a avaliação da acurácia planimétrica é feito em uma sala, onde 4 esferas são fixadas em uma parede vertical nos cantos de um retângulo de 3.5 metros de altura por 5 de largura (Figura 2.15). As esferas são posicionadas precisamente e suas posições determinadas por métodos topográficos. Este arranjo é então varrido pelo equipamento laser scanner com uma distância acima de 15 metros com três pontos de observação conforme figura 2.15 para se obter 6 distâncias independentes na horizontal e 6 na vertical, podendo assim comparar as medidas e calibrar os valores.

FIGURA 2.15: ACURÁCIA PLANIMÉTRICA - ALVOS EM UMA PAREDE



FONTE: BOEHLER et al, 2001

HANCOCK et al (1998) testaram a acurácia angular de sistemas laser scanner terrestres em um teste onde se realizou 6 diferentes varreduras em uma imagem. Foram selecionados seis pontos característicos na primeira varredura e comparados nas outras imagens. O azimute e ângulos de elevação obtidos foram comparados para cada ponto e suas médias foram calculadas nas 6 imagens. Para cada ponto nas imagens, o azimute variou conforme a resolução do scanner. Foi comprovado que os erros das variações do ângulo de elevação são causados por grandes movimentos de giro na engrenagem do pivô vertical para o espelho. Quando se varre em uma única direção, são obtidos pequenos erros, mas quando a engrenagem muda a direção do espelho, a diferença do giro resulta em erros de até 3° entre cada elevação calculada. Uma boa calibração de fábrica do mecanismo de giro do espelho reduziria este efeito.

2.4 ESTAÇÕES TOTAIS

Com os avanços da eletrônica e da computação nas últimas décadas, surgiram os equipamentos topográficos eletrônicos para medir direções e distâncias, proporcionando um grande avanço nas tecnologias de captura e processamento dos dados. O emprego dos distanciômetros eletrônicos viabilizou a medição de maiores distâncias com grande precisão (TAVARES, 1998). O surgimento das estações totais, reunindo num único equipamento um “teodolito e um distanciômetro eletrônico” é

considerado como um marco extremamente significativo em toda história da topografia (SOUZA, 2001).

Uma estação total combina três componentes básicos: um medidor eletrônico de distancia, um teodolito eletrônico e um microprocessador, formando um equipamento único (WOLF & BRINKER, 1994). As estações totais podem medir automaticamente ângulos zenitais, verticais ou nadirais, direções horizontais, distâncias inclinadas, calcular instantaneamente as distâncias horizontais e verticais e apresentar os resultados em um visor de cristal líquido. Os dados podem ser armazenados em dispositivos no próprio equipamento ou em coletores de dados externos.

Atualmente o mercado de equipamentos topográficos já dispõe de estações totais que incorporam grandes avanços em relação aos primeiros modelos, entre eles as medições de distâncias sem o uso de prismas. Isto pode facilitar bastante as operações de utilização desses equipamentos e também o alcance de pontos inacessíveis (SOUZA, 2001).

Já existe no mercado também as estações totais “robotizadas”, que são equipadas com servomotores e possuem funções de reconhecimento e busca automática de prismas, o que possibilita a realização da pontaria sem a intervenção do operador. Estes instrumentos podem ser operados remotamente possibilitando a realização de levantamentos com apenas uma pessoa.

3 MATERIAIS

3.1 O LASER SCANNER CYRAX HDS 3000

O laser scanner utilizado nesta pesquisa é o sistema de varredura laser Cyrax HDS 3000 fabricado pela Cyra Tecnologias - (Oakland, E.U.A.), subsidiária da Leica Geosystems. O Sistema consiste do aparelho para varredura laser (Figura 3.1a e 3.1b), o software Cyclone que é executado em um PC, o sistema de força (bateria) e mais acessórios como tripés e alvos.

FIGURA 3.1: LASER SCANNER TERRESTRE



(a) LASER SCANNER CYRAX HDS 3000 (b) APARELHO E PC EM FUNCIONAMENTO
FONTE 3.1(a): LASER SCANNER CYRAX HDS 3000

A unidade de varredura laser tem dimensões de 26,5 cm x 37,0 cm x 51,0 cm e peso aproximado de 16,0 kg. Essa unidade possui duas janelas para captura de dados, cada uma com um espelho giratório, o que possibilita um campo de visão (FOV) de 360° na horizontal e 270° na vertical. O campo de visão e a densidade de varredura podem ser fixados pelo usuário. É possível o registro ou varredura de 1800 pontos por segundo. A unidade de varredura possui também uma máquina fotográfica digital acoplada, com resolução de 1 megapixel, onde cada foto enquadra 24° x 24° de cena. Os dados coletados são apresentados em tempo real para um Laptop através de um cabo de rede. Uma imagem digital da câmara fotográfica é obtida a priori e, nesta imagem, o operador pode selecionar a janela para a varredura. O operador pode também determinar a densidade de projeção dos raios laser em determinada distância.

O pulso laser possui comprimento de onda de 532 nm (faixa visível – verde) e potência inferior a 1 miliWatt, e é classificado como classe 3R, segundo o padrão IEC (International Electrotechnical Commission) 60825-1(2001), que considera os riscos como sendo seguros quando manipulado com cuidado e potencialmente perigoso aos olhos se observado por meio de instrumentos ópticos - DECRETO-LEI n.º163, (2002).

A medida de distância do Cyrax HDS 3000 é baseada no princípio ranging ou intervalo de tempo. O sistema mede as coordenadas tridimensionais dos pontos (x, y, z), além de medir também a intensidade do sinal de retorno dos objetos capturados. No quadro 3.1 são apresentadas as principais especificações do sistema Cyrax HDS 3000. Os valores fornecidos pelo fabricante e mostrados no quadro 3.1, são para operações realizadas a uma distância de 50 metros, mas o alcance máximo de operação do equipamento é de até 100 metros de distância.

QUADRO 3.1: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - LASER SCANNER CYRAX HDS 3000

Acurácia em distância (z)	± 4 mm*
Acurácia planimétrica (x, y)	± 6 mm*
Acurácia angular - Incremento do ângulo entre dois pontos sucessivos (IFOV)	± 60 micro-radianos (12'')*
Acurácia da superfície modelada	± 2 mm*
Acurácia com aquisição de alvos	± 1,5 mm
Campo-de-visão (FOV)	360° horizontal, 270° vertical
Tamanho da projeção do laser	6 mm*
Distância mínima de operação	1 m
Distância máxima de operação	100 m
Taxa de varredura	1800 pontos por segundo
Máxima densidade de resolução	1,2 mm

FONTE: LASER SCANNER CYRAX HDS 3000

* Desde que operado em distâncias de até 50 m

3.2 ALVOS PLANOS REFLETORES

Os alvos planos utilizados foram os alvos HDS LLC Leica Geosystems, elaborados para propósitos de registros (união de nuvens de pontos) e garantia de melhor qualidade nos dados obtidos. Eles permitem um geo-referenciamento acurado quando se tem pontos de controle conhecidos, maior acurácia na união de múltiplas cenas e garantia de qualidade para cenas únicas.

Esses alvos podem ser lidos por instrumentos de inspeção tradicionais (teodolitos e estações totais), pois tem alta reflectância. São fáceis de colocar em qualquer superfície e podem ser posicionados em lugares estratégicos, como pontos de referência. Os alvos planos refletores permitem identificação automática e extração através do *software Cyclone*, devido a diferenças de reflectância entre o centro e a superfície do alvo. São disponíveis em duas diferentes bases para colocação em vários tipos de superfícies: base adesiva e base magnética.

Tipos de alvos planos fabricados pela Leica Geosystems:

- Alvos quadrados: 3"x 3" (Figura 3.2a) - Tamanho pequeno de alvo para uso em áreas congestionadas, à curtas distâncias ou em estruturas estreitas.
- Alvos circulares: 6" de diâmetro (Figura 3.2b) - Alvos grandes para aquisição à longas distâncias ou cenas com pouca densidade.

FIGURA 3.2: ALVOS PLANOS



(a) ALVO QUADRADO



(b) ALVO CIRCULAR

FONTE: LASER SCANNER CYRAX HDS 3000

- Alvos passíveis de giro horizontal e vertical

São os mesmos alvos citados anteriormente, com a diferença de possuírem um encaixe de rosca com diâmetro 5/8" para serem montados em bastões ou suportes magnéticos. Podem ser inclinados e girados para uma orientação mais precisa do scanner. (Figura 3.3a e 3.3b)

FIGURA 3.3: ALVOS GIRATÓRIOS



(a) ALVO QUADRADO GIRATÓRIO



(b) ALVO CIRCULAR GIRATÓRIO

FONTE: LASER SCANNER CYRAX HDS 3000

Para os experimentos de avaliação da acurácia linear e avaliação da acurácia planimétrica, o tipo de alvo utilizado foi o da figura 3.2a, alvo quadrado 3" x 3".

3.3 A ESTAÇÃO TOTAL ELETRONICA TRIMBLE – MODELO 3305 DR

A estação total utilizada como referência para acurácia nesta pesquisa é a Estação Total Eletrônica Trimble 3305 DR (Figura 3.4), fabricado pela TRIMBLE. Este equipamento possui coletor interno para 1900 pontos, transferência de dados bidirecional, 12 programas aplicativos incorporados. Bateria interna NiMH de 6 volts, suficiente para aproximadamente 1000 medidas angulares e de distância. Peso do instrumento com bateria: 3,5 kg.

FIGURA 3.4: ESTAÇÃO TOTAL ELETRÔNICA TRIMBLE - 3305 DR



FONTE: TRIMBLE 3300 DR

Além de realizar medições utilizando prismas e fitas refletoras, esta estação total também obtém medidas de distância por modulação eletro-óptica de laser, para tal, utiliza o método de comparação de fase e possui alcance de até 100 metros. Utilizando

prismas, possui alcance de 5000 metros (um prisma) até 7500 metros (três prismas). Fornece medidas de ângulo horizontal e vertical eletronicamente e possui compensação automática de erros do eixo de visada e erros de colimação.

Este equipamento pode ser utilizado para inúmeras aplicações, tais como:

- Cálculo de área, distância entre dois pontos, linhas ortogonais e paralelas;
- Alinhamento de um ponto a uma linha perpendicular, planos verticais com entrada de dados alfanuméricos;
- Coordenadas: transporte e levantamento por coordenadas, restauração de sistemas, posição em elevação e locação.

No quadro 3.2 são apresentadas as principais especificações da Estação Total Eletrônica Trimble 3305 DR.

QUADRO 3.2: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - ESTAÇÃO TOTAL TRIMBLE 3305 DR*

Acurácia angular	± 1.5 micro-grads ($5''$)
Acurácia das medidas de distância	$\pm (3\text{mm} + 2\text{ppm})^*$
Divergência do feixe laser	4 mrad
Frequência de modulação	300 MHz
Potência de saída máxima	1 mWatt
Comprimento de onda	660 nm (vermelho)*
Resolução	0,1 mm
Distância mínima de operação	1,50 m*
Distância máxima de operação	100 m*
Tempo de medição	3 s até 30 m + 1s/10 m*
Dimensões do Instrumento (WxHxD)	173 x 268 x 193 mm
Temperatura de operação	-20°C a +50°C

FONTE: TRIMBLE 3300 DR

* Valores de referência para operação sem prisma

3.4 SOFTWARES UTILIZADOS

3.4.1 Cyclone 5.1

O Software Cyclone é desenvolvido pela Leica-Geosystems e foi utilizado tanto na obtenção ou varredura das cenas, quanto para o processamento dos dados do laser scanner Cyrax HDS 3000. Nele é possível a visualização das cenas, tanto com as cores reais, obtidas pela câmara fotográfica, como também a visualização da intensidade de retorno do pulso captado pelo sensor. Pode-se manipular os dados de forma a obter-se as distâncias entre os pontos obtidos e também as distâncias dos pontos ao equipamento de varredura. Além disso, o Cyclone fornece como opção exportações nos formatos DXF para manipulação em Auto Cad e formato TXT para obtenção das coordenadas x, y, z e intensidade dos pontos.

3.4.2 Ambiente MatLab

No Ambiente MatLab, foi possível o processamento e cálculos do ajustamento das nuvens de pontos, cálculos estatísticos, como médias, desvio padrão, correlação, entre outros. Nesse ambiente, também foram gerados gráficos dos experimentos. Enfim, toda a parte de cálculos relativos aos testes, foi processada neste ambiente.

3.4.3 Auto Cad

No ambiente Auto Cad foi possível a visualização das cenas obtidas, rotação dos dados, verificação de distâncias, entre outras operações.

3.4.4 Microsoft Office Excell

O software Excell foi utilizado para manipulação dos dados x,y,z, ou seja, para organizar os dados de entrada para o ambiente MatLab. Também se utilizou o Excell na elaboração de alguns gráficos, necessários para uma melhor visualização dos experimentos.

4 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA VARREDURA LASER SCANNER TERRESTRE

4.1 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO

A resolução de um equipamento laser scanner está associada à sua capacidade para detectar pequenos objetos ou parte de objetos na nuvem de pontos. Tecnicamente, duas diferentes especificações de laser scanner contribuem para esta capacidade: o pequeno incremento possível do ângulo entre dois pontos sucessivos e o tamanho da projeção do raio laser no objeto [BOEHLER et al, 2001].

É de extrema importância o conhecimento prévio da resolução de um equipamento laser scanner em determinadas distâncias. Assim, dependendo do detalhamento desejado dos objetos a serem levantados, é possível definir a distância de operação e utilização do equipamento. Por isso, o interesse na determinação da variação da resolução dos equipamentos laser scanners terrestres em função da distância de operação.

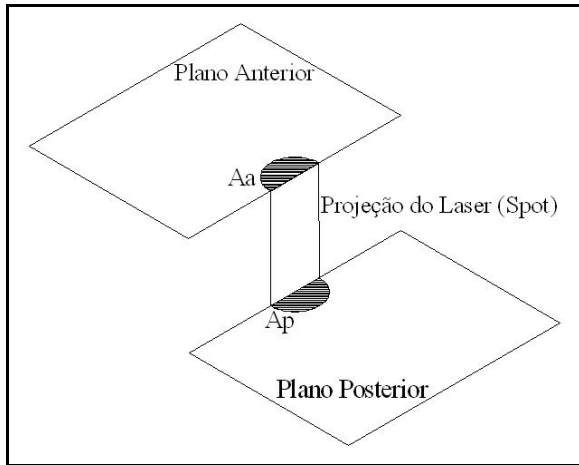
Para avaliar o tamanho da projeção laser, foram desenvolvidos dois métodos: o método analítico e o método direto.

4.1.1 Método Analítico

O objetivo desse método é estimar o diâmetro da projeção do feixe laser com base em um modelo matemático que descreve o comportamento do efeito de bordas.

O efeito de bordas acontece devido à divergência do pulso laser e ocorre quando se leva em consideração a diferença de penetração que pode existir em um único pulso. Ocorre principalmente quando a projeção do laser toca as bordas de um objeto e parte da resposta que volta ao scanner é do objeto em si, mas outra parte é de um outro objeto adjacente (Figura 4.1) ou às vezes nem retorna, quando o objeto de trás está muito longe do scanner.

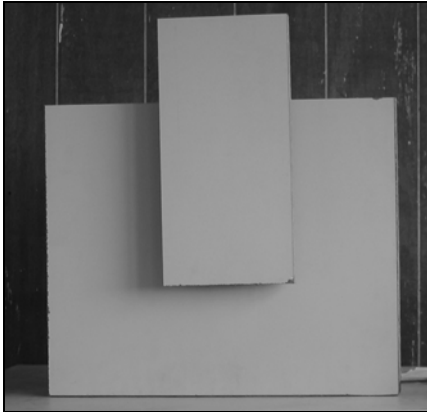
FIGURA 4.1: DIFERENÇA DE PENETRAÇÃO DE UM ÚNICO PULSO EM DIFERENTES OBJETOS (PLANOS)



Como pode ser observado na figura 4.1, o efeito de bordas está muito ligado ao tamanho da projeção do laser, mas também ocorre em scanners com projeção do laser (*spot*) pequenas e bem definidas, sendo uma característica de praticamente todos os equipamentos de laser scanner terrestre. O efeito de bordas é mais grave em sistemas laser scanner que registram um único retorno do pulso refletido, integrando toda a resposta em um retorno médio. Este é o caso do equipamento laser utilizado nos testes (Cyrax HDS 3000 – Leica). O fenômeno do efeito de bordas praticamente não ocorre em sistemas laser scanners que registram o primeiro e o último pulso de retorno, pois neles, o sistema mede as duas parcelas refletidas separadamente. Porém, a intensidade do retorno será mais fraca nesses pontos, tanto no primeiro, como no segundo pulso.

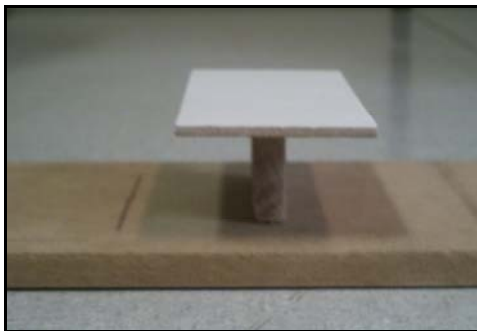
Para avaliar esse efeito no laser scanner HDS 3000, primeiramente foi elaborado um teste que consiste de duas placas de madeira coladas, que formam dois planos com distância de 6 cm um do outro, como pode ser visto na figura 4.2. Esses planos foram varridos a diferentes distâncias, 5, 15, 30 e 60 metros, com o intuito de avaliar o comportamento na borda do plano da frente. Neste experimento, foi verificado que os dados correspondentes à borda não configuram uma transição brusca entre os dois planos, mas que a transição ocorre sob forma de uma curva com formato de “S”.

FIGURA 4.2: PLACA TESTE PARA AVALIAR O EFEITO DE BORDAS



Depois de verificada a consistência do teste, o experimento foi melhorado, elaborando-se outra placa com dimensão de 5 x 10 cm, pintada na cor branca, sobreposta paralelamente à uma placa maior com dimensão de 40 x 10 cm, ambas de madeira (figura 4.3a). O afastamento entre as placas é de cerca de 30 mm e elas podem ser fixadas em painéis ou paredes. Na figura 4.3b é mostrado também o elemento de suporte para os experimentos: um anel metálico dotado de parafusos, que permite a fixação em postes.

FIGURA 4.3: PLACAS PARA ANÁLISE DO EFEITO DE BORDAS



(a) VISTA LATERAL



(b) VISTA FRONTAL, FIXADA EM POSTE

A análise de bordas é feita exatamente nos limites da placa sobreposta, onde uma parte da projeção atinge a placa sobreposta e outra parte da mesma projeção laser toca a placa adjacente.

Esses novos planos foram posicionados em uma série de postes alinhados e afastados em torno de 20 metros um do outro. Então, repetiu-se o teste, agora com 6 varreduras, obtendo um número de informações bem maior que no primeiro teste. As

distâncias em que as placas foram varridas pelo sistema laser foram de aproximadamente: 7m, 27m, 47m, 67m, 87m e 107m.

4.1.1.1 Organização dos dados

Antes da descrição da metodologia adotada para avaliação da resolução em função do efeito de bordas, foi necessário organizar os dados coletados da nuvem de pontos varrida pelo laser scanner.

Para avaliar a resolução, foram utilizados arquivos de texto com as coordenadas x , y , z da varredura de cada placa contendo os dois planos em diferentes distâncias, como descrito anteriormente. Essas coordenadas são originalmente armazenadas no referencial do equipamento laser, que tem sua origem no equipamento. A orientação do objeto em relação a este sistema não coincide com os eixos coordenados. Para facilitar a análise e avaliação, considerou-se necessário transformar estas coordenadas para um sistema mais apropriado. A orientação ideal do novo sistema é com dois eixos num plano paralelo aos planos físicos do objeto e o terceiro perpendicular a eles. Assim, no terceiro eixo poderia ser medida distância de um ponto a qualquer um dos planos.

A transformação consiste basicamente de uma rotação. O método adotado para obter os parâmetros da matriz de rotação foi a Análise por Componentes Principais (ACP) aplicada às coordenadas tridimensionais de um pequeno recorte correspondente à superfície de um dos planos modelados. Como estes planos não se encontram paralelos aos eixos do sistema do dispositivo, suas coordenadas são correlacionadas. A obtenção dos autovetores pelo método das componentes principais corresponde, na prática, à obtenção dos parâmetros da transformação de rotação de forma que o sistema de coordenadas tenha dois eixos na superfície do plano.

A transformação das componentes principais consiste em reescrever as coordenadas de um conjunto de dados em um outro sistema de eixos, onde a correlação entre variáveis é mínima. Esta propriedade se presta adequadamente para a finalidade pretendida.

As novas coordenadas são o resultado da combinação linear das variáveis originais e são representadas sobre eixos ortogonais. O número total de componentes principais é igual ao número total de variáveis originais e apresenta a mesma informação que estas variáveis. Este método permite também a redução do número total de variáveis, pois freqüentemente as primeiras componentes principais detêm mais de 90% da informação estatística dos dados originais [JOHNSON & WICHERN, 1988], porém esta propriedade não foi utilizada neste estudo. Para determinação do novo sistema, utilizou-se a equação 4.1:

$$N_{sis} = |M| \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Onde:

N_{sis} é o novo sistema de coordenadas;

$|M|$ é a matriz dos autovetores;

$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ são as coordenadas do antigo sistema.

Segundo JOHNSON & WICHERN (1988), o cálculo dos parâmetros da transformação das componentes principais baseia-se na determinação dos autovalores e autovetores da matriz de correlação ou de covariância (Σ). Os autovalores são as raízes da equação polinomial definida pela equação 4.2:

$$|\Sigma - \lambda \cdot I| = 0 \quad (4.2)$$

Onde:

Σ é uma matriz de covariância ou de correlação;

λ é o autovalor;

I é uma matriz identidade.

Cada autovalor corresponde um autovetor, que satisfaz à equação 4.3:

$$\Sigma.a = \lambda.a \quad (4.3)$$

Uma vez que os autovetores não são únicos, eles são normalizados, de forma que:

$$a_i' a_i = 1 \quad (4.4)$$

Os autovetores de Σ são ortogonais, isto é:

$$a_i' a_j = 0 \quad (4.5)$$

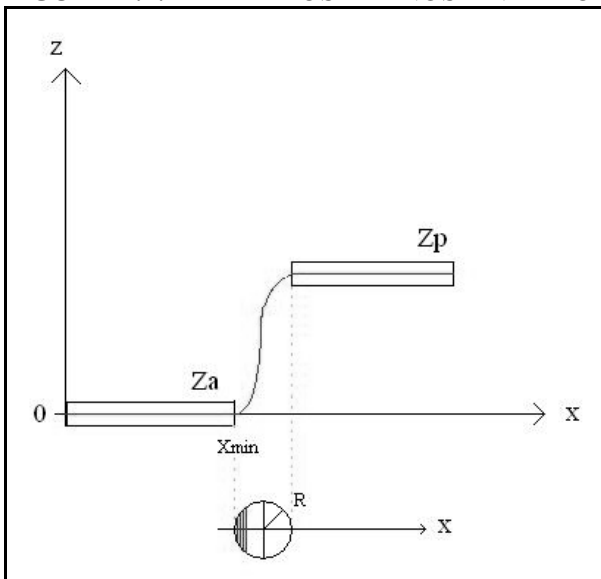
Depois dos dados rotacionados e organizados, é necessária a modelagem matemática do método para avaliação da resolução em função do efeito de bordas.

4.1.1.2 Modelagem matemática

Alguns sistemas laser possuem como característica a medição de diferentes retornos do sinal emitido, sendo possível à medição do primeiro e do último retorno do pulso, permitindo assim, a distinção entre diferentes elevações presentes na varredura - CAVASSIM JÚNIOR, (2004). Em sistemas onde esse detalhamento da medição não ocorre (caso do modelo laser scanner HDS 3000), é feita a captura de um único sinal de resposta, e quando acontece a medição na borda do objeto, o sinal de resposta é uma média ponderada das diferentes elevações (alturas) contidas na varredura, podendo gerar assim, alturas inexistentes ou falsas alturas. Então pode-se supor que se um pulso atingir a borda, será parcialmente refletido pelo objetos na frente e parte dele pela superfície no fundo. Assim, a altura ou profundidade da projeção será a média das duas profundidades, ponderadas pela respectiva área (A_a : área anterior ou A_p : área posterior). Na figura 4.1, foi mostrado um exemplo onde o laser atingiu exatamente a borda, sendo metade dele refletido por cada superfície. Neste caso, o valor de profundidade registrado é a média das duas profundidades.

Para analisar a dependência entre a altura de pontos considerados bordas e a distância do centro do *spot* com relação à posição do ponto, é suposto que o intervalo considerado borda representa exatamente a área de uma projeção laser. Assim, quando o laser começa a tocar a borda significa que ele já não pertence totalmente ao plano anterior, estando entre os dois planos, e somente após percorrer esse intervalo onde atinge os dois planos é que ele passa a tocar exclusivamente o plano posterior. Quando isso acontece, não se considera mais efeito de bordas, pois o laser está totalmente no plano posterior. Então pode-se dizer que o efeito de bordas acontece somente quando o laser atinge os dois planos simultaneamente, o que equivale a uma projeção laser, conforme observado na figura 4.4.

FIGURA 4.4: PERFIL DOS PLANOS ANTERIOR E POSTERIOR



A altura final do retorno do pulso laser (z) é a média ponderada entre a altura multiplicada pela área atingida nos planos anterior e posterior (equação 4.6):

$$Z \cdot A_t = Z_a \cdot A_a + Z_p \cdot A_p \quad (4.6)$$

Onde:

Z = coordenada z do retorno do pulso;

Z_a = coordenada pertencente ao plano anterior;

Z_p = coordenada pertencente ao plano posterior;

A_a = área do plano anterior;

A_p = área do plano posterior;

A_t = área total do pulso laser.

Considerando a origem passando pelo plano anterior (Z_a), conforme ilustra a figura 4.5, tem-se então:

$$(Z - Z_a) \cdot A_t = (Z_a - Z_a) \cdot A_a + (Z_p - Z_a) \cdot A_p \quad (4.7)$$

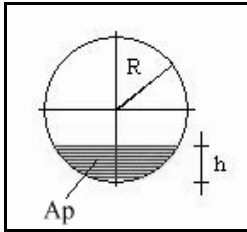
$$(Z - Z_a) = \frac{(Z_p - Z_a) \cdot A_p}{A_t} \quad (4.8)$$

A área total (A_t) do pulso laser será considerada como sendo circular, embora se saiba que ela somente é circular quando o laser atinge o objeto perpendicularmente ao plano de varredura. Quando o objeto encontra-se com alguma inclinação essa área passa a ser elíptica, o que tornaria os cálculos mais complexos.

$$A_t = \pi \cdot R^2 \quad (4.9)$$

Para o cálculo da área parcial que toca o plano posterior (A_p), utiliza-se a equação 4.10, que é baseada no cálculo da área da seção transversal do escoamento em condutos não forçados (figura 4.5). Essa consideração deve ser feita devido ao fato da área ficar dividida parte em um plano e outra parte no outro plano. Assim, a parte hachurada da figura 4.5 pertence ao plano posterior e a outra parte pertence ao plano anterior, e pela modelagem estabelecida, o interesse é calcular da área do plano posterior, ou seja, a área hachurada.

FIGURA 4.5: ÁREA CIRCULAR EM FUNÇÃO DO RAIO R E DE h



$$A_p = \frac{\pi \cdot R^2}{2} - R^2 \cdot \arcsen\left(1 - \frac{h}{R}\right) - (R - h) \cdot \sqrt{h \cdot (2 \cdot R - h)} \quad (4.10)$$

Onde:

R = raio da circunferência;

$h = x - x_{\min}$.

Conforme o que foi representado na figura 4.4, pode-se melhor entender o valor de h , que será o valor da coordenada x do ponto, menos o valor do x_{\min} . Onde x_{\min} é o menor ou primeiro valor de x quando se inicia a transição da projeção dos pontos do plano anterior para o plano posterior.

Juntando as equações 4.9 e 4.10 na equação 4.8, tem-se então um modelo matemático (equação 4.11) que é utilizado para o ajustamento dos valores de x_{\min} e de R . Com esse ajustamento, é possível encontrar o valor do raio que mais se ajusta a esses dados.

$$(Z - Z_a) = \frac{(Z_p - Z_a)}{\pi \cdot R^2} \left(\frac{\pi \cdot R^2}{2} - R^2 \cdot a \sin\left(1 - \frac{h}{R}\right) - (R - h) \cdot \sqrt{h \cdot (2 \cdot R - h)} \right) \quad (4.11)$$

4.1.1.3 Ajustamento das informações coletadas

Para o ajustamento dos dados obtidos, optou-se pelo método dos parâmetros, cujo modelo matemático (equação 4.12) expressa os valores observados ajustados como uma função explícita dos parâmetros ajustados. Segundo GEMAEL (1994),

partindo de valores aproximados, calculam-se as correções que transformam aqueles valores provisórios nos parâmetros ajustados.

$$L_a = F(X_a) \quad (4.12)$$

Sabe-se que a linearização por Taylor conduz à equação 4.13:

$$AX + L = V \quad (4.13)$$

Onde:

L são as observações;

$$L = L_0 - L_b = F(X_0) - L_b$$

Para obter $L_0 = F(X_0)$, que são as observações estimadas, adota-se um vetor dos valores aproximados dos parâmetros, ou seja, estima-se um valor inicial para o raio (R) e para o x inicial (x_{\min}). E neste caso $L_b = (Z - Z_a)$. Assim, o vetor das observações (L) pode ser obtido.

A partir da equação 4.14,

$$X = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot L \quad (4.14)$$

e considerando-se que todos os dados possuem o mesmo peso ($P=1$), obtém-se a equação 4.15:

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot L \quad (4.15)$$

Ainda é necessário o cálculo da matriz A (equação 4.16), que é obtida através das derivadas do modelo matemático em relação aos parâmetros, que são R e x_{\min} :

$$A = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{x_0} \quad (4.16)$$

Na equação 4.17, tem-se a derivada do modelo matemático (equação 4.11) em relação a R:

$$\frac{\partial(Z - Z_a)}{\partial R} = -\frac{(Z_p - Z_a)}{\pi \cdot R^2} \cdot \left[\frac{h}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{h}{R}\right)^2}} + \frac{(2 \cdot h - R) \cdot \sqrt{h(2 \cdot R - h)}}{R} + \frac{h \cdot (R - h)}{\sqrt{h \cdot (2 \cdot R - h)}} \right] \quad (4.17)$$

Na equação 4.18, tem-se a derivada do modelo matemático (equação 4.11) em relação a x_{\min} :

$$\frac{\partial(Z - Z_a)}{\partial x_{\min}} = \frac{(Z_p - Z_a)}{\pi \cdot R^2} \cdot \left[-\frac{R}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{h}{R}\right)^2}} + \sqrt{h(2 \cdot R - h)} + \frac{(R - h) \cdot h \cdot (h - 2 \cdot R)}{2 \cdot \sqrt{h \cdot (2 \cdot R - h)}} \right] \quad (4.18)$$

Ao final do ajustamento, com a solução da equação 4.15, obtém-se o vetor dos parâmetros ajustados, ou seja, o valor do raio (R) e do x inicial (x_{\min}), que melhor se ajustam aos dados, obedecendo aos critérios do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

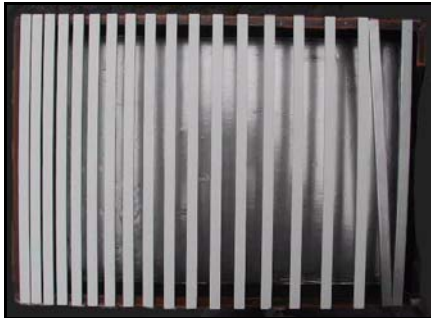
Assim, em função do comportamento relacionado ao efeito de bordas, é possível a obtenção do valor da projeção do feixe laser na superfície. Os resultados dos experimentos utilizando este método são apresentados no capítulo 5, item 5.1.

4.1.2 Método Direto

A proposta desse método é obter de forma rápida e direta uma estimativa da resolução de sistemas laser scanner terrestres, por isso elaborou-se o seguinte experimento:

Construiu-se uma caixa em forma de grelha (figura 4.6), onde filetes de madeira foram arranjados com diferentes espaçamentos para análise do diâmetro da projeção do feixe laser, ou seja, verificar se o laser consegue atingir as fendas e obter respostas de reflectância do fundo da caixa.

FIGURA 4.6: CAIXA PARA ANÁLISE DA RESOLUÇÃO



(a) VISTA FRONTAL



(b) CAIXA SENDO VARRIDA EM CAMPO

Essa caixa possui dimensões de 36 cm x 25 cm e profundidade de 4 cm, a parte da frente é composta por filetes de madeira, pintados de branco, com 1 cm de largura (figura 4.6a). O fundo da caixa foi pintado com tinta metálica, esperando-se uma reflectância melhor.

O espaçamento dos filetes iniciou-se em 1 mm e foi até 12 mm variando de 1 em 1 mm. Na seqüência utilizou-se um intervalo de 2 mm até atingir um afastamento entre os filetes de 20 mm. Assim, pode-se analisar discretamente o diâmetro da projeção laser em função da abertura das fendas da caixa.

Ao final desta distribuição, foram colocados 2 filetes inclinados para análise contínua da abertura da fenda, criando assim, mais duas aberturas: uma que na parte inferior tem abertura de 15 mm e vai subindo até fechar em zero e outra que na parte superior mede 20 mm e vai descendo até finalizar em zero.

Com as respostas de reflectância do fundo da caixa, pode-se estimar a resolução do feixe laser. Assim, se o laser possui pequenos incrementos angulares e pequena projeção do laser, significaria que ele possui alta resolução e consegue obter detalhes de pequenos objetos. Com esse experimento, é possível analisar discretamente o diâmetro da projeção laser em função da abertura das fendas da caixa.

A caixa é então varrida pelo laser scanner em diferentes distâncias. Assim, por exemplo, se a 30 metros de distância for obtida resposta do fundo a partir da abertura de 4 mm em diante, é estipulado como resolução do laser o valor de 4mm para 30 metros, pois foi a menor abertura ultrapassada nessa distância.

No experimento, foram feitas seis varreduras em diferentes distâncias: 10, 30, 50, 70, 90 e 110 metros, com a finalidade de avaliar a resolução do equipamento laser scanner terrestre com a variação das distâncias. Os resultados dos experimentos utilizando este método são apresentados no capítulo 5, item 5.2.

4.2 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA

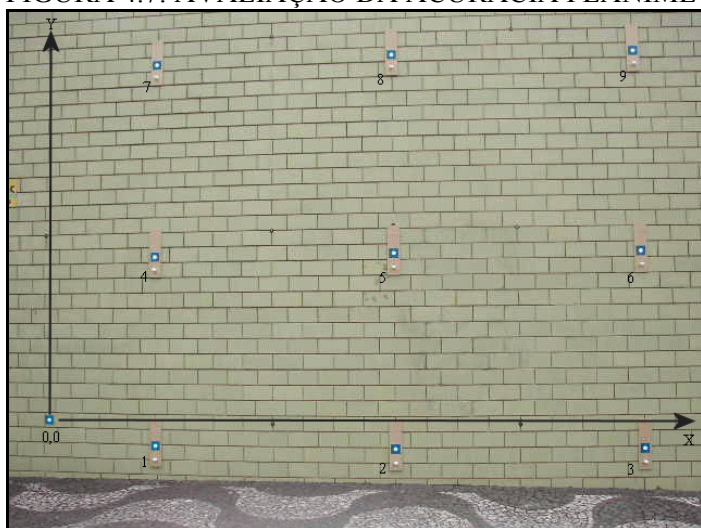
Devido ao fato de o pulso laser ser direcionado por um sistema de espelhos e/ou prismas giratórios sincronizados, podem ocorrer possíveis erros mecânicos, além das divergências do feixe laser. No laser scanner Cyrax HDS 3000, são utilizados dois espelhos para direcionar o feixe em diferentes pontos na superfície dos objetos. Com a leitura das duas direções no instante de emissão de um pulso, associando a distância instrumento/objeto é que se determinam as coordenadas tridimensionais do objeto. Portanto, qualquer divergência angular resultará em erros perpendiculares na propagação da trajetória.

Esses erros em posição planimétrica (x , y) são detectados comparando-se medidas de distâncias horizontais e verticais entre alvos, que são fixados em um mesmo plano (uma parede), a determinada distância do scanner. Então essas distâncias horizontais e verticais são comparadas com um instrumento de maior acurácia que o laser, neste caso, uma estação total.

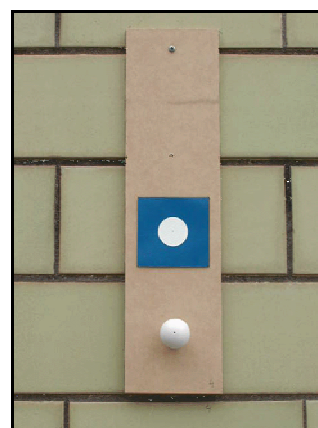
O objetivo deste experimento é avaliar a acurácia planimétrica do equipamento laser scanner terrestre, considerando diferenças de acurácia nas direções horizontal e vertical do equipamento.

Para avaliar a acurácia planimétrica no laser scanner HDS 3000, foi elaborado um experimento que consiste da fixação de alvos em uma parede vertical externa, localizada no Centro Politécnico do campus Jardim das Américas, da Universidade Federal do Paraná. Nesta parede, foram distribuídas 9 placas com alvos (Figura 4.7) e arbitrou-se uma origem para o sistema, onde foi fixado um alvo como referência.

FIGURA 4.7: AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA



(a) DISTRIBUIÇÃO DOS ALVOS NA PAREDE



(b) PLACA COM ALVOS

A área onde as placas foram fixadas mede em torno de 4 metros de largura, por 3 metros de altura. Na horizontal, posicionou-se uma placa a cada 2 metros e na vertical, uma a cada 1,5 metros. As placas foram posicionadas precisamente e as posições de cada alvo foram determinadas com o uso da estação total eletrônica Trimble 3305 DR.

Este arranjo foi então varrido pelo equipamento laser scanner a uma distância de 12 metros. A partir daí, foram obtidas 9 distâncias verticais e 9 horizontais entre os alvos planos na varredura, totalizando assim 18 distâncias obtidas. Essas distâncias foram então comparadas com os valores horizontais e verticais obtidos com a estação total. Os resultados desse experimento são apresentados no capítulo 5, item 5.4.

4.3 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA LINEAR (DISTÂNCIA)

Os erros lineares ou de distâncias podem ser observados comparando-se a distância obtida pelo laser scanner com métodos tradicionais de maior acurácia, como por exemplo, estações totais ou distanciômetros. Para essa comparação, que é o princípio do método para avaliação da acurácia linear, podem ser utilizados alvos planos ou tridimensionais, desde que eles possuam posições precisas com instrumentos e métodos mais acurados que o laser scanner. Esse método de avaliação da acurácia linear pode ser aplicado em equipamentos cujo princípio de funcionamento para o cálculo de distância seja o método “time-of-flight” (intervalo de tempo) ou o método da diferença de fase entre o sinal de partida e chegada do pulso laser.

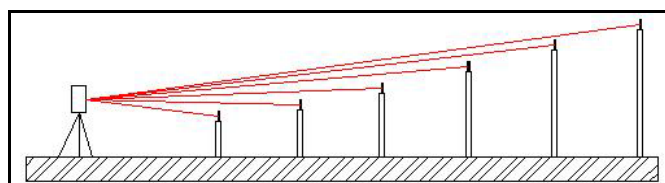
O princípio de funcionamento para o cálculo da distância do equipamento usado nos testes é o método do intervalo de tempo e a comparação entre medidas de distâncias lineares foi realizada com o auxílio de uma estação total. Nestes experimentos não foram aplicadas as correções devido as condições meteorológicas, fato explicado devido a curta distância máxima de operação do equipamento laser scanner, que é de 100 metros.

Para avaliar a acurácia linear, foi necessário buscar um lugar que oferecesse pelo menos 100 metros de visibilidade, pois essa é a recomendação de máxima distância operada pelo equipamento. Esta base foi materializada no próprio campus da Universidade Federal do Paraná. Ao lado do bloco VI do Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, na seqüência de postes da iluminação externa (Figura 4.8a). Esses postes de iluminação são fixados a cada 20 metros de distância.

FIGURA 4.8: SEQUENCIA DE POSTES ALINHADOS - ACURÁCIA LINEAR



(a) FOTO DO LOCAL



(b) DISPOSIÇÃO DOS ALVOS

As placas com os alvos foram fixadas seguindo uma linha aproximadamente reta, na seqüência dos postes (Figura 4.8b). O laser scanner e a estação total foram colocados na mesma posição, um em cada momento, utilizando o mesmo tripé para os dois equipamentos. O tripé foi montado a uma distância de 10 metros do primeiro poste. Então a cada 20 metros foi fixada uma placa com os alvos. As distâncias analisadas foram: 10, 30, 50, 70, 90 e 110 metros.

Depois de fixados os alvos e montado o tripé, instalou-se o laser scanner e a varredura foi feita para cada placa nas diferentes distâncias. Concluída esta etapa, retirou-se o equipamento do tripé e instalou-se a estação total na mesma posição. As medidas de distância da estação até o centro de cada alvo foram então obtidas de maneira rápida com a estação total.

A estação apresenta $3 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ de precisão enquanto que o laser scanner possui 6 mm. As distâncias entre os alvos e os equipamentos foram obtidas e comparadas, tendo como referência os valores da estação total. Os resultados desse experimento são apresentados no capítulo 5, item 5.5.

4.4 AVALIAÇÃO DO USO DE ALVOS TRIDIMENSIONAIS ESFÉRICOS

Durante a realização dos experimentos já descritos, sentiu-se a necessidade da busca por novos tipos de alvos para uma possível redução de custos. Os alvos planos refletores possuem um custo muito elevado por serem fabricados pela Leica-Geosystems, necessitando de importação, o que torna alguns experimentos praticamente inviáveis. A solução encontrada foi a elaboração de um alvo tridimensional esférico de baixo custo.

No mercado já existem alguns modelos de alvos tridimensionais, como por exemplo, o alvo produzido pela MENSI, que é de cor branca, fixado em uma placa magnética, com diâmetro de 76,2 mm (figura 4.9a). Mas esses acessórios ainda possuem um custo elevado devido à importação.

Para a elaboração de um alvo tridimensional esférico de baixo custo, foram utilizados elementos esféricos de madeira, com aproximadamente 31 mm, que foram

pintados na cor branca (figura 4.9b). No centro desses elementos esféricos foi feito um pequeno furo de aproximadamente 2 mm de diâmetro com 5 mm de profundidade para que as leituras com a estação total fossem realizadas e os valores fossem então comparados.

FIGURA 4.9: ALVOS TRIDIMENSIONAIS ESFÉRICOS



(a) ALVO MENSI
FONTE 4.9(a): MENSI



(b) ALVO TESTADO

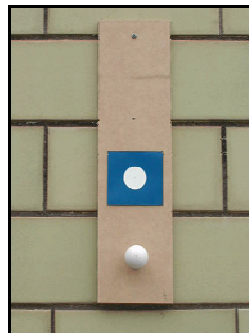
Para avaliar o desempenho e a acurácia desses alvos esféricos, foram utilizados dois dos experimentos já descritos: o da avaliação da acurácia planimétrica (item 4.2) e o da avaliação da acurácia linear (item 4.3), que foram realizados com o uso do alvo plano refletor. Assim, os mesmos experimentos foram repetidos, mas desta vez, com a utilização dos alvos tridimensionais esféricos. O desempenho dos alvos esféricos é avaliado nesses experimentos, tendo como referência os alvos planos refletores.

Os alvos foram fixados em placas de madeira de 40 x 10 cm. Essas placas foram fixadas em postes para a avaliação da acurácia linear (figura 4.10a), e em uma parede para a avaliação da acurácia planimétrica (figura 4.10b).

FIGURA 4.10: ALVOS PLANOS E TRIDIMENSIONAIS ESFÉRICOS



(a) FIXADOS EM POSTES



(b) FIXADOS EM UMA PAREDE.

No experimento para avaliar a acurácia planimétrica na direção horizontal e vertical no laser scanner HDS 3000, foram fixados 9 placas com alvos em uma parede localizada na UFPR. Essa parede com a distribuição pode ser vista na figura 4.7, na descrição do experimento da acurácia planimétrica.

As posições de cada alvo foram determinadas com a estação total Trimble 3305 DR e posteriormente foi varrido pelo equipamento laser scanner em duas tomadas, uma à 8 metros e outra à 12 metros de distância. A partir daí, foram obtidas nove distâncias verticais e nove horizontais entre os alvos tridimensionais esféricos em cada uma das duas varreduras, totalizando assim 36 distâncias obtidas. Como esse experimento também foi realizado utilizando-se alvos planos refletores, os resultados entre alvos planos e esféricos foram comparados, podendo assim, obter-se uma avaliação dos alvos esféricos, tendo como referência os alvos planos refletores. Os resultados são apresentados no capítulo 5, item 5.6.1.

Com relação ao experimento para avaliação da acurácia linear, seis placas com os dois tipos de alvos foram fixadas na mesma seqüência de postes (Figura 4.10a) descrita no experimento da acurácia linear. Em cada placa foram colocados dois tipos de alvo, um alvo plano e um alvo tridimensional esférico, para obtenção de resultados das medidas de distância com os dois tipos de alvos.

A partir daí, foram feitas as leituras de distância da estação até o centro de cada alvo com a estação total eletrônica Trimble 3305 DR e também as varreduras laser scanner. As distâncias entre os alvos e os equipamentos foram obtidas e comparadas, tendo como referência os valores da estação total. Os resultados desse experimento são apresentados no capítulo 5, item 5.6.2.

Assim, os resultados entre alvos planos e esféricos são comparados, obtendo-se uma avaliação dos alvos esféricos, tendo como referência os alvos planos refletores.

4.5 AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO DA NUVEM DE PONTOS

Na varredura com o laser scanner terrestre é normal o aparecimento de ruídos, ou seja, a nuvem de pontos apresenta certa dispersão. Isso pode ser facilmente percebido quando se faz a varredura de um plano qualquer. Os pontos não possuem exatamente a mesma posição em z, ou na distância equipamento objeto.

Segundo BOEHLER et al, (2001), um método rápido para verificar a dispersão dos pontos, que é um erro acidental das medidas lineares, pode ser conseguido quando o laser scanner varre um plano, perpendicular à direção da observação. Então se calcula o desvio padrão das diferenças de distâncias dos pontos com relação a um plano formado através da nuvem de pontos, obtendo assim, a dispersão desses pontos.

O objetivo deste experimento é avaliar a dispersão da nuvem de pontos em um plano perpendicular à direção de observação do equipamento laser scanner terrestre, comparando medidas de variância e desvio padrão em diferentes distâncias de obtenção de dados.

Para essa avaliação, foi escolhido o mesmo local dos experimentos para avaliação da acurácia linear e avaliação da resolução em função do efeito de bordas. Aproveitou-se a mesma placa que foi utilizada para avaliar o efeito de bordas, fazendo-se um recorte em um dos planos (Figura 4.11). Essas placas estavam fixadas a cada 20 metros de distância. E as distâncias analisadas foram: 7, 27, 47, 67, 87 e 107 metros. Para a análise, cada recorte foi avaliado separadamente.

FIGURA 4.11: RECORTE USADO NA AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO



Para avaliação da dispersão, elaborou-se um programa no ambiente MatLab, onde os dados de entrada são as coordenadas x , y , z de cada recorte na sua respectiva distância. Então é feito um ajustamento desses dados utilizando o método dos parâmetros, que obedece aos critérios do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) [GEMAEL, 1994]. Através do ajustamento, é possível obter os coeficientes do plano médio formado pelo recorte da nuvem de pontos analisada.

Tendo os coeficientes do plano médio formado pelas coordenadas, é possível obter-se a distância de cada ponto com relação a esse plano médio através da equação 4.19, que determina a distância do ponto P_0 a um plano α (VENTURI, 1991):

$$d(P_0, \alpha) = \frac{|a \cdot x_0 + b \cdot y_0 + c \cdot z_0 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (4.19)$$

Onde:

a , b , c , d são os coeficientes do plano α e;

x_0 , y_0 , z_0 são as coordenadas de cada ponto P_0 .

Depois de calculadas as distâncias de cada ponto ao plano médio, calculou-se a média, a variância e o desvio padrão dessas distâncias, pois segundo GEMAEL (1994), a média aritmética é um estimador eficiente, pois atende ao requisito do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), fornecendo variância mínima, ou seja, o somatório do quadrado dos resíduos é mínimo ($\sum V^T P V = \min$), desta forma, pode-se dizer que ela reúne predicados que a qualificam como um ótimo estimador da média populacional. E para estimar o grau de precisão, adotou-se o desvio padrão, que é a própria medida de dispersão. Os resultados desse experimento são apresentados no capítulo 5, item 5.7.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

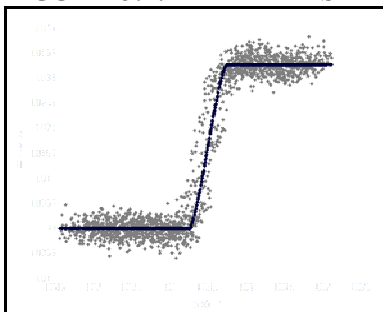
5.1 AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO – MÉTODO ANALÍTICO

O método analítico avalia a resolução em função do efeito de bordas, ou seja, através dele é possível estimar o raio da projeção do laser. Além disso, permite observar como os pontos se distribuem nas bordas dos objetos varridos pelo sistema laser scanner terrestre.

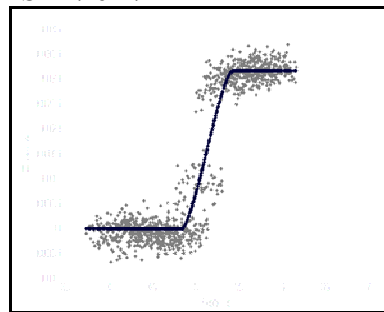
As figuras seguintes (5.1 a 5.3) são recortes de perfis das placas, varridas a diferentes distâncias que variam de 7 a 107 metros. Pode-se perceber que a passagem dos pontos de um plano para outro não é brusca, mas descreve uma linha com transição suave. A linha contínua mais escura no centro da distribuição dos pontos observados é a distribuição dos pontos ajustados. O que pode ser visto também é que o número de pontos de bordas (entre os planos) aumenta conforme aumenta a distância de varredura do objeto.

Abaixo de cada gráfico de distribuição dos pontos, estão os valores correspondentes do diâmetro de projeção do laser. Estes valores possibilitam estimar a resolução do equipamento laser a cada distância. Por exemplo: a uma distância de 7 metros o equipamento capta detalhes de até 4,8 mm (Figura 5.1a); enquanto que a 107 metros de distância, o sistema pode detalhar objetos de 12,2 mm (Figura 5.3b).

FIGURA 5.1: PERFIL DAS PLACAS VARRIDAS A 7 e 27 m



a) PLACAS A 7 m.
DIÂMETRO DA PROJEÇÃO: 4,8 mm



b) PLACAS A 27 m.
DIÂMETRO DA PROJEÇÃO: 5,8 mm

FIGURA 5.2: PERFIL DAS PLACAS VARRIDAS A 47 e 67 m

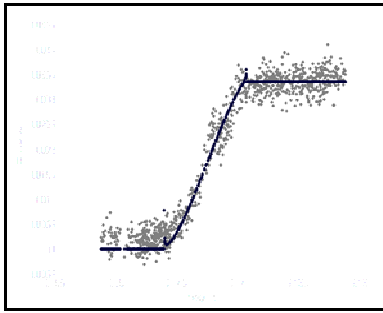
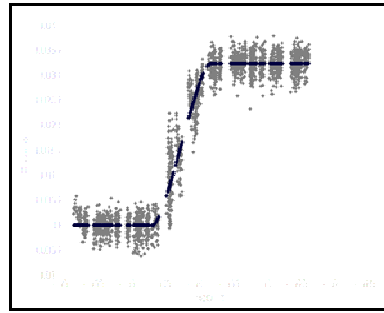
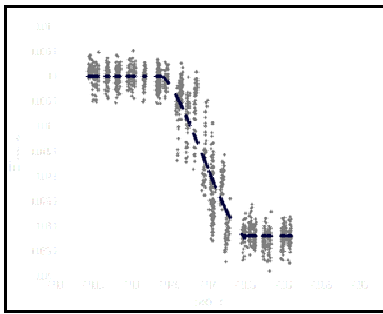
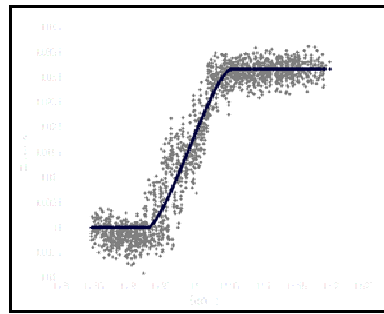
a) PLACAS A 47 m.
DIÂMETRO DA PROJEÇÃO: 6,8 mmb) PLACAS A 67 m.
DIÂMETRO DA PROJEÇÃO: 8,4 mm

FIGURA 5.3: PERFIL DAS PLACAS VARRIDAS A 87 e 107 m

a) PLACAS A 87 m.
DIÂMETRO DA PROJEÇÃO: 10,8 mmb) PLACAS A 107 m.
DIÂMETRO DA PROJEÇÃO: 12,2 mm

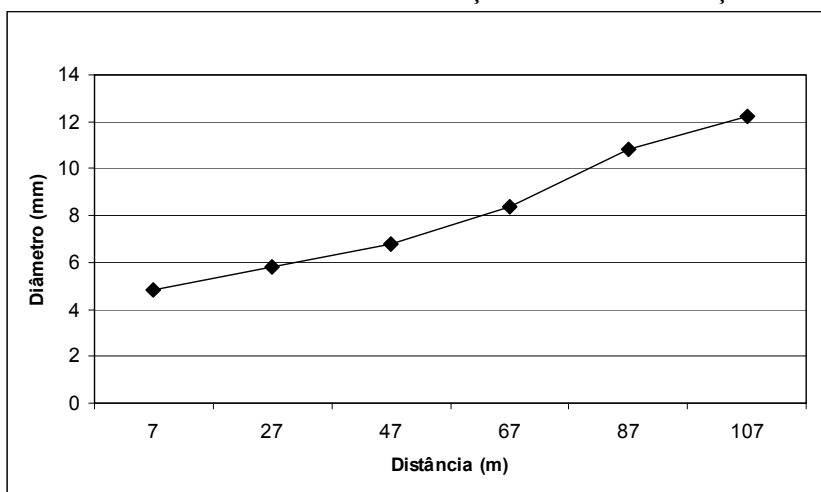
A tabela 5.1 apresenta os dados de saída do modelo proposto para estimativa do diâmetro do feixe (item 4.1.1). Na primeira coluna estão os valores de distância entre as placas e o equipamento laser scanner. Para cada distância, foi calculada a diferença entre os pontos originais e os pontos ajustados. Calculou-se, a seguir, a média e o desvio padrão esta diferença para cada recorte. Estes valores podem ser observados na tabela 5.1, que também mostra os coeficientes de correlação entre os valores originais e os valores ajustados. Por fim, na última coluna, estão os valores da resolução estimada pelo método analítico para avaliação da resolução em função do efeito de bordas.

TABELA 5.1: DADOS DE SAÍDA E RESOLUÇÃO ESTIMADA

Distância (m)	Média dos Resíduos (mm)	Desvio Padrão Resíduos (mm)	Coefficientes de Correlação	Resolução Estimada (mm)
07	0,05	2,99	0,98	4,8
27	0,04	2,24	0,96	5,8
47	0,70	2,39	0,99	6,8
67	0,01	2,68	0,98	8,4
87	0,05	3,48	0,97	10,8
107	0,41	3,26	0,97	12,2

Quando os valores do desvio padrão são analisados, observa-se que a dispersão aumenta em função da distância. Por isso, a estimativa do diâmetro da projeção, ou seja, a resolução torna-se menos confiável conforme aumenta a distância entre o objeto e o equipamento laser scanner. Pode-se perceber também que o aumento do diâmetro da projeção laser com o aumento da distância é praticamente linear. Essa variação pode ser melhor verificada com a figura 5.4, que é um gráfico da distribuição do diâmetro em função da distância de varredura:

FIGURA 5.4: DIÂMETRO DA PROJEÇÃO LASER - FUNÇÃO DA DISTÂNCIA



Para saber se esses valores de resolução são coerentes, pode-se comparar com o valor de resolução fornecida pelo fabricante (Quadro 3.1 do capítulo 3), que é de 6 mm em até 50 metros de distância.

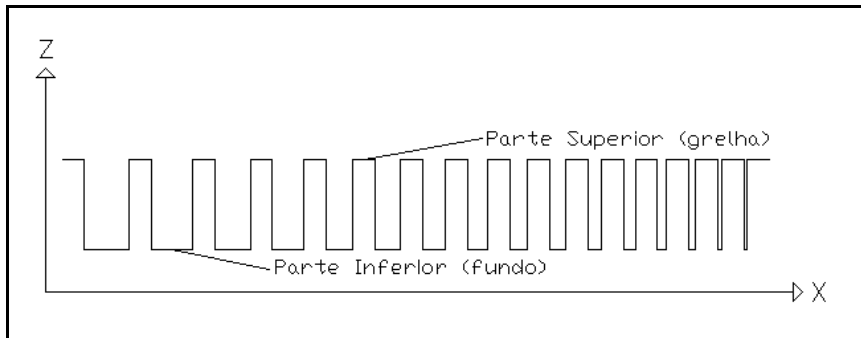
O valor estimado através do método analítico para 50m, que é de 7mm, mostrou-se muito próximo do valor de resolução fornecida pelo fabricante (Quadro 3.1 do capítulo 3), ou seja 6 mm. Assim, verifica-se que o método desenvolvido pode ser

utilizado para estimar a resolução de sistemas laser scanner terrestres com confiabilidade.

5.2 AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO – MÉTODO DIRETO

O objetivo desse experimento é de avaliar a resolução do laser emitido pelo scanner e detectar até que ponto este consegue penetrar nas fendas, obtendo respostas de reflectância do fundo da “caixa de resolução”. Para isso, analisam-se os perfis das caixas varridas pelo laser a diferentes distâncias. Um exemplo de perfil ideal da caixa de resolução pode ser observado na figura 5.5.

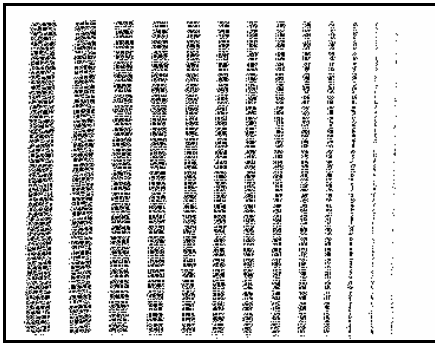
FIGURA 5.5: EXEMPLO DE PERFIL IDEAL DA CAIXA PARA RESOLUÇÃO



A figura 5.5 representa um corte transversal da caixa de resolução. Na parte superior da figura, o que se observa são os filetes da parte da frente da caixa, todos com largura de 10 mm. Enquanto que a parte inferior da figura é a resposta do fundo da caixa, que se inicia em 18 mm, terminando em 1 mm.

A figura 5.6 mostra um corte com somente os pontos que atingiram o fundo da caixa. Esta figura não mostra as falsas alturas, que são o resultado da média do retorno do pulso laser, quando ele atinge a parte da frente da caixa e a parte do fundo. Os valores destas falsas alturas não correspondem nem ao fundo da caixa nem às barras frontais.

FIGURA 5.6: INCIDÊNCIA DO FEIXE NO FUNDO DA CAIXA

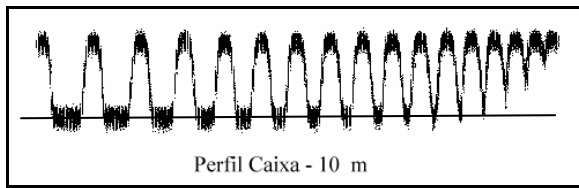


Analisando a quantidade de pontos que conseguem penetrar pelas fendas e atingir o fundo da caixa de resolução, é possível estimar por observação direta o diâmetro da projeção do feixe laser. O diâmetro ou resolução estimada é considerado como sendo igual ao menor espaçamento no qual a penetração do feixe entre as grades é visível e que possui um número considerável de pontos (mais de 80% dos pontos que incidiram no respectivo espaçamento). Na figura 5.6, por exemplo, o diâmetro estimado é igual ao valor do espaçamento do penúltimo filete de pontos à direita, pois o último filete possui falhas visíveis e menos de 80% de pontos do espaçamento.

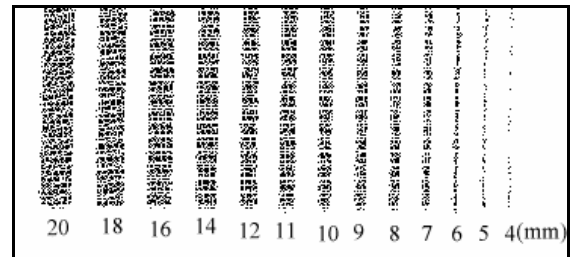
Para melhorar a estimativa do diâmetro da projeção do laser, é necessário observar também o perfil da varredura da caixa de resolução. Para isso, observam-se os pontos da parte inferior do perfil, que representam o fundo da caixa. Quando esses pontos não estiverem mais na mesma linha, ou seja, quando começarem a se afastar do alinhamento do fundo da caixa, significa que já não estão descrevendo fielmente o fundo da caixa.

Nas figuras a seguir, estão os resultados das varreduras feitas a diferentes distâncias. Elas apresentam o perfil da caixa e também o corte feito da imagem do fundo da caixa. Como se pode observar na figura 5.7, através da imagem do fundo da caixa, a resolução do laser scanner a 10 metros de distância é de 5 mm, pois no filete de 4 mm já ocorrem falhas na quantidade de pontos refletidos.

FIGURA 5.7: RESOLUÇÃO A 10 m DE DISTÂNCIA



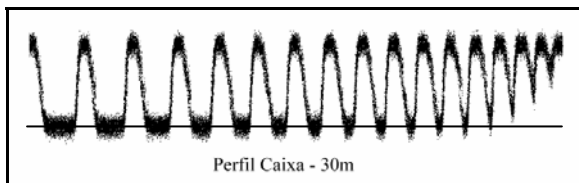
(a) PERFIL DA CAIXA



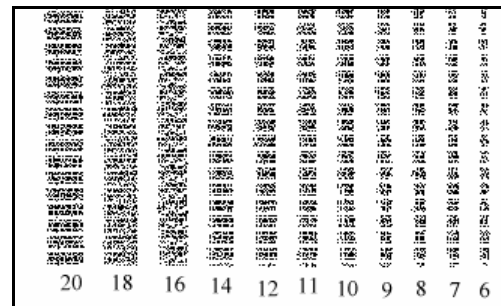
(b) FUNDO DA CAIXA

Na figura 5.8, percebe-se que a resolução do laser scanner a 30 metros de distância é de 6 mm.

FIGURA 5.8: RESOLUÇÃO A 30 m DE DISTÂNCIA



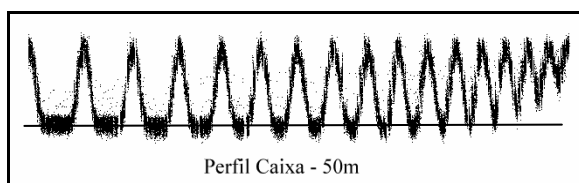
(a) PERFIL DA CAIXA



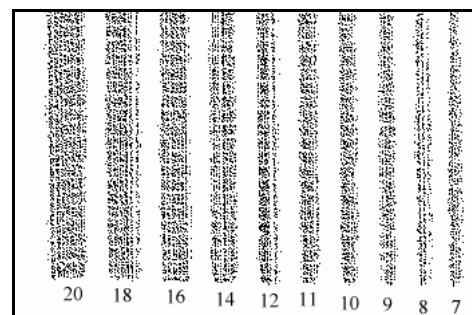
(b) FUNDO DA CAIXA

O resultado da varredura laser feita a 50 metros é vista na figura 5.9, onde se pode concluir que a resolução do laser scanner é de 7 mm.

FIGURA 5.9: RESOLUÇÃO A 50 m DE DISTÂNCIA



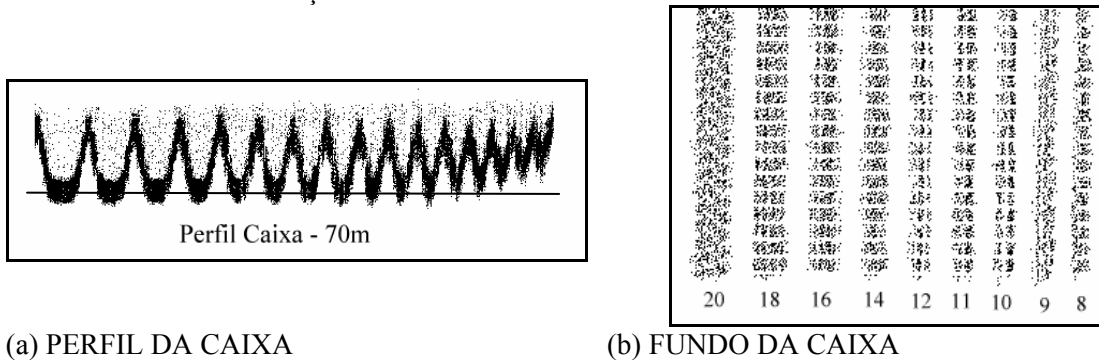
(a) PERFIL DA CAIXA



(b) FUNDO DA CAIXA

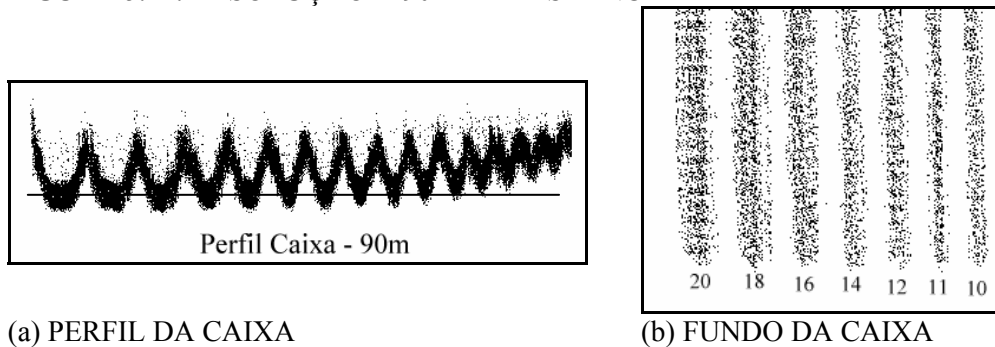
Na figura 5.10, a resolução do laser a 70 metros é de 8 mm. Nessa distância já é possível observar muitos ruídos, a definição fica mais prejudicada e isso pode ser percebido na imagem do perfil da caixa, onde aparecem muitos pontos dispersos.

FIGURA 5.10: RESOLUÇÃO A 70 m DE DISTÂNCIA



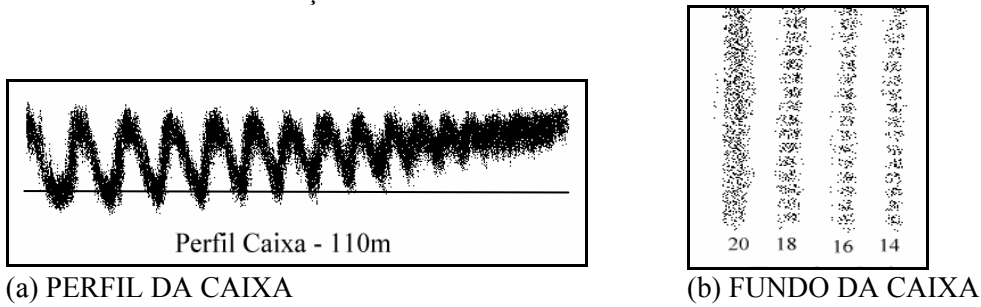
Conforme mostra a figura 5.11, a resolução a 90 metros de distância é de 10 mm. Outra observação é sobre o perfil da caixa, que começa a perder sua forma original devido a ruídos ocorridos pelo aumento da distância de varredura.

FIGURA 5.11: RESOLUÇÃO A 90 m DE DISTÂNCIA



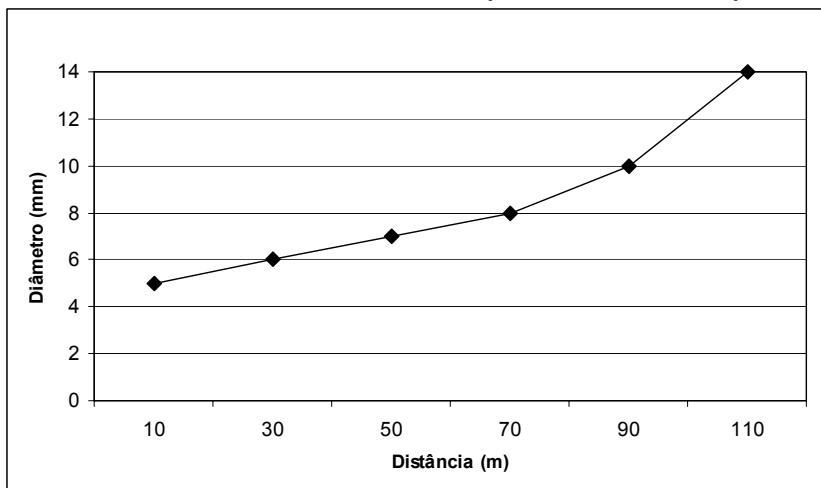
A 110 metros de distância, conforme visto na figura 5.12, a resolução é de 14 mm. Na abertura de 12 mm, muitos pontos ultrapassam a abertura, mas a resolução não foi classificada como 12 mm porque a quantidade de pontos não atingiu 80%. Observa-se na imagem do perfil que nas aberturas menores, o que aparece na figura é um borrão, e não mais a definição do perfil da caixa. Para distâncias acima de 100 metros, a qualidade do levantamento diminuiu muito. Percebe-se muito ruído e pouca definição.

FIGURA 5.12: RESOLUÇÃO A 110 m DE DISTÂNCIA



A partir dos resultados obtidos, elaborou-se um gráfico do diâmetro da projeção do laser em função da distância (Figura 5.13). Nota-se que esta distribuição se aproxima de uma distribuição linear, com exceção do último valor, cuja inclinação é maior. Isto se explica pelo fato do equipamento ter alcance máximo de 100 metros de distância, acima desse valor (110 m), a linearidade e a qualidade dos dados diminui. Assim, o ponto a 110 metros não será considerado na análise, pois não é considerado confiável.

FIGURA 5.13: DIÂMETRO DA PROJEÇÃO LASER - FUNÇÃO DA DISTÂNCIA



Como pode ser observado na figura 5.13, a resolução ou tamanho da projeção do laser a 50 metros de distância, é de 7 mm. Esse valor coincide com o valor obtido no método analítico e se aproxima das especificações do fabricante, podendo ser confirmado no quadro 3.1 do capítulo 3. Isso mostra que o equipamento testado Cyrax HDS 3000, encontra-se em conformidade com as especificações do fabricante e que o

método desenvolvido pode ser utilizado para estimar rápido e diretamente a resolução de sistemas laser scanner terrestres.

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DIRETO E O MÉTODO ANALÍTICO PARA AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO

Como se pode observar nos itens 5.1 e 5.2, onde foram analisados e discutidos os resultados dos métodos analítico e direto para avaliação da resolução de sistemas laser scanner, as estimativas do diâmetro de projeção do feixe laser não foram exatamente iguais. Para avaliar estes resultados, eles foram inicialmente analisados separadamente (método analítico e método direto) e depois foi feita uma comparação.

O primeiro passo foi estimar um modelo de regressão linear que associa o diâmetro do pulso com a distância, como descrito na equação 5.1:

$$\varphi = a \cdot dist + b \quad (5.1)$$

Onde:

φ é o diâmetro modelado com a regressão linear;

$dist$ é a distância de operação do equipamento;

a e b são os coeficientes da regressão, obtidos em função do diâmetro estimado e da distância.

Usando os dados do método analítico, os coeficientes da função linear obtidos foram:

$$a = 0,077 \quad e \quad b = 3,769$$

O valor da tangente da reta (0.077) indica o ângulo da divergência do feixe. Com este modelo linear é possível estimar o diâmetro do feixe para qualquer distância entre 10 e 107 metros. Assim, foram obtidos os diâmetros modelados da projeção laser para

método analítico. Os valores podem ser comparados com os diâmetros calculados experimentalmente, conforme apresenta a tabela 5.2 (método analítico).

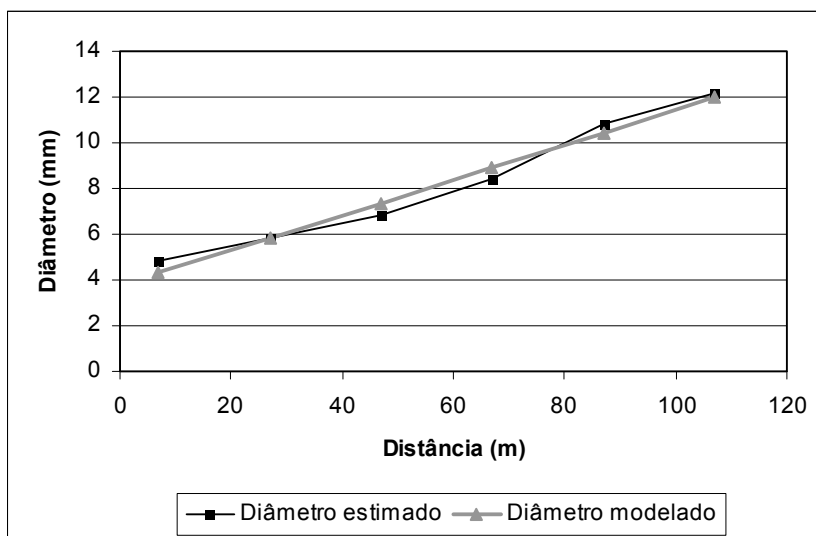
TABELA 5.2: RESOLUÇÃO ESTIMADA E MODELADA – MÉTODO ANALÍTICO

Distância (m)	φ estimado (mm) (experimento)	φ modelado (mm) (modelo linear)	Diferença (mm)
7	4,8	4,3	0,5
27	5,8	5,8	0,0
47	6,8	7,4	-0,6
67	8,4	8,9	-0,5
87	10,8	10,4	0,4
107	12,2	12,0	0,2

Comparando-se os diâmetros obtidos da regressão linear com os diâmetros estimados pelo método analítico na tabela 5.2, percebe-se que as diferenças são pequenas. Isso mostra a alta correlação do resultado deste método, quanto maior a distância, maior o diâmetro da projeção do feixe laser e consequentemente, menor a resolução do laser scanner.

A alta correlação do resultado do método analítico pode ser observada também no gráfico do diâmetro estimado da projeção em função da distância, mostrado na figura 5.14. No gráfico também são plotados os diâmetros modelados, obtidos com o modelo de regressão linear.

FIGURA 5.14: MÉTODO ANALÍTICO - DIÂMETRO ESTIMADO x MODELADO



Para o método direto, os coeficientes da função linear obtidos foram:

$$a = 0,083 \quad e \quad b = 3,362$$

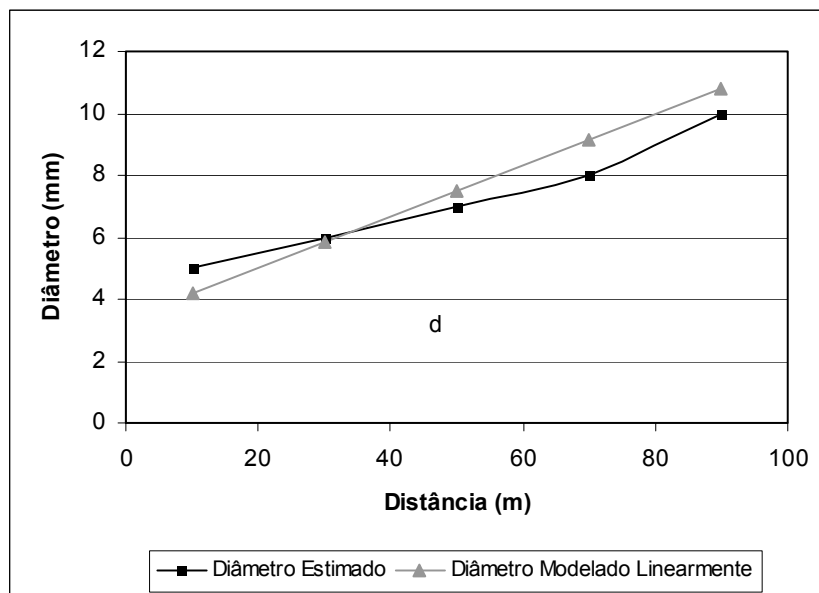
O valor da tangente da reta (0.083) indica o ângulo da divergência do feixe. A tabela 5.3 apresenta os diâmetros estimados com o método direto para avaliação da resolução e compara esses valores com os diâmetros modelados com a respectiva regressão linear.

TABELA 5.3: RESOLUÇÃO ESTIMADA E MODELADA – MÉTODO DIRETO

Distância (m)	ϕ estimado (mm) (experimento)	ϕ modelado (mm) (modelo linear)	Diferença (mm)
10	5,0	4,2	0,8
30	6,0	5,8	0,2
50	7,0	7,5	-0,5
70	8,0	9,2	-1,2
90	10,0	10,8	-0,8

Nessa análise, as diferenças percebidas na tabela 5.3, e no gráfico da figura 5.15, entre o diâmetro estimado com o método direto e o diâmetro modelado linearmente são um pouco maiores se comparados com as diferenças do método analítico, com um valor maior que 1 mm.

FIGURA 5.15: MÉTODO DIRETO - DIÂMETRO ESTIMADO x MODELADO



A ocorrência de maiores diferenças pode ser atribuída ao fato do método direto estimar a resolução de forma mais grosseira que o método analítico, pois a escala de

valores para resolução no método direto varia de milímetro em milímetro, enquanto que no método analítico a resolução estimada varia na escala de décimos de milímetros.

Finalmente, foi feita uma comparação entre os dois métodos. Para avaliar a qualidade dos resultados obtidos com o método direto, usou-se o modelo obtido para o método analítico como referência.

As diferenças entre os valores obtidos com cada método podem ser percebidas na tabela 5.4, que apresenta os diâmetros estimados da projeção do feixe laser em diferentes distâncias, para cada método. Nota-se que até a distância de 50 metros, a diferença na estimativa da resolução é constante (0,2 mm). Para a distância de 90 metros, a diferença não ultrapassa 1 mm.

TABELA 5.4: COMPARAÇÃO ENTRE RESOLUÇÃO ESTIMADA: ANALÍTICO x DIRETO

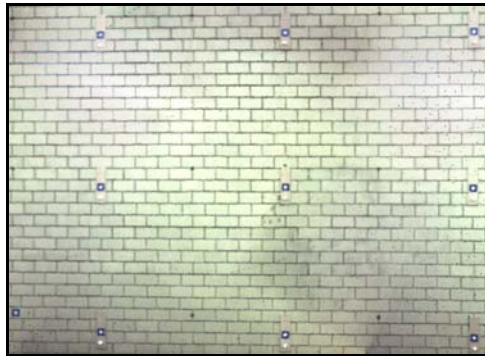
Distância (m)	φ analítico (mm) (referência)	φ direto (mm)	Diferença (mm)
10	4,8	5,0	0,2
30	5,8	6,0	0,2
50	6,8	7,0	0,2
70	8,4	8,0	0,4
90	10,8	10,0	0,8

5.4 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA

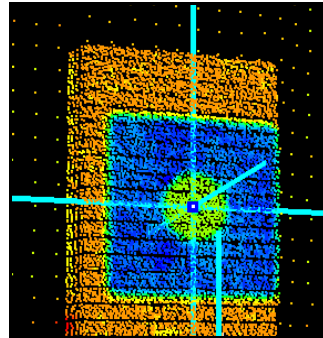
O método para avaliação da acurácia planimétrica trata da comparação de medidas de distâncias horizontais e verticais entre alvos dispostos em uma parede, com a finalidade de verificar se existem diferenças na acurácia do equipamento para medidas em diferentes direções observadas (horizontal e vertical).

A figura 5.16a apresenta a parede varrida pelo laser scanner a uma distância de 12 metros. O que se percebe é a imagem no padrão de cores RGB, obtida através da câmera digital acoplada ao instrumento. Na figura 5.16b, é apresentado um recorte de um dos 9 alvos dispostos na parede, o que se percebe são os valores da resposta de intensidade dos alvos.

FIGURA 5.16: PAREDE VARRIDA PELO LASER SCANNER



(a) IMAGEM RGB



(b) IMAGEM INTENSIDADE

A densidade de varredura laser foi alterada em diferentes pontos da parede. Primeiro foi feita uma varredura com densidade de 10 mm para a parede toda, e posteriormente, foram selecionados quadros menores para cada uma das 9 placas, com densidade de varredura bem mais apurada, obtendo desse modo um ponto a cada 1 mm. As diferentes densidades de varredura podem ser observadas na figura 5.16b, onde percebe-se um eixo posicionado no centro do alvo. Através desse eixo foi possível a realização das leituras das distâncias horizontal e vertical entre os centros dos alvos, que foram realizadas na imagem intensidade.

A partir das leituras de distâncias, foram elaboradas duas tabelas: A tabela 5.5, que trata das medidas de distâncias horizontais e a tabela 5.6, que apresenta as medidas de distâncias verticais. Os dados correspondem às distâncias horizontais ou verticais entre os alvos, obtidas através da estação total e do laser scanner. A diferença entre as duas medidas também foi projetada para uma distância de 50m, com a finalidade de comparar o resultado com a especificação fornecida pelo fabricante, que é de 6 mm em até 50 metros (quadro 3.1), para acurácia planimétrica (x, y).

Também foram calculados os valores da distância entre as medidas laser e as respectivas medidas obtidas com a estação total e os valores da média e do desvio padrão dessas diferenças de distâncias foram obtidos.

Utilizando a média aritmética como representativa da grandeza medida através de observações não correlacionadas de mesma confiança, para este caso, restou estimar o seu grau de precisão. Para tal, utilizou-se o desvio padrão (medida de dispersão). Nas

tabelas também são apresentadas as máximas diferenças absolutas para cada comparação.

TABELA 5.5: MEDIDAS DE DISTÂNCIAS HORIZONTAIS USANDO ALVOS PLANOS

Alvos	Dist.entre alvos Estação (m)	Dist. entre alvos Laser (m)	Diferença (mm) Na dist. 12 m	Diferença (mm) Projetada p/ 50 m
D12	2,0062	2,0046	1,6	6,5
D23	2,0040	2,0024	1,6	6,8
D13	4,0102	4,0070	3,2	13,4
D45	1,9951	1,9954	-0,3	-1,4
D56	1,9862	1,9864	-0,2	-0,8
D46	3,9813	3,9818	-0,5	-2,2
D78	2,0248	2,0211	3,6	15,2
D89	2,0053	2,0019	3,4	14,3
D79	4,0301	4,0290	1,1	4,5
Média das Diferenças			1,5	6,3
Desvio Padrão das Diferenças			1,7	6,9
Máxima diferença absoluta			3,6	15,2

TABELA 5.6: MEDIDAS DE DISTÂNCIAS VERTICAIS USANDO ALVOS PLANOS

Alvos	Dist.entre alvos Estação (m)	Dist. entre alvos Laser (m)	Diferença (mm) Na dist. 12 m	Diferença (mm) Projetada p/ 50 m
D14	1,5793	1,5800	-0,7	-3,0
D47	1,6574	1,6577	-0,3	-1,1
D17	3,2367	3,2377	-1,0	-4,1
D25	1,5828	1,5843	-1,5	-6,3
D58	1,6576	1,6586	-1,0	-4,1
D28	3,2404	3,2428	-2,4	-10,0
D36	1,5843	1,5859	-1,6	-6,8
D69	1,6577	1,6556	2,1	8,9
D39	3,2420	3,2415	0,5	2,0
Média das Diferenças			0,7	2,7
Desvio Padrão das Diferenças			1,3	5,5
Máxima diferença absoluta			2,4	10,0

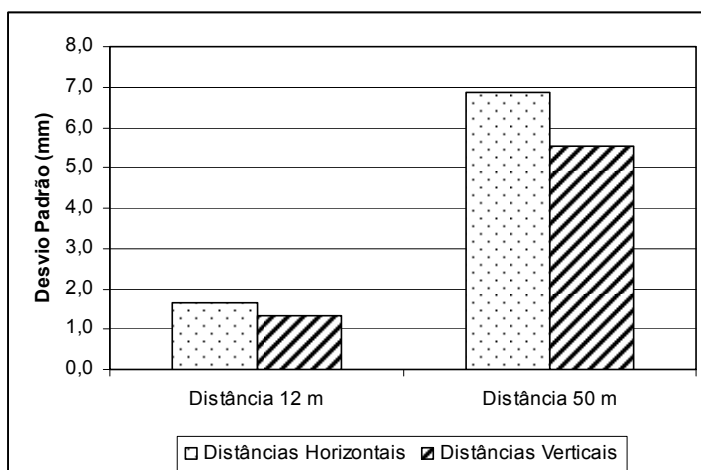
Para as diferenças projetadas para 50 metros entre a medida feita com a estação e a medida feita com o laser scanner, pode-se dizer que a precisão das medidas horizontais (tabela 5.5) é de 6,9 mm e a mesma difere dos valores de referência (estação) em média 6,3 mm. Quanto às medidas de distâncias verticais (tabela 5.6), pode-se perceber que a precisão é de 5,5 mm e a mesma difere dos valores de referência (estação) em média 2,7 mm. Assim, o desvio padrão indica a variabilidade dos resíduos das distâncias, que neste caso tem grande variação.

Como a especificação do fabricante é de 6 mm em até 50 metros, pode-se verificar que as medidas de distâncias verticais estão de acordo com essa grandeza, em média 2,7 mm. Já para as medidas de distâncias horizontais, a média ultrapassou o valor de 6 mm.

Analisando a tabela 5.5, nota-se que algumas distâncias ficaram muito acima do valor especificado. Outra constatação importante é que os valores que extrapolaram seguem um padrão, localizando-se nas extremidades (superior e inferior) da parede. Os maiores valores de diferença são todos positivos. As menores diferenças localizam-se exatamente na linha central da parede (alvos D45, D56 e D46). Esta variação pode ser causada por falhas no sistema de varredura. Porém, esta afirmação não pode ser feita categoricamente, porque podem ter ocorrido também erros nas leituras usando a estação total. Durante o experimento, as leituras das coordenadas com a estação total foram realizadas apenas uma vez. Após a verificação das diferenças, não foi possível voltar e refazer a leitura com a estação, porque os alvos são móveis. Isso aponta a necessidade de se fazer pelo menos duas leituras em cada ponto neste tipo de experimento.

Na figura 5.17, apresenta-se a comparação entre os desvios padrão das medidas de distâncias horizontais e verticais, para a tomada a 12 metros de distância e também para a projeção a 50 metros. Pode-se perceber que o desvio padrão das distâncias horizontais é maior que das distâncias verticais. Isso confirma uma maior precisão do equipamento para medidas de distância verticais.

FIGURA 5.17: DISTÂNCIAS HORIZONTAIS x VERTICAIS - ALVOS PLANOS



5.5 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA LINEAR

Esse método trata da comparação de medidas de distâncias lineares, com a finalidade de verificar se existem diferenças na acurácia do equipamento laser, tendo como referência as medidas de distância da estação total, que possui melhor acurácia. A densidade da varredura laser foi de um ponto a cada milímetro, varrendo os alvos planos refletivos em diferentes distâncias.

Com a varredura laser e a obtenção das leituras do centro de cada alvo com a estação total, elaborou-se uma tabela para melhor organizar os dados. A tabela 5.7 apresenta a comparação de medidas de distância entre laser scanner e estação total. Além disso, apresenta também o erro ou diferença entre uma medida e outra.

TABELA 5.7: MEDIDAS DE DISTÂNCIAS UTILIZANDO ALVOS PLANOS

Distâncias (metros)		Erro
Estação total	Laser Scanner	Diferença (mm)
10,064	10,070	6,0
29,521	29,527	6,0
49,022	49,029	7,0
68,515	68,507	8,0
87,983	87,992	9,0
107,532	107,520	12,0

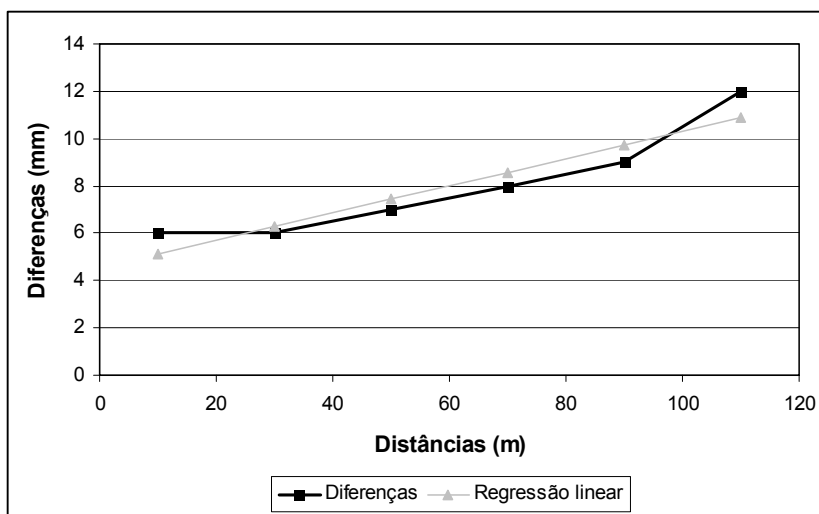
Pode-se observar através da tabela 5.7 que a acurácia do equipamento laser scanner utilizado (Cyrax HDS 3000) até 30 metros é de 6 mm. Após essa distância, a cada 20 metros esse valor aumenta 1 mm, chegando a 9 mm para distâncias em torno de 90 metros. E para em torno de 107 metros a acurácia nas medidas de distâncias é de 12 mm.

A especificação para acurácia em medidas de distância fornecida pelo fabricante é de 4 mm em até 50 metros. No experimento, para essa mesma distância, foi obtido o valor de 7 mm, ficando assim, acima do valor especificado. Como durante o experimento as leituras das coordenadas com a estação total foram realizadas apenas uma vez, existe a necessidade de se refazer o experimento, com um número maior de

leituras para confirmar se a origem desta diferença pode ser associada ao sistema de varredura a laser.

Na figura 5.18, pode-se perceber um aumento da diferença nas medidas de distâncias, observando que quanto maior a distância de operação do equipamento laser scanner, menor sua acurácia em medidas lineares de distância. Nota-se também que este aumento é quase linear, se aproximando da linha mais clara no gráfico, feita através da regressão linear dos valores obtidos.

FIGURA 5.18: MEDIDAS DE DISTÂNCIAS COM ALVOS PLANOS



5.6 AVALIAÇÃO DO USO DE ALVOS TRIDIMENSIONAIS ESFÉRICOS

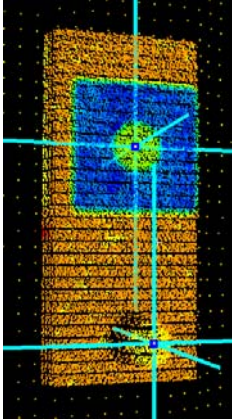
Para a avaliação da utilização de diferentes tipos de alvos e validação de uso dos mesmos, foi utilizado o método para avaliação da acurácia planimétrica e o método para avaliação da acurácia linear. O desempenho dos alvos tridimensionais esféricos foi analisado e comparado com o desempenho dos alvos planos refletores. Na seqüência, os resultados dos dois métodos são discutidos:

5.6.1 Acurácia Planimétrica

Na imagem de intensidade da figura 5.19, se observa uma placa em detalhe com os dois tipos de alvos: na parte superior está o alvo plano e logo abaixo, percebe-se a

esfera. Através dos eixos posicionados no centro de cada alvo, fez-se a leitura das distâncias horizontal e vertical entre os centros dos alvos.

FIGURA 5.19: DETALHE PLACA COM ALVOS



A partir das leituras de distâncias, foram elaboradas duas tabelas: a tabela 5.8, que compara o desempenho de alvos planos e esféricos para distâncias horizontais e tabela 5.9, que faz a mesma comparação para medidas de distâncias verticais. Essas tabelas apresentam a diferença de medidas de distância entre a estação total e o laser scanner para a distância projetada de 50 metros. Com essa projeção é possível comparar as diferenças obtidas com a especificação do laser scanner (quadro 3.1) na acurácia planimétrica (x, y), que é de 6 mm.

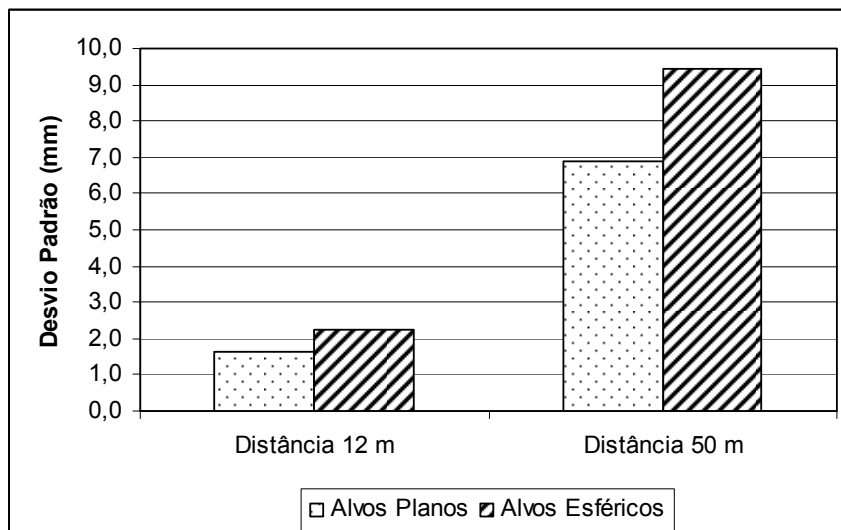
TABELA 5.8: ALVOS PLANOS E ESFÉRICOS – DISTÂNCIAS HORIZONTAIS

Alvos	Diferença (mm)		Comparação: plano x esférico
	Alvos Planos	Alvos Esféricos	
	estação x laser para 50 m	estação x laser para 50 m	
D12	6,5	12,8	6,3
D23	6,8	13,5	6,7
D13	13,4	26,2	12,8
D45	-1,4	0,1	1,6
D56	-0,8	3,2	4,0
D46	-2,2	3,3	5,5
D78	15,2	18,5	3,3
D89	14,3	20,4	6,1
D79	4,5	1,3	3,2
Média	6,3	11,0	5,5
Desvio Padrão	6,9	9,4	3,2
Máximo	15,2	26,2	12,8

Na tabela 5.8, analisando-se a média e o desvio padrão das comparações entre alvos planos e esféricos para distâncias horizontais, tem-se para os alvos planos uma média de 6,3 mm, com precisão de 6,9 mm.; enquanto que para os alvos esféricos a média é de 11 mm, com precisão de 9,4 mm. Pode-se dizer então, que os alvos planos são mais precisos nas medidas de distâncias horizontais que os alvos esféricos.

Através da figura 5.20, observam-se melhor as diferenças do desvio padrão nas distâncias horizontais para os alvos planos e esféricos, para distâncias obtidas a 12 metros e também para a projeção a 50 metros. Pode-se perceber que os desvios padrão dos alvos planos são menores que dos alvos esféricos. Isso confirma uma maior precisão das medidas de distância utilizando-se os alvos planos.

FIGURA 5.20: ALVOS PLANOS x ESFÉRICOS - DISTÂNCIAS HORIZONTAIS



Para a comparação do uso de alvos planos e esféricos, nas medidas de distâncias verticais, tem-se a tabela 5.9, que apresenta a média e o desvio padrão das medidas de distância obtidas com os alvos planos e com os alvos esféricos.

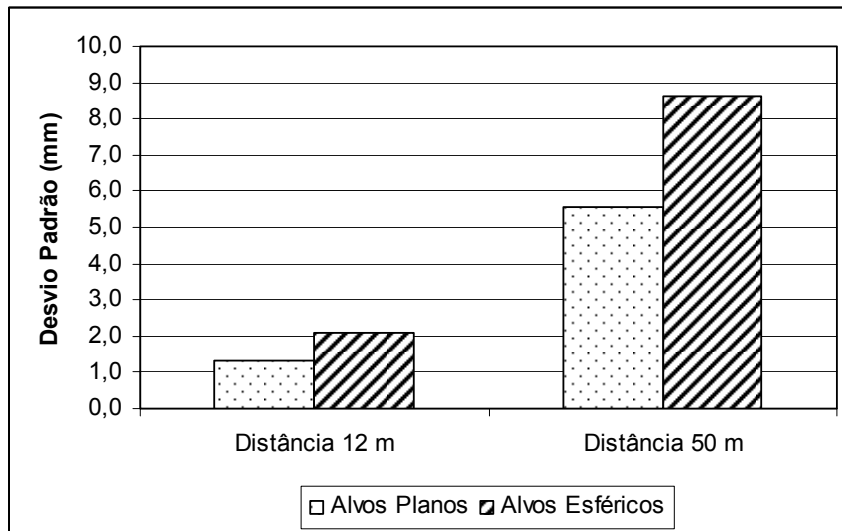
TABELA 5.9: ALVOS PLANOS E ESFÉRICOS - DISTÂNCIAS VERTICAIS

Alvos	Diferença (mm)		Comparação: plano x esférico
	Alvos Planos estação x laser para 50 m	Alvos Esféricos estação x laser para 50 m	
D14	-3,0	0,8	3,8
D47	-1,1	16,4	17,5
D17	-4,1	17,6	21,7
D25	-6,3	14,8	21,0
D58	-4,1	17,5	21,7
D28	-10,0	31,9	41,9
D36	-6,8	13,9	20,7
D69	8,9	11,1	2,2
D39	2,0	25,0	22,9
Média	2,7	16,6	19,3
Desvio Padrão	5,5	8,6	11,6
Máximo	10,0	31,9	41,9

Conforme apresenta a tabela 5.9, às diferenças de distâncias verticais para os alvos planos têm média de 2,7 mm, com precisão de 5,5 mm.; enquanto que para os alvos esféricos a média é de 16,6 mm, com precisão de 8,6 mm. Pode-se perceber, que os alvos planos são mais precisos que os esféricos também nas medidas de distâncias verticais.

Através da figura 5.21, observam-se melhor as diferenças do desvio padrão nas distâncias verticais para os alvos planos e esféricos, para distâncias obtidas a 12 metros e também para a projeção a 50 metros. Pode-se perceber que os desvios padrão dos alvos planos são menores que dos alvos esféricos. Isso confirma uma maior precisão das medidas de distância utilizando-se os alvos planos.

FIGURA 5.21: ALVOS PLANOS x ESFÉRICOS - DISTÂNCIAS VERTICAIS



As diferenças nas medidas de distâncias horizontais e verticais podem, em boa parte, ser causadas por problemas de identificação do centro do alvo esférico no momento da leitura, principalmente quando se tenta identificar o centro do alvo na nuvem de pontos. Por isso surge a necessidade de um sistema de reconhecimento da esfera e estimativa exata de seu centro com modelos matemáticos, pois dependendo da posição em que se olha à esfera, não é possível a identificação exata do centro. Isso ocorre principalmente em posições mais afastadas dos alvos, no caso desse experimento, as extremidades da parede.

5.6.2 Acurácia Linear

A tabela 5.10 apresenta a comparação da acurácia em medidas de distância obtidas com alvos planos e alvos esféricos. Esses valores foram obtidos comparando-se as distâncias medidas com o equipamento laser scanner, tendo como referência as mesmas distâncias obtidas com uma estação total.

TABELA 5.10: MEDIDAS DE DISTÂNCIAS - ALVOS PLANOS E ESFÉRICOS

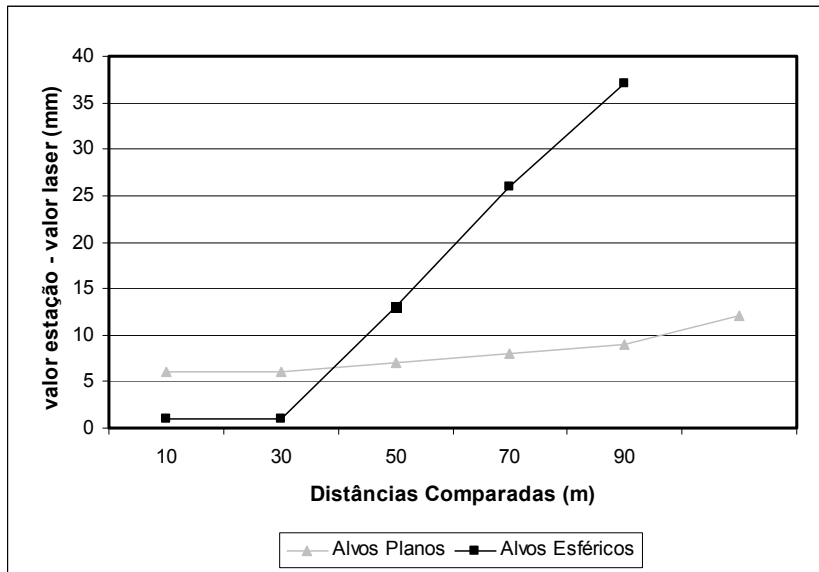
Distâncias (metros)	Diferenças: estação e laser (mm)	
	Alvos planos	Alvos esféricos
10	6,0	1,0
30	6,0	1,0
50	7,0	13,0
70	8,0	26,0
90	9,0	37,0
110	12,0	-----

Como observado na tabela 5.10, no experimento utilizando alvos planos, é possível perceber a comparação de uma distância a mais, a de 110 metros. A mesma comparação não foi feita com o alvo esférico devido à restrição no alcance da estação total usando o modo de leitura sem prisma, com o modo de leitura laser não foi possível obter valores de resposta de distâncias no alvo esférico a mais de 100 metros.

Pode-se perceber um aumento gradual do erro de acurácia conforme aumenta a distância observada. Esse aumento é muito mais brusco e acentuado quando são utilizados alvos esféricos.

Comparando os valores das diferenças, é possível notar que nas duas primeiras distâncias lidas, os alvos esféricos possuem melhor acurácia, apresentando apenas 1 mm de erro, enquanto que os alvos planos apresentaram 6 mm. Mas nas seguintes leituras, os valores obtidos com os alvos esféricos resultam em valores extremamente grandes. Na figura 5.22, pode-se perceber a comparação entre as diferenças nas medidas de distâncias.

FIGURA 5.22: ACURÁCIA ENTRE ALVOS PLANOS E ESFÉRICOS

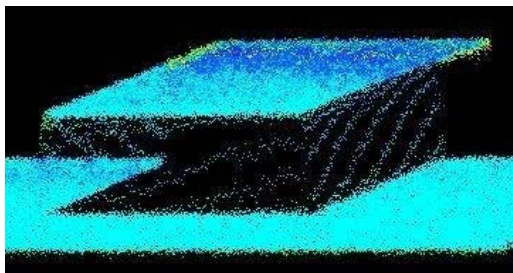


5.7 AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO DA NUVEM DE PONTOS

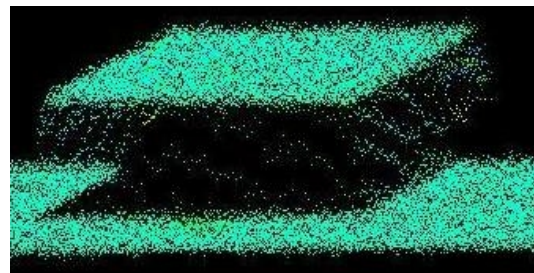
Aqui são apresentados os resultados da avaliação da dispersão das nuvens de pontos de varreduras laser scanner, obtidas em diferentes distâncias. A densidade da varredura laser foi de um ponto a cada milímetro, varrendo todas as placas em diferentes distâncias: 7, 27, 47, 67, 87 e 107 metros.

Na figura 5.23, é possível se observar a dispersão dos pontos em uma placa, que foi varrida em testes preliminares. Na figura 5.23a, a distância para varredura laser scanner foi de 5 metros e na figura 5.23b a distância foi de 60 metros. Nesses dois recortes percebe-se que a dispersão dos pontos sofre grande influência da distância.

FIGURA 5.23: DISPERSÃO DOS PONTOS - IMAGEM INTENSIDADE



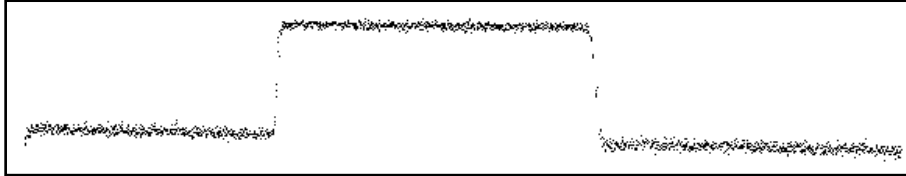
(a) DISTÂNCIA DE VARREDURA = 5 m



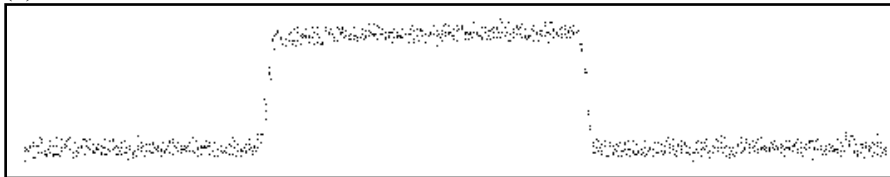
(b) DISTÂNCIA DE VARREDURA = 60 m

A figura 5.24 apresenta uma análise mais prática para o perfil das placas. Neste caso, a dispersão dos pontos é percebida nitidamente.

FIGURA 5.24: DISPERSÃO DOS PONTOS - PERFIL DAS PLACAS



(a) DISTÂNCIA DE VARREDURA = 5 m

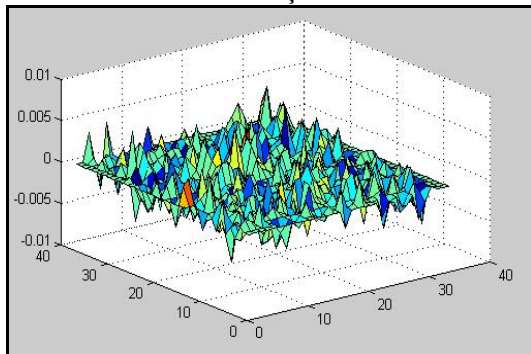


(b) DISTÂNCIA DE VARREDURA = 60 m

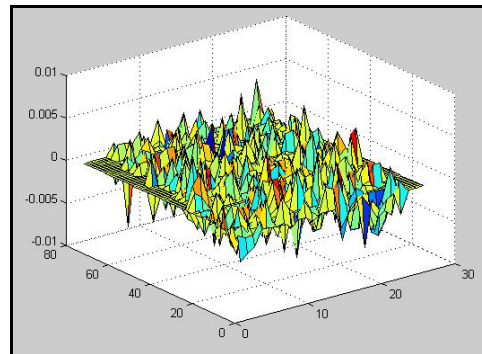
Para a avaliação da dispersão, foi determinado um plano médio que representa a superfície. Foram calculadas a média, variância e desvio padrão das distâncias de cada ponto (coordenadas tridimensionais) a esse plano médio. A variação de altura de cada ponto foi visualizada, podendo ser percebida a dispersão dos mesmos.

Na figura 5.25a observam-se as distâncias ao plano dentro de um recorte varrido a 7 metros de distância. Já na figura 5.25b o recorte é de pontos varridos a uma distância de 107 metros. Através do eixo vertical a figura 5.25, que é o eixo dos valores de distância de cada ponto ao plano, nota-se na superfície gerada a 107 metros, que os pontos possuem um pico de altura maior que a gerada a 7 metros, mostrando assim a maior dispersão da superfície a 107 metros de distância.

FIGURA 5.25: VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA DOS PONTOS AO PLANO MÉDIO



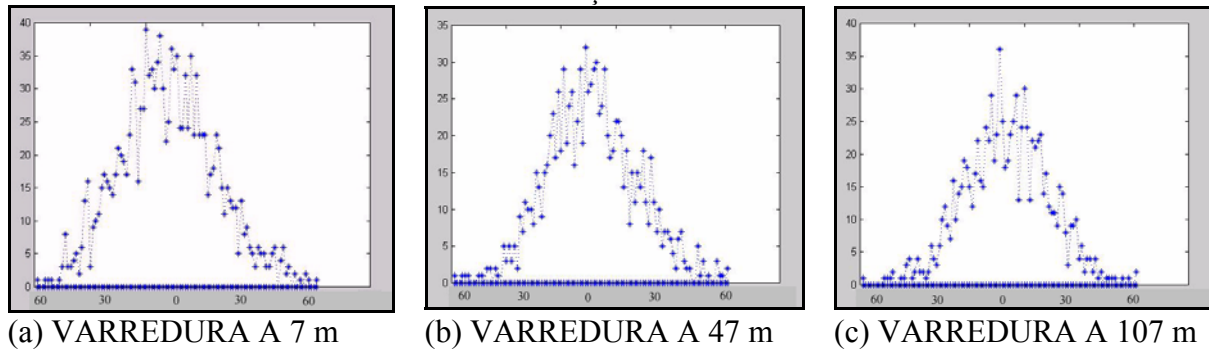
(a) DISTÂNCIA DE VARREDURA = 7 m



(b) DISTÂNCIA DE VARREDURA = 107 m

Também foram analisados os histogramas da distribuição dos pontos para cada distância obtida. Alguns desses histogramas podem ser observados na figura 5.26. Pode-se perceber através das figuras 5.26a, 5.26b e 5.26c que a distribuição dos pontos se aproxima de uma distribuição normal.

FIGURA 5.26: HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS



A tabela 5.11 contém as informações mais relevantes sobre a dispersão dos pontos. Ela apresenta as distâncias de varredura dos planos, a quantidade de pontos obtidos em cada recorte da nuvem de pontos e também a média, variância e desvio padrão das distâncias de cada ponto ao plano médio. Vale lembrar que o desvio padrão é o próprio valor de dispersão dos pontos.

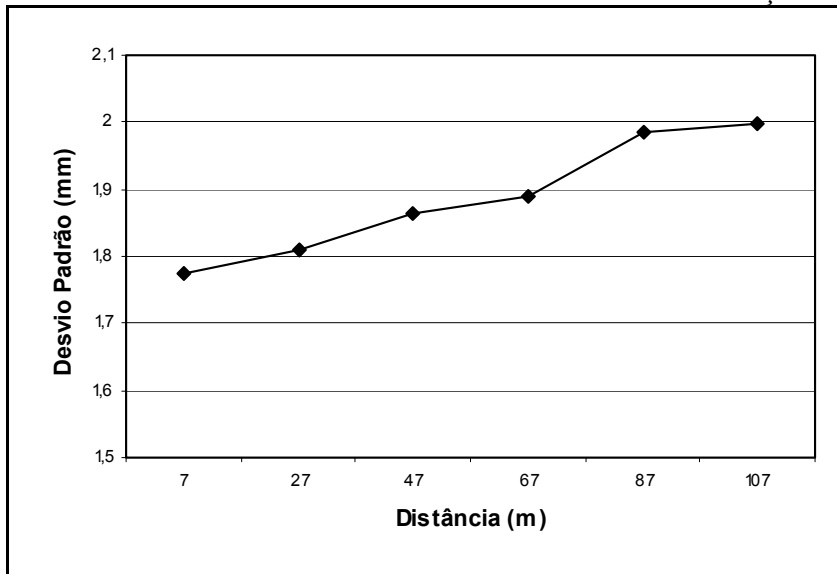
TABELA 5.11: DISPERSÃO DA NUVEM DE PONTOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA

Distância (m)	nº. de pontos	Média (m)	Desvio padrão (mm)	Variância
07	1354	zero	1,77	3,15
27	977	zero	1,81	3,28
47	1029	zero	1,86	3,48
67	1540	zero	1,89	3,57
87	1517	zero	1,98	3,94
107	938	zero	2,00	3,99

Nesse experimento foi tomado o cuidado de não variar muito o tamanho de cada amostra da nuvem de pontos, para que isso não influencie nos resultados da comparação de dispersão. É possível perceber através da tabela 5.11 que os valores da média da distância de cada ponto ao plano são zero, como era de se esperar. Com base nos valores do desvio padrão, nota-se um aumento gradual da dispersão: conforme aumenta a distância em que os planos foram varridos e analisados, aumenta também a

dispersão dos pontos. O menor valor foi de 1,77 milímetros para a distância de 7 metros, chegando a uma dispersão de 2,00 mm para a distância de 107 metros. Na figura 5.27, pode-se perceber melhor essa variação ou aumento da dispersão em função da distância.

FIGURA 5.27: DISPERSÃO DO LASER SCANNER EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA



6 CONCLUSÕES

Avaliação Analítica da Resolução

O método analítico, além de fornecer o valor ajustado do raio da projeção laser para a respectiva distância, fornece também a distribuição dos pontos originais e sobre eles, uma linha de pontos ajustados, descrevendo o padrão da distribuição dos pontos ao longo da distância. Esta linha de pontos ajustados localiza-se exatamente onde deveriam estar os planos médios de cada placa e ainda descreve o perfil de distribuição dos pontos considerados bordas.

Pode-se afirmar que o método é válido e confiável, pois através dele é possível saber a resolução de operação do equipamento laser ao longo da distância. Isto é muito útil para o planejamento de um levantamento, pois quando se conhece a resolução em que o equipamento opera, pode-se planejar o nível de detalhamento obtido em função da distância de instalação do equipamento para a obtenção dos dados.

Avaliação Direta da Resolução

O método direto apresenta bons resultados e pode ser muito útil para uma avaliação preliminar da resolução de equipamentos laser scanner terrestres, pois se trata de um método prático e de fácil aplicação, podendo ser aplicado rapidamente e sem treinamentos especiais para os operadores.

Comparação entre o Método Direto e o Método Analítico para Avaliação da Resolução

Tanto no método analítico como no método direto, comprova-se que quanto maior a distância de operação, maior é o diâmetro da projeção do feixe laser e conseqüentemente, menor a resolução do laser scanner.

Os diâmetros estimados pelo método analítico, quando analisados através de regressão linear, mostram uma melhor correlação nos resultados, se comparados com a análise de regressão do método direto. Uma explicação para este fato pode estar na definição da acurácia dos métodos, pois a escala de valores para resolução no método

direto varia de milímetro em milímetro; enquanto que no método analítico, a resolução estimada varia na escala de décimos de milímetros.

Para uma análise mais detalhada e acurada da resolução, recomenda-se a utilização do método analítico, que por ser desenvolvido matematicamente possui resultados mais robustos.

Avaliação da Acurácia Planimétrica

O método utilizado compara e avalia a acurácia planimétrica do equipamento laser scanner terrestre, considerando diferenças de acurácia nas direções horizontal e vertical do mesmo equipamento. Pôde-se concluir que o equipamento mostra-se mais preciso na direção vertical que na direção horizontal.

As medidas de distâncias verticais ficaram de acordo com as especificações do fabricante. Mas algumas medidas de distâncias horizontais ultrapassaram o valor especificado (6 mm). Uma constatação importante é que os valores que extrapolaram seguem um padrão, localizando-se nas extremidades (superior e inferior) da parede. Os maiores valores de diferença são todos positivos. As menores diferenças localizam-se exatamente na linha central da parede. Esta variação pode ser causada por falhas no sistema de varredura. Porém, esta afirmação não pode ser feita categoricamente, porque também podem ter ocorrido erros na leitura das coordenadas.

O que se recomenda então, é que neste tipo de experimento seja feito um número maior de leituras, tanto com a estação, quanto com o laser scanner. Outra opção é o uso de um painel circular móvel, onde os alvos possam permanecer fixos. Girando este painel como uma roleta, é possível a obtenção de leituras em diferentes posições, com um número restrito de alvos.

Avaliação da Acurácia Linear

Com o desenvolvimento desse método que compara medidas de distâncias lineares entre laser scanners e outros métodos mais acurados, no caso, uma estação total, foi possível a obtenção da acurácia nas medidas de distância para o laser scanner

em diferentes distâncias. Pôde-se perceber um aumento gradual do erro de acurácia conforme se aumenta a distância de observação.

Nas especificações do fabricante, a acurácia é de 4 mm em até 50 metros, mas constatou-se para o equipamento laser scanner testado (Cyrax HDS 3000) uma acurácia de 7 mm em 50 metros, ficando acima do valor especificado. Tal variação pode ter ocorrido devido a erros na leitura das coordenadas usando a estação total.

Uma recomendação é que este experimento seja realizado novamente, obtendo-se um número maior de leituras para este tipo de experimento, podendo com esse maior conjunto de dados, fazer o cálculo da média e do desvio padrão das leituras de distâncias e não somente uma comparação de valores. Assim, será possível avaliar de forma mais precisa os resultados obtidos.

Outra recomendação é a criação de uma base de calibração, com os alvos fixos e suas coordenadas obtidas de forma acurada, para que sirva como um padrão de referência na avaliação da qualidade das distâncias obtidas através de laser scanner.

Avaliação do Uso de Alvos Tridimensionais Esféricos

Quanto à avaliação das diferenças de acurácia na utilização de alvos planos e alvos tridimensionais esféricos, pôde-se perceber que os alvos esféricos possuem uma acurácia menor, quando comparados com os alvos planos. Uma parte desta constatação deve ocorrer devido às dificuldades de identificação do centro do alvo esférico no momento da leitura, principalmente quando se tenta identificar o centro do alvo na nuvem de pontos obtida pelo laser scanner.

Recomenda-se então para futuros experimentos, o desenvolvimento de um sistema de reconhecimento da esfera e estimativa exata de seu centro com modelos matemáticos. Assim, a identificação exata do centro da esfera será mais precisa principalmente em posições mais afastadas dos alvos.

Conclui-se que os alvos esféricos podem sim, ser utilizados, desde que se observe a precisão desejada para o levantamento. A vantagem do alvo esférico é seu baixo custo, chegando a custar quase 50 vezes menos que o alvo plano refletor importado, o que reduz bruscamente o custo de um levantamento.

Avaliação da Dispersão dos Pontos

Com o desenvolvimento do método que avalia a dispersão da nuvem de pontos, foi possível a obtenção dos valores de dispersão (desvio padrão) dos pontos obtidos pelo laser scanner terrestre em diferentes distâncias. Através dos resultados da avaliação da dispersão, é possível a obtenção da precisão das medidas de distância nos levantamentos utilizando laser scanner terrestre.

Os valores de dispersão para o equipamento testado mostraram-se satisfatórios, quando comparado com as especificações do fabricante. Segundo o quadro 3.1, a acurácia em medidas de distância com o laser scanner Cyrax HDS 3000 é de 4 mm para distâncias de operação de até 50 metros. Para essa mesma distância, foi obtido um valor de 1,86 mm de dispersão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABMAYR T.; HÄRTL F.; METTENLEITER M.; HEINZ I.; HILDEBRAND A.; NEUMANN B.; FRÖHLICH C. **Realistic 3D Reconstruction – Combining Laserscan Data With RGB Color Information** - Zoller + Fröhlich (Z+F) GmbH, Simoniusstr. 22, D-88239 Wangen, Germany, 2004.

BALTSAVIAS, E. P. **Airbone Laser Scanning: Basic Relations and Formulas**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54 Número 2-3, pg 199-214, 1999.

BOEHLER, W.; HEINZ, G.; MARBS, A. **The Potential of Non-Contact Close Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording**. CIPA - International Symposium, Proceedings. Potsdam, Germany – 2001.

BOEHLER, W.; BORDAS, V.; MARBS, A. **Investigating Laser Scanner Accuracy** - The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, part 5/C15, pp696-701. Antalya. 2003.

CAVASSIM JÚNIOR, I. **Utilização de Dados Derivados do Varredor Laser na Geração de Cartas Planimétricas na Escala 1:2000**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – UFPR. Curitiba, 2004.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Departamento de Geomática, Editora do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - UFPR. Curitiba/PR 2003.

Cyra Technologies - **Estudo de caso**. Disponível em: www.cyra.com Acesso em: 20/03/2005.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laserscanner: Conceitos e Princípios de Funcionamento**. 3ª Edição – UFPR – Curitiba/PR – Brasil. 97 pg – 2004.

DECRETO-LEI n.º 163/2002, de 11 de Julho. **Estabelece as condições relativas à importação e à colocação no mercado a que devem obedecer os ponteiros laser**. Disponível em: http://www.governo.gov.pt/Portal/PT/Governos/Governos_Constitucionais/GC14/Comunicados_e_Conferencias_de_Imprensa/20020221.htm - Acesso em: 25/03/2005.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações – Aplicações Geodésicas**. Editora UFPR. Curitiba / PR 1994.

HANCOCK, J.; LANGER, D.; HEBERT, M.; SULLIVAN, R.; INGIMARSON, D.; HOFFMAN, E.; METTENLEITER, M.; FROEHLICH, C. **Active Laser Radar for High-Performance Measurements** – Proceedings of the 1998 IEEE – International Conference on Robotics & Automation – Leuven, Belgium – May 1998.

INGENSAND, H.; RYF, A.; SCHULZ, T. **Performances and Experiences in Terrestrial Laserscanning** – Proceedings of the 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques - Zürich – 2003.

I-SITE 3D Laser Scanner - Disponível em <http://www.isete3d.com/>, Acesso em 20/04/2005.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**; Prentice Hall Inc. - Englewood Cliffs, New Jersey. 1988

Laser Scanner Cyrax HDS 3000 - **Especificações** – Disponível em: <http://hds.leica-geosystems.com/> Acesso em: 25/04/2005.

LICHTI, D. D.; HARVEY, B. **The Effects of Reflecting Surface Material Properties on Time-of-Flight Laser Scanner Measurements** - Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications - Ottawa, 2002.

LICHTI, D. D.; STEWART, M. P.; TSAKIRI, M.; SNOW, A. J. **Benchmark Testing on a Three-Dimensional Laser Scanning System**. Geomatics Research Australasia 72:1-23. 2000.

MAIA, T. C. B. **Estudo e Análise de Poligonais Segundo a NBR 13.133 e o Sistema de Posicionamento Global**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – São Carlos/SP. 1999.

MENSI: S10 e S25, Disponível em <http://www.mensi.com/>, Acesso em 29/04/2005.

MINOLTA: **Vivid 910 Non-contact 3-D Digitizer**. Disponível em <http://www.minoltausa.com/>, Acesso em 29/04/2005.

OPTECH: **ALTM – Technical Overview**. Disponível em: <http://www.optech.ca/altmhow.html>, Acesso em 16/04/2005.

ROCHA, A. C. P. **Aplicações do Scanner a Laser I-SITE para Levantamentos Topográficos**. R. Esc. Minas, Ouro Preto, p.307-311, 2002.

SCHULZ T.; INGENSAND H. **Terrestrial Laser Scanning – Investigations and Applications for High Precision Scanning**. TS26 Positioning and Measurement Technologies and Practices II – Laser Scanning and Photogrammetry - FIG Working Week 2004 - Athens, Greece, May 22-27, 2004.

SOUZA, G. C.; **Análise de Metodologias no Levantamento de Dados Espaciais para Cadastro Urbano**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos/SP. 2001.

TAVARES, P.; **A Evolução das Técnicas de Levantamentos Espaciais**. Revista Infogeo, n. 4, p. 62-63. 1998

TOMMASELLI, A. M. G. **Um Estudo Sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a Curta Distância**. GEODÉSIA Online - Revista da Comissão Brasileira de Geodésia. 4 / 2003 [ISSN 1415-1111].

TRIMBLE 3300 DR – **User Guide**. Disponível em: <http://www.trimble.com> acesso em: 18/11/2005.

VENTURI, J. J. **Álgebra Vetorial e Geometria Analítica**. 215 p. 5ª Edição. Editora UFPR. Curitiba / PR 1991.

WOLF, P. R.; BRINKER, R. C.; **Elementary Surveying**. New York. Harper Collins College Publishers. 1994.