RODRIGO GONÇALES

**Dispositivo de varredura laser 3D terrestre e suas aplicações na
Engenharia, com ênfase em túneis**

São Paulo

2007

RODRIGO GONÇALES

**Dispositivo de varredura laser 3D terrestre e suas aplicações na
Engenharia, com ênfase em túneis**

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

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Pimentel Cintra

**São Paulo
2007**

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

São Paulo,   de maio de 2007.

Assinatura do autor_____

Assinatura do orientador_____

FICHA CATALOGRÁFICA

Gonçales, Rodrigo

Dispositivo de varredura 3D terrestre e suas aplicações na Engenharia, com ênfase em túneis / R. Gonçales. – ed.rev. – São Paulo, 2007.

132 p.

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

1.Dispositivos de varredura (Topografia) 2.Laser 3.Instalações industriais 4.Túneis I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

Á minha família,
que sempre me apoiou e acreditou na realização desse objetivo...

á minha noiva Andrezza,
que compartilhou comigo todos os momentos de alegria e
dificuldades na elaboração desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Cintra e Nicola do LTG, por toda ajuda prestada ao longo do desenvolvimento desse projeto.

Aos Amigos da empresa Alezi Teodolini (Marcos Guandalini e Adolfo Guandalini) pela disponibilização dos equipamentos e materiais para pesquisa, assim como a paciência em momentos de ausência do escritório para desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao amigo e colega de trabalho Jalmiro, pela ajuda e auxílio no desenvolvimento das aplicações descritas nessa dissertação e testes realizados na raia olímpica da USP.

À amiga Lílian, pelo auxiliou ao final do trabalho.

À minha família (Pai, mãe, irmãs, noiva) pelo apoio, incentivo e compreensão nos momentos difíceis.

Aos demais amigos que participaram diretamente ou indiretamente na elaboração dessa dissertação.

Há homens que lutam um dia e são bons.
Há outros que lutam um ano e são melhores.
Há os que lutam muitos anos e são muito bons.
Porém, há os que lutam toda a vida.
Esses são os imprescindíveis.
(Bertolt Brecht)

RESUMO

Novas tecnologias estão sendo desenvolvidas constantemente para coletar informações de superfícies ou de sólidos para diversas finalidades. Alguns métodos clássicos, como a Topografia e a Fotogrametria terrestre, com o passar dos anos, tiveram uma grande evolução. Na Fotogrametria terrestre todo o processo está sendo feito em meio digital. Na topografia, as estações totais automatizaram a medição de ângulos e distâncias. Essa evolução tecnológica fez com que os levantamentos se tornassem cada vez mais rápidos e precisos, aumentando a produtividade. O mais recente nessa evolução é o levantamento através do sistema de varredura a laser (*Laser Scanner*) 3D.

São muitas as aplicações dessa tecnologia, dentre as quais pode-se citar: túneis, levantamento do como construído (*as-built*), mineração (principalmente subterrânea), arqueologia, levantamento de monumentos para restauração, refinarias e instalações industriais e outras, caracterizadas pela grande complexidade dos elementos envolvidos.

A presente dissertação apresenta os conceitos envolvidos em todos os processos, desde a coleta de dados até o produto final. Desenvolve uma metodologia de uso que possa ser útil em diversas áreas, mostra uma aplicação completa na área de túneis, complementada por uma visão geral da área de plantas industriais e procura apresentar testes para quantificar a precisão que se obtém por essa tecnologia.

Palavras Chave: Nuvem de pontos, *Laser Scanner* 3D, Túneis.

ABSTRACT

New technologies are constantly being developed in order to collect information of surfaces or solids for diverse purposes. Some classic methods such as topography and terrestrial photogrammetry have had a great evolution in the past. For example, all the processes of the terrestrial photogrammetry are made in digital way and the Total Stations have automated the measurements of angles and distances.

This technical evolution made the surveying faster and accurate, increasing the productivity. However this evolution does not stop for there; in other words, the last technology in the area of topography is the surveying with the system known as Laser Scanner 3D.

The Laser Scanner technology 3D has a lot of applications such as: tunnel, as-built, mining (mainly in the underground); archaeology (for restore monuments), refineries, industrial installations, etc., characterized by the great complexity of the involved elements.

This work presents concepts involved in all the processes, since from data collection to the final product. It develops a methodology of use that can be applied in several areas, with emphasis in tunnels surveying area and presents some tests to quantization the accuracy.

Keywords: Point Cloud, Laser Scanner 3D, Tunnels.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	Justificativa	13
1.2.	Objetivos	13
1.3.	Organização do Trabalho	13
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
2.1.	Histórico	15
2.2.	Distanciômetros	16
2.3.	Tecnologia laser	17
2.4.	Dispositivo laser 3D terrestre	21
3.	<i>LASER SCANNER 3D TERRESTRE</i>	23
3.1.	Equipamentos e princípios	23
3.1.1.	Método de coleta de informações	23
3.1.1.1.	Tempo de Percurso (<i>Time of Flight</i> - TOF)	25
3.1.1.2.	Comparação da Fase	27
3.1.1.3.	Triangulação	30
3.2.	Métodos de varredura	32
3.3.	Influência da atmosfera na emissão do pulso laser.	33
3.4.	Equipamentos	35
3.5.	Segurança	38
3.5.1.	Padrão Internacional IEC 60825-1	40
3.5.2.	Norma ANSI Z 136.1 e CDRH 21 CFR (Padrão Americano)	42
4.	METODOLOGIA	44
4.1.	Levantamento de campo	44
4.1.1.	Levantamento topográfico (Estação Total) e Embasamento matemático	51
4.1.2.	Consolidação ou Registro	57

4.1.3. Validação da nuvem de pontos	59
4.1.4. Modelagem.....	61
4.1.5. Reconhecimento de primitivas	62
PARTE II - APLICAÇÕES	65
5. TÚNEIS	66
5.1. Introdução: problemática, diversos métodos e opções	66
5.2. Levantamento de campo	69
5.3. Processamento de escritório	71
5.4. Avaliação do método	79
PARTE III – TESTES	82
6. TESTES DE PRECISÃO E QUALIDADE	82
6.1. Primeiro Teste: Precisão em distância	83
6.2. Segundo Teste: Condições de Trabalho	85
6.3. Terceiro Teste: Transporte de coordenadas e verificação da influência do tipo de alvo	87
6.4. Quarto Teste: Precisão Inversa.....	90
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	92
REFERÊNCIAS	95

PARTE I – INTRODUÇÃO E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1. INTRODUÇÃO

Constantemente desenvolvem-se novas tecnologias para coletar informações de superfícies ou de sólidos para diversas finalidades. Alguns desses processos estão bem difundidos e são bastante utilizados na Engenharia, já outros, apesar de proporcionarem ótimos resultados, não são muito utilizados.

Alguns métodos clássicos, como a Topografia e a Fotogrametria terrestre, com o passar dos anos, tiveram uma grande evolução. Na fotogrametria terrestre todo o processo, desde a captura de imagens (CCD) até o produto final, está sendo feito em meio digital.

Na topografia, as estações totais automatizaram a medição de direções e distâncias. Além disso, a evolução dos equipamentos possibilitou realizar medições sem que haja a necessidade de refletores, não sendo necessário colocar o prisma no ponto a ser medido.

Essa evolução tecnológica fez com que os levantamentos se tornassem cada vez mais rápidos e precisos, aumentando a produtividade. Os sistemas de varredura a laser (*Laser Scanner 3D*) vêm se difundindo com muita rapidez nos últimos anos. As principais vantagens sobre as demais são a não necessidade de refletores para a coleta das distâncias aos objetos, a capacidade de gerar uma densa nuvem de pontos 3D de todo o objeto e a rapidez na coleta dos dados, podendo chegar até a mais de 525.000 pontos/s.

São muitas as aplicações dessa tecnologia, dentre as quais pode-se citar: levantamento do como construído (*as-built*), mineração (principalmente subterrânea), arqueologia, levantamento de monumentos para restauração, refinarias e instalações industriais e outras, caracterizadas pela grande complexidade dos elementos envolvidos.

Para gerar coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície, os aparelhos *laser scanners 3D* emitem pulsos de laser com o auxílio de um espelho de varredura. Esse pulso laser atinge o objeto e parte dessa energia volta para o sistema. Desse modo é possível medir a distância entre o sensor e o objeto.

Basicamente são três princípios básicos de medição a laser: Triangulação, Tempo de percurso (*Time of flight*) e Diferença da fase.

Os aparelhos baseados no princípio da Triangulação, possuem, no mínimo um sensor CCD e uma fonte de energia (laser). O pulso laser é emitido e seu retorno é registrado por um ou mais sensores CCDs. O ângulo de varredura dos pulsos é registrado no sistema a cada pulso emitido e conhecendo-se a base entre o sensor laser e a(s) câmara(s), por meio de um processo de calibração determina-se a posição dos pontos refletidos pelo objeto.

O outro princípio, Tempo de percurso (*Time of flight*), possui um sensor que envia um pulso de laser para o objeto, esse pulso retorna ao sistema, a partir disso, utilizando a velocidade da luz é possível calcular a distância e através de *codificadores (encoders)* se obtém a inclinação dessa observação. A partir dessas coordenadas esféricas é possível calcular a posição 3D do objeto.

Equipamentos que coletam informação usando a Comparação da fase de onda emitida geralmente quebram o feixe laser emitido geralmente em três faixas diferente. O Cálculo das coordenadas dos pontos refletidos pelos objetos escaneados é dado através da comparação dos três comprimentos de onda.

Devido à rapidez e à enorme quantidade de informação adquirida com essa tecnologia, a área de aplicação se estende, mas não está limitado a:

- Levantamentos de como construído (*As-built*);
- Restauração e preservação de monumentos históricos;
- Sítios arqueológicos;
- Monitoramento de estruturas;
- Engenharia reversa;
- Controle de qualidade na indústria;
- Criação de maquetes eletrônicas para realidade virtual;
- Outras.

1.1. Justificativa

A execução da dissertação é justificada pela própria falta de trabalhos científicos com relação a levantamentos topográficos, cadastrais e como construído utilizando esse equipamento, até mesmo em nível internacional, por se tratar de uma tecnologia nova.

1.2. Objetivos

Com o grande crescimento e popularização dessa tecnologia, a presente dissertação tem como objetivo geral definir e difundir os conceitos envolvidos em todos os processos, desde coleta de dados até o produto final.

Como objetivos específicos pode-se apontar o desenvolvimento de uma metodologia de uso (seqüência de operações de campo e escritório) que possa ser útil em diversas áreas (coisa que não se encontra na bibliografia pesquisada), um estudo preliminar sobre como quantificar a precisão apresentada por esse tipo de equipamento e mostrar aplicações na área de túneis.

1.3. Organização do Trabalho

A presente dissertação esta dividida em 3 Partes.

A Parte I está dividida em 4 capítulos, sendo que o capítulo 2 apresenta uma introdução histórica aos primeiros equipamentos medidores de distância (por serem os predecessores) e um resumo da evolução da tecnologia laser.

O capítulo 3 apresenta uma descrição dos princípios de funcionamento, os métodos de coleta de informações e algumas normas de segurança que regulamentam equipamentos que utilizam a tecnologia laser.

Ainda na Parte I, o capítulo 4, apresenta os passos envolvidos na metodologia de trabalho, desde a coleta de dados (trabalho de campo) até a geração do produto final.

A Parte II (capítulo 5) mostra fundamentalmente uma aplicação prática na área de túneis.

A Parte III, composta pelo capítulo 6, mostra alguns testes de precisão desenvolvidos nos pilares situados na raia olímpica da USP.

E, por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões a respeito do uso desse tipo de equipamentos com algumas sugestões para a continuidade do trabalho.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Histórico

A história da técnica em geral, e da Topografia e Geodésia em particular, comprova que há invenções e construção de equipamentos que modificam profundamente os métodos de levantamento, propiciando medições mais precisas, confiáveis, cômodas e muitas vezes mais econômicas. A tabela 2.1 apresenta um resumo dos principais equipamentos, indicando a época aproximada de sua invenção ou desenvolvimento, local de origem e função.

Tabela 2.1: Resumo da evolução dos equipamentos.
Fonte: BRANDALIZE et al, 2004, TRIMBLE (2005), LEICA (2005)

Instrumento	Ano	Origem	Função
Corda Graduada com nó	1400 ac	Egito	Medição de distâncias e construção de ângulos retos
Odômetro	20	Império Romano	Medição de distâncias percorridas por veículos
Corrente	1550	Holanda	Medição de distâncias
Teodolito	1571	Inglaterra	Medição de ângulos horizontais e verticais
Telescópio	1608	Holanda	Formação de imagem ampliada de um objeto distante
Nível	1704	EUA	Medição de desnível
Trânsito	1831	EUA	Medição de ângulos verticais e horizontais
Trena de aço	1870	EUA	Medição de distâncias horizontais
Altimetro	1877	França	Determinação de altitudes através da pressão
Teodolito com micrômetro	1922	Alemanha	Medição mais precisa de ângulos horizontais e verticais
RADAR	1935	Inglaterra	Medição de distância e velocidade
Nível automático	1950	Alemanha	Medição de desnível com horizontalização automática
Geodímetro	1953	Suécia	Medição de distâncias de forma mais cômoda
Telurômetro	1957	África do sul	Medição de distâncias
Nível a Laser	1968	Alemanha	Medição de desnível
Teodolito eletrônico	1970	Alemanha	Medição de ângulos horizontais e verticais
Estação Total	1971	Alemanha	Medição de distâncias e ângulos
GPS	1973	EUA	Posicionamento e navegação
Nível Digital	1990	Suíça	Medição de desnível
Laser Scanner 3D	-	-	Medição de distâncias inclinadas, intensidade e cor dos objetos.

De todos esses equipamentos, pode-se destacar, para o presente trabalho os medidores eletrônicos de distâncias, como precursor do laser scanner 3D. O primeiro desse tipo foi o Geodímetro, inventado em 1947, sendo bastante utilizado para medir a velocidade da luz sobre distâncias conhecidas e, a partir de 1953, para medir distâncias. O segundo equipamento foi o Telurômetro, desenvolvido em 1957 que utilizou, em vez da tecnologia eletro-ótica do primeiro, a de microondas (BRANDALIZE et al., 2004).

A partir de 1962, com a invenção do diodo laser, os MEDs passaram a utilizar a tecnologia laser para medida de distâncias, e a seguir o infravermelho.

2.2. Distanciômetros

Na década de 40 do século passado o geodesta sueco F. Bergstrand desenvolveu um método de determinação da velocidade da luz. Esse método nada mais era que a retomada do processo criado por FIZEAU em 1849, que utilizava uma roda dentada, em rotação, para modular um feixe de luz. Com essas experiências, começou-se a imaginar o processo inverso, ou seja, medir distâncias usando como escala o tempo de percurso de um raio luminoso.

Em 1953 a AGA (SVENKA AKTIBOLAGET GASACUMULATOR de Estocolmo - Suécia) juntamente com Bergstrand desenvolveram o primeiro geodímetro, ou seja, um equipamento eletro-ótico destinado à medida de distâncias, denominado NASM1. Após vários testes satisfatórios lançou-se uma versão melhorada, o NASM2. Esses equipamentos difundiram-se rapidamente e possibilitavam medir distâncias de até 50 km.

Dois dispositivos técnicos havia tornado possível a criação do geodímetro: a célula de Kerr e os osciladores a quartzo. A célula de Kerr foi desenvolvida entre 1928 e 1930 pelo Professor Karoulus de Leipzig. Sua função era eliminar a inércia mecânica da roda dentada de Fizeau para interromper o feixe luminoso. Os osciladores eletrônicos estabilizados a quartzo foram aproveitados em 1940 para fixar a frequência de interrupção do feixe luminoso

Em 1967, um trabalho inicialmente complexo da operação de medida começa a ser automatizado. A união dos distanciômetros com calculadoras eletrônicas permite a leitura direta da distância em forma digital. A evolução dos componentes

eletrônicos mudou a feição dos equipamentos. A substituição de válvulas eletrônicas por transistores e destes por circuitos integrados, permitiu reduzir drasticamente o peso e o volume dos instrumentos.

Em torno de 1969, foram desenvolvidos instrumentos que empregam radiações infravermelhas, caracterizadas por excelente desempenho a curtas distâncias. Quase na mesma época o laser foi introduzido como fonte de radiação, permitindo ampliar consideravelmente o campo de ação dos instrumentos eletro-óticos. O Geodímetro modelo 8 da AGA foi o pioneiro na utilização de feixes laser. Era utilizado um laser contínuo de Hélio-Neon, com emissão coerente de comprimento de onda 632,8 nm.

2.3. Tecnologia laser

A possibilidade de criação de lasers foi prevista teoricamente por Albert Einstein em meados de 1917. A mecânica quântica, então em desenvolvimento, indicava que átomos e moléculas absorvem e liberam energia em quantidades determinadas e descontínuas (quanta). Einstein previu que seria possível estimular um corpo a liberar energia em forma de radiação eletromagnética com características uniformes e consistentes.

Devido às condições técnicas existentes, somente na década de 50 foi possível iniciar as pesquisas propostas por Einstein.

Em 1954 apareceu um novo conceito na produção de radiação eletromagnética. Anteriormente a eletrônica se restringia ao uso e controle da energia e dos elétrons livres que se movimentavam de um átomo para outro. Mas a partir dessa data começou-se a aproveitar o estado de energia existente dentro dos átomos para produzir ondas eletromagnéticas.

A radiação eletromagnética pode ser considerada como um conjunto de ondas (elétricas e magnéticas) cuja velocidade no vácuo é 3×10^8 m/s. As várias formas de radiação, caracterizadas pelo seu comprimento de onda, compõem o espectro eletromagnético. A tabela 2.2 mostra as regiões em que o espectro eletromagnético costuma ser dividido.

Tabela 2.2 Regiões do espectro eletromagnético

Região do espectro eletromagnético		Comprimento de onda
Raios gama		Menos que 0,1 Å
Raios X		0,1 a 200 Å
Raio ultravioleta		200 a 4000 Å
Luz visível		0,400 a 0,780 microns
Infravermelho	Infravermelho próximo	0,78 a 10 microns
	Infravermelho médio	10 a 60 microns
	Infravermelho longínquo	60 a 300 microns
Ondas de rádio	Sub milimétrico	300 a 1 milímetro
	Rádio milimétrico	1 milímetro a 1 centímetro
	Microondas rádio	1 centímetro a vários centímetros

Segundo Leinwoll (1969), o primeiro dispositivo capaz de amplificar e gerar radiação eletromagnética por métodos subatômicos funcionava em uma frequência de 24.000 MHz, na região das microondas no espectro eletromagnético, e se denominava maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Em 1958 foi proposto um método para construir um maser para ondas eletromagnéticas na região do visível. Sabia-se que todos os sistemas atômicos podem se associar a certos níveis de energia característicos. Normalmente, os sistemas se encontram em repouso em seu nível energético mais baixo, mas ao absorver energia passam para um estado excitado. Este estado não é o natural de nenhum sistema atômico, portanto ele tende a voltar a seu estado de repouso, efetuando esse regresso da maneira mais simples possível.

A. L. Schawlow e C. H. Townes realizaram testes e descobriram que um fóton que se excitasse dentro de um dispositivo de espelhos interagia com outros átomos energizados emitindo assim outros fótons. De acordo com sua teoria, no caso de fótons que se movessem perpendicularmente ao plano dos espelhos, chocariam uns com os outros e seriam refletidos para outro espelho que foi montado no dispositivo. Com essas sucessivas alterações no estado físico dos átomos a intensidade dessa transformação ia aumentando o suficiente para atravessar um dos espelhos de forma coerente (LEINWOLL, 1969).

Foi proposto o desenvolvimento de um dispositivo semelhante com sistema de espelhos semitransparentes para facilitar a saída do maser. Já em 1960, Theodore Maiman testou cinco diferentes materiais usando o mesmo princípio de espelhos. Nascia a partir daí o primeiro maser ótico que foi denominado de Loser (Light Oscillation by Stimulated Emission of Radiation), mas Loser significa perdedor e o nome foi trocado para laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

O laser por definição é um dispositivo que amplifica a luz através de estimulação da radiação. Na prática, um laser é geralmente usado como uma fonte ou gerador de radiação. O gerador é construído adicionando um mecanismo de retorno em forma de espelhos para amplificar a potência da luz (LENGYEL, 1967).

Sabe-se que a luz se propaga em todas as direções; desse modo o laser foi criado e pesquisado para que fosse possível controlar os feixes de luz, podendo assim concentrar a sua energia em uma única direção. Isso é possível, pois, em um fóton emitido por estimulação de outro fóton, ambos possuem a mesma frequência, a mesma fase e a mesma direção (LEINWOLL, 1969).

Segundo Leinwoll (1969), Theodore Maiman utilizou um cristal de rubi, em que a cor era determinada pela quantidade de cromo existente no óxido de alumínio. O rubi de maser de Maiman tinha em torno de 0.05% de cromo, o que deixava o cristal levemente rosado. Maiman utilizou um cilindro de rubi rosa com um diâmetro entre 0,5 e 1 cm com um comprimento de 2 a 10 cm, com as faces limites desse cilindro paralelas e com um grande grau de precisão. Um dos lados era constituído de uma superfície completamente refletiva e a outra extremidade com uma refletividade parcial. O rubi era irradiado por um flash geralmente por alguns milissegundos com uma energia de 1000 a 2000 joules. A maioria da energia era dissipada com o calor. Uma fração dessa energia, geralmente, era emitida pelo flash em radiação de verde a azul, a qual era absorvida pelo rubi.

Essa energia gerava a excitação dos fótons e o rubi afunilava a energia sendo absorvida sobre uma larga faixa do espectro eletromagnético. A radiação emergia coerentemente através da superfície parcialmente reflectante do rubi (LENGYEL, 1967).

A figura 2.1 ilustra o aparelho desenvolvido por Theodore Maiman.

Figura 2.1 - Laser de rubi
 Fonte: Adaptado de LENGYEL, 1967

Segundo Caldas (1986), o princípio de funcionamento do laser envolve o fornecimento de energia a certos materiais adequados, provocando assim uma descarga desta energia na forma de radiação desejada. A cor de um laser é determinada com grande exatidão pela natureza do corpo emissor e pelas características de excitação. Enquanto as fontes comuns de radiação emitem um fluxo radiante distribuído por um amplo espectro de comprimento de onda, contínuo ou descontínuo, a emissão do laser é restrita a uma banda muito estreita do espectro eletromagnético, o que o torna efetivamente monocromática.

Além de sua coerência espacial, o laser é igualmente coerente no tempo, por causa das condições de formação do feixe de radiação. Esta precisão temporal torna os raios laser extremamente úteis à medição.

Existe uma enorme quantidade de tipos de lasers que podem ser classificados de acordo com o meio ativo de emissão de radiação e pelo tipo de emissão (pulsado ou contínuo).

A tabela 2.3, resume algumas das características para os principais tipos de laser.

Tabela 2.3 Principais classes de laser e algumas de suas características
 Fonte: Adaptado de CALDAS, 1986.

Tipo	Meio ativo	Comprimento de onda (nm)	Potência	Exemplos
Sólido	Vidro ou Cristal dopado com íons (cromo, neodímio)	650 a 2500	< 0,1 W a > 1 Gigawatt	Neomídio, Nd: YAG
Gasoso	Gás atômico	500 a 5000	0,1 a 1 W	He-Ne
	Gás molecular	5000 a 10000	1 W a 100 kW	CO ₂
	Gás ionizado	260 a 630	20 W (contínuo) > 1 kW (pulsado)	Neônio e Argônio
Líquido	Corante em solução	Sintonizáveis de 400 a 1000	> 1 kW (pulsado)	Rodamina
Semicondutor	Diodos	600 a 1600	1 a 10 W	(AlGa) As, GaAs.

2.4. Dispositivo laser 3D terrestre

Os dispositivos lasers são classificados por diferentes critérios. Como pode ser verificado pela tabela 2.3, geralmente eles são identificados de acordo com o meio ativo de emissão de radiação. Em termos gerais, estes são divididos em laser de sólidos ou de fluídos (gasoso ou líquido). Em cada uma destas categorias, encontra-se uma grande variedade de lasers simples ou compostos por combinações de diferentes materiais.

Os equipamentos Laser Scanners 3D utilizam os lasers de sólidos para realizar as medições. Esses são constituídos de quartzo, vidro ou outros materiais cristalinos. Entre esses, destacam-se as granadas, minerais de cristalização isométrica ou cúbica. Prevalece atualmente o uso da granada de ítrio – Alumínio (YAG).

Esses cristais são “dopados” com impurezas cuja emissão é mais intensa ou aproveitável do que a do próprio cristal. Das várias substâncias com esta característica, o Neomídio (Nd), um metal do grupo das terras raras é empregado em lasers de vidro ou de granada (Nd:YAG).

Esse tipo de laser geralmente emite onda com comprimento de ondas de 1064 nm, no infravermelho. Alguns equipamentos operam com comprimentos de onda na região do visível (532 nm – verde). Para tal é necessário dobrar a

freqüência de emissão, fazendo com que o comprimento de onda se divida por dois num processo chamado na literatura inglesa de *frequency doubling*.

Uma vez vistos os fundamentos, o próximo capítulo aprofunda nos equipamentos laser 3D terrestres.

3. LASER SCANNER 3D TERRESTRE

Sistemas *laser scanner 3D* permitem a construção de modelos (em três dimensões), visualização e análise de estruturas complexas, com extraordinária velocidade, precisão e segurança. O objeto escaneado pode ser visualizado através de um software de manipulação de nuvens de pontos, sendo que a partir desses pontos esse objeto pode ser modelado e exportado para um sistema CAD, por exemplo, o MicroStation ou o AutoCad.

A maioria dos sistemas atuais utiliza laser pulsado para realizar as medições de distâncias determinando a posição dos pontos através de coordenadas esféricas.

Esse capítulo tem a finalidade de apresentar os principais conceitos envolvidos na coleta de pontos utilizando esse tipo de sistema.

3.1. Equipamentos e princípios

Como já se apontou, o presente trabalho inclui o estudo sobre o uso da tecnologia laser para a coleta de informações utilizando dispositivos de varredura (*Laser scanner*) 3D terrestres. Esse equipamento pode ser definido com um dispositivo de emissão laser, geralmente pulsado, que registra as distâncias entre o equipamento e o objeto a ser levantado e a direção no espaço dessas observações. A partir desses dados pode-se calcular as coordenadas espaciais dos pontos de interesse. Esse tipo de equipamento pode ser classificado de acordo com sua precisão, alcance e taxa de coleta de informações. Dispondo-se dessas três características é possível definir o equipamento mais adequado para cada aplicação.

3.1.1. Método de coleta de informações

Geralmente, um medidor eletrônico de distância (MED) emite um pulso através de um transmissor e recebe o mesmo pulso que foi refletido por um objeto. Esse pulso retorna para o receptor fazendo com que seja possível calcular a distância entre o medidor eletrônico e o objeto, como mostra a figura 3.1.

Figura 3.1 – Medidor Eletrônico de Distância sem refletor.

O sistema *laser scanner* trabalha basicamente da mesma forma, mas além da distância entre o aparelho e o objeto, é necessário coletar outras informações (direções através de ângulos), pois o que se necessita são as coordenadas tridimensionais de cada ponto coletado.

Segundo Kaspar et al (2004), os equipamentos *Laser Scanner 3D* podem ser divididos por princípios de medições, como mostra a figura 3.2.

Figura 3.2 – Divisão por princípios de medição

Fonte: Adaptado de KASPAR ET AL, 2004

O método de tempo de percurso é o mais utilizado para aplicações onde se necessita coletar informações que estão a maiores distâncias (acima de 50 metros). Esse método apresenta uma taxa de coleta de até 8000 pontos por segundo e um alcance máximo que pode variar de 100 a 1500 metros.

A comparação da fase é um método de coleta mais rápido, mas com uma considerável degradação da precisão para distâncias maiores que 30 metros. Esses equipamentos coletam até 700.000 pontos por segundo.

A triangulação é mais indicada para levantamentos a curta distância. Oferece precisões submilimétricas em distâncias de até 10 metros e relativamente baixa taxa de coleta de pontos (em torno de 500 pontos por segundo).

3.1.1.1. Tempo de Percurso (*Time of Flight* - TOF)

Como destaca Tommaselli (2004), esse instrumento mede as distâncias, a intensidade da energia refletida pelo objeto e os parâmetros de atitude do feixe (azimute e elevação), em relação ao referencial do equipamento.

As medições realizadas pelo princípio do tempo de retorno do sinal (*Time of flight* - TOF) fazem com que o pulso eletromagnético seja emitido pelo transmissor ao mesmo tempo em que um contador eletrônico é iniciado. O pulso é refletido pelo objeto e retorna ao receptor, momento em que o contador interrompe a contagem. Desse modo, conhecendo a velocidade de propagação do sinal, é possível determinar a distância percorrida pelo pulso laser, que é o dobro da distância ao objeto.

Como exemplo, considerando que a velocidade de propagação do pulso é de 3×10^8 m/s (velocidade da luz), assim para uma distância de 15 m, o tempo de retorno do sinal é de 1×10^{-7} s.

A distância é obtida pela expressão matemática abaixo:

$$D = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

Onde

D é a distância do sensor ao objeto;

C é a velocidade da luz no vácuo e;

Δt é o tempo de ida e volta do pulso laser.

Segundo Tommaselli (2004), o instrumento mede as distâncias, a intensidade da energia refletida pelo objeto e os parâmetros de atitude do laser (azimute e elevação), que são coordenadas esféricas do ponto em relação ao referencial do laser.

Figura 3.3 – Ilustração esquemática de coleta de coordenadas polares

Segundo a figura 3.3, as coordenadas esféricas do ponto P são conseguidas através da medição dos ângulos θ (Elevação) e φ (Azimute) e da distância do equipamento ao ponto em questão (D).

As coordenadas cartesianas 3D (X,Y, Z) são calculadas a partir das coordenadas polares de cada ponto, como mostram as equações abaixo:

$$\begin{cases} X = D \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi \\ Y = D \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi \\ Z = D \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (3.2)$$

A Figura 3.4 ilustra o método de coleta de informações através do método de tempo de percurso, onde os parâmetros de elevação e azimuth estão no referencial do equipamento.

Figura 3.4 – Princípio de medição por tempo de percurso (*Time of Flight – TOF*)
Fonte: TOMMASELLI, 2004.

Esse método é utilizado para objetos situados a distâncias maiores, que podem chegar a 800 metros, e a exatidão está na faixa que vai do milímetro a alguns centímetros.

3.1.1.2. Comparação da Fase

Este método utiliza a comparação da fase da onda laser para coletar coordenadas X, Y, Z dos pontos registrados, o que significa que enquanto outros métodos fazem com que um único pulso seja refletido, este método utiliza as variações da onda para realizar as medições. A distância do equipamento ao objeto é medida através da comparação de fase da onda, ou seja, entre a fase na saída e na chegada do pulso.

Equipamentos que coletam informação usando essa metodologia geralmente quebram o feixe laser emitido em três faixas diferentes. A determinação da distância

é feita comparando as três ondas emitidas e as mesmas ondas recebidas no equipamento.

A figura 3.5, por exemplo, mostra os diferentes comprimentos de onda utilizados pelo fabricante FARO, 76 m (azul), 9,6 m (vermelho) e 1,2 m (amarelo).

A distância do objeto ao equipamento é determinada, com precisão, através da comparação da onda emitida e recebida do ciclo de 1,2 metros.

Figura 3.5 – Exemplo de medições através de comparação de fase

Por exemplo, um objeto a uma distância de 2 metros é medido na modulação 1,2 metros, sendo um ciclo completo mais 0,8 metros no segundo ciclo. Outro exemplo pode ser mostrado para um objeto a 13 metros de distância da fonte de radiação laser, exemplificado pela figura 3.5. Dessa maneira, esse ponto será registrado no segundo ciclo de 9,6 metros, sendo que a precisão é conseguida no segundo ciclo de 1,2 metros após o início do segundo ciclo de 9,6 metros.

A figura 3.6 mostra graficamente como as medições são realizadas através da comparação dos sinais transmitidos e refletidos.

Figura 3.6 – Esquema gráfico de medições através de comparação de fase

Fonte: MAIA, 1999 *apud* WUTKE , 2006

A distância do sensor ao objeto é obtida, para cada comprimento de onda, através da equação 3.3.

$$D = M\lambda + \Delta\lambda \quad (3.3)$$

Onde:

M é o número inteiro de comprimento de onda;

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

Segundo Wutke (2006), como o sinal é refletido de volta ao instrumento, a distância entre o objeto é calculada pela equação 3.4:

$$2D = M\lambda + \Delta\lambda \quad (3.4)$$

A grande diferença de utilizar esse método de varredura é a velocidade de coleta. Pois através da comparação da fase alguns equipamentos chegam a coletar até 525000 pontos por segundo, enquanto que no método do tempo de percurso (*time of flight*) são coletados em torno de 5.000 pontos por segundo.

Outra grande diferença é o alcance e precisão. Enquanto um equipamento que utiliza o tempo de percurso como sistema de medição pode trabalhar com precisão na casa do milímetro (3mm a 6 mm) a grandes distâncias (até 200 metros), um equipamento que utiliza a comparação da fase, por enquanto, só consegue boas precisões (3 mm a 6 mm) em curtas distâncias (até 25 metros).

É claro que a vantagem de coletar maior ou menor quantidade de pontos e dispor de maior ou menor precisão vai depender do tipo de aplicação.

3.1.1.3. Triangulação

Outro princípio de coleta de informação é chamado de triangulação. Esse método pode utilizar um ou dois sensores CCD e uma fonte de energia (laser). O pulso laser é emitido e seu retorno é registrado por esses sensores.

Quando é utilizado apenas um sensor, o método é chamado de câmera simples e quando se usam dois sensores CCD é chamado de câmera dupla.

A figura 3.7 e 3.8 ilustra o princípio de funcionamento dessa técnica.

Figura 3.7 – Método de triangulação – Câmera Simples

No método de câmara simples (figura 3.6), o laser é emitido diretamente a um espelho que por oscilação ou rotação envia o pulso laser aos objetos. O laser retorna o sistema passando por um conjunto de lentes e por fim, é gravado em um sensor CCD.

Figura 3.8 – Método de triangulação – Câmera Dupla

Já no método de câmara dupla (figura 3.8), o laser é emitido diretamente ao objeto. Os pulsos lasers retornam o sistema passando por um conjunto de lentes em direções diferentes, sendo que a mesma informação é gravada em diferentes sensores CCD's.

Segundo Tommaselli (2004), esse método utiliza o mesmo princípio de intersecção fotogramétrica, ou seja, o ângulo de varredura dos pulsos é registrado no sistema a cada pulso emitido e conhecendo-se a base entre o sensor laser e a(s) câmara(s), por meio de um processo de calibração determina-se a posição dos pontos refletidos pelo objeto.

Esse tipo de sistema é adequado para a reconstrução de objetos pequenos ou com muitos detalhes (por exemplo: estátuas e esculturas) e a distância máxima de operação depende da base entre o sensor laser e o sensor CCD. Como a base não é ajustável, essa distância máxima é limitada para atender a precisão (no máximo 10 metros). Nesse caso, a exatidão está no nível submilimétrico (KASPAR et al., 2004).

3.2. Métodos de varredura

Os equipamentos *Laser Scanner* 3D utilizam alguns métodos para emissão do pulso laser. Os mais comuns são os de espelho oscilador e de polígono de rotação.

Genericamente são emitidos pulsos de laser com o auxílio de um espelho de varredura. Esse pulso laser atinge o objeto e parte dessa energia volta para o sistema (DALMOLIN et al., 2003).

No método do espelho oscilador o pulso laser é dirigido diretamente ao espelho que está em constante oscilação vertical, como mostra a figura 3.9.

Figura 3.9 – Espelho oscilador.

Essa variação do espelho faz com que o laser seja projetado sobre o objeto faixa por faixa. Para que haja uma progressão horizontal os equipamentos devem possuir, ou um servo-motor que movimenta o espelho horizontalmente em torno de um eixo, ou o espelho deve ser capaz de oscilar horizontalmente. No primeiro caso, pode-se citar o equipamento da Trimble modelo GS200 que utiliza um espelho que envia o pulso laser numa faixa vertical com amplitude de 60° . Na horizontal esse equipamento possui um servo-motor com capacidade de giro de 360° fazendo com que se tenha um campo de visada de $360^\circ \times 60^\circ$. Para exemplificar o segundo caso (polígono de rotação), pode-se citar o equipamento da Leica modelo HDS 2500 que tem um campo de visada de $40^\circ \times 40^\circ$. Esse equipamento não possui servo-motor, o espelho oscila vertical e horizontalmente.

O outro método existente é conhecido como espelho de rotação. O pulso laser é emitido para um prisma óptico regular que está em constante rotação, dessa forma o pulso laser é refletido para o objeto em diferentes direções. Esse método é mostrado na figura 3.10.

Figura 3.10 – Polígono de rotação.

3.3. Influência da atmosfera na emissão do pulso laser.

Sabe-se que a onda eletromagnética diminui sua velocidade de propagação dependendo do índice de refração do ambiente de propagação. Dessa maneira a temperatura, umidade e os componentes químicos que formam o ambiente podem influir. Em medições muito longas, essa influência pode causar consideráveis degradações na precisão.

O efeito da atmosfera é definido pela mudança no índice de refração (n), onde n é definido pela expressão 3.5:

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.5)$$

Onde:

c é a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo ($c = 299.792,5$ km/s);

v é a velocidade média (atmosfera)

Para um erro de 1° C na medida da temperatura de bulbo seco, permanecendo constante a pressão atmosférica, tem-se um erro de aproximadamente 1 ppm enquanto que para um erro de 1mm de Hg na medida da pressão atmosférica, permanecendo constante a temperatura, tem-se um erro de aproximadamente 0.3 ppm (NETTO, 1990).

Essa influência é basicamente dependente do comprimento de onda da radiação eletromagnética e das características físicas do meio ambiente. Os fatores determinantes dessa influência são; a temperatura, pressão, presença de vapores de água e as composições químicas, especialmente o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar. Essas influências podem ser avaliadas através de cálculos baseados em medições das condições atmosféricas.

São utilizadas inúmeras formulações matemáticas para calcular a influência que o pulso laser sofre pelas influências atmosféricas, dependendo da aplicação e precisões requeridas.

Segundo MAIA (1999), o valor de n é normalmente próximo da unidade e é assumido por muitos instrumentos MED como sendo igual a 1,000320. No espectro de onda eletromagnética de luz visível e infravermelho, n é calculado usando a fórmula de Barrel e Sears:

$$(n_t - 1) = (n_s - 1) \times \frac{273}{273 + t} \times \frac{P}{760} - \frac{15,02 \cdot E}{273 + t} \times 10^{-6} \quad (3.6)$$

Onde:

$$(n_s - 1) \times 10^{-6} = 287,604 + \frac{1,6288}{\lambda_0^2} + \frac{0,0136}{\lambda_0^4} \quad (3.7)$$

Sendo que:

n_t é o índice de refração corrente;

n_s é o índice de refração do ar a 0° C e 760 mm Hg de pressão, contendo 0,03% de CO₂

t é a temperatura durante a observação (° C);

P é a pressão durante a observação (mm Hg);

E é a pressão do vapor de água (mm Hg)

λ_0 é o comprimento de onda do sinal no vácuo

Nos trabalhos pesquisados não foram encontrados nenhum dado que quantificasse essas correções, no sentido de ver se sua influência é significativa para as condições de uso. Isso abre campo para trabalhos futuros.

3.4. Equipamentos

Atualmente existe um grande número de equipamentos e fabricantes, cada qual desenvolvido para uma determinada aplicação e, que podem ser classificados e diferenciados pela precisão, alcance, taxa de coleta, parâmetros de segurança e acessórios que os compõem.

Pode-se dizer que existem três grandes empresas no mercado de aparelhos *laser scanner* 3D. A Leica Geosystem desenvolveu três modelos de equipamentos; a empresa francesa Mensi, que atualmente faz parte do grupo Trimble, desenvolveu cinco tipos de equipamento e a empresa americana Riegl, desenvolveu quatro tipos de equipamentos.

Outras empresas como FARO, Zoller+Frohlich, MDL e OPTECH também desenvolveram equipamentos *laser scanner*. A tabela 3.1 mostra a maioria dos equipamentos existentes no mercado e suas características.

Tabela 3.1 – Características dos equipamentos *Laser Scanner 3D*
 Fonte: Sites visitados - TRIMBLE (2006), LEICA (2006), RIEGL (2006), FARO (2006), Z+F (2006), MDL (2006), OPTECH (2006)

Tipo de equipamento Fabricante	Alcance (m)	Comprimento de onda (nm)	Segurança IEC 60825-1	Precisão pontua	Peso (kg)	Campo de visada (H/V)	Pontos/s
HDS 2500 (Leica Geosystem)	1.5 a 50	532 (verde)	3R	6 mm a 50 m de distância	20,5	40° x 40°	1.000
HDS 3000 (Leica Geosystem)	1 a 100	532 (verde)	3R	6 mm a 100 m de distância	16	360° x 270°	1.000
HDS 4500 (Leica Geosystem)	1 a 53	Infravermelho	3R	6 mm a 53 m de distância	13	360° x 310°	5.000
S10 (Mensi/Trimble)	0.8 a 10	Vermelho	3R	0.21 mm	16	320° X 46°	100
S25 (Mensi/Trimble)	2 a 25	Vermelho	3R	0.6 mm	18	320° X 46° °	100
GS100 (Mensi/Trimble)	2 a 100	532 (verde)	3R	6 mm a 100 m de distância	13,6	360° x 60°	5.000
GS 200 (Mensi/Trimble)	1 a 200	532 (verde)	3R	6.5 mm a 200 m de distância	13,6	360° x 60°	5.000
GX (Trimble)	1 a 200	532 (verde)	3R	6.5 mm a 200 m de distância	13	360° x 60°	5.000
LMS – Z20i (RIEGL)	4 a 400	IV próximo	1	15 mm	13	360° x 80°	12000* 8000**
LMS – Z210ii (RIEGL)	4 a 650	IV próximo	3R	15 mm	13	360° x 80°	12000* 8000**
LMS – Z360 (RIEGL)	1 a 300	IV próximo	1	6 mm	13	360° x 80°	12000* 8000**

Tipo de equipamento Fabricante	Alcance (m)	Comprimento de onda (nm)	Segurança IEC 60825-1	Precisão pontual	Peso (kg)	Campo de visada	Pontos/s
LPM-800HA (RIEGL)	10 a 800	IV próximo	1M	15 mm	15	360° x 150°	1.000
LPM – 2K (RIEGL)	2500	IV próximo	1M	50 mm	14.6	360° x 160°	N/D
LS 420 HE 20 (FARO)	Até 20	785	N/D	3 mm a 25 m de distância	14,5	360° x 320°	120.000
LS 880 HE 40 (FARO)	Até 40	785	N/D	3 mm a 25 m de distância	14,5	360° x 320°	120.000
LS 880 HE 80 (FARO)	Até 80	785	N/D	3 mm a 25 m de distância	14,5	360° x 320°	120.000
Lara 25200 (Zoller+Frohlich)	1 a 25.2	N/D	3R	0.9 mm a 25 m de distância	16	360° x 310°	625.000
Lara 53500 (Zoller+Frohlich)	1 a 53.5	N/D	3R	3 mm a 25 m de distância	16	360° x 310°	500.00
LaserAce Scanner (MDL)	1 a 700	905	1	50	8.1	N/D	300
ILRIS – 3D (Optech)	3 a 800	N/D	1	N/D	12	N/D	N/D

*espelho oscilador

**espelho de rotação

N/D = informação não disponível

A tabela 3.1 mostra algumas características importantes de cada equipamento existente no mercado. O alcance é faixa do equipamento para atender a precisão pontual de cada equipamento. A precisão é relativa a pontos isolados, coletados com o equipamento. O código de segurança baseia-se na norma internacional IEC 60825-1, que será descrita com mais detalhes a seguir.

3.5. Segurança

Uma grande preocupação ao se trabalhar com aparelhos emissores de raios laser é com relação à segurança. Com o avanço da tecnologia, é importante que os profissionais da área de levantamentos conheçam mais a fundo como trabalhar com o sistema de um modo seguro visando à proteção dos olhos e da pele, evitando queimaduras e também riscos de incêndio.

Segundo Brandalize et al (2004), os problemas ocorrem em função da potência emitida pelo laser, comprimento de onda, duração e taxa de repetição. Algumas outras características importantes são o diâmetro do feixe e a sua divergência.

O laser produz um raio de luz intenso, altamente convergente. Se direcionado, refletido ou focado sobre um objeto, a luz do laser será parcialmente absorvida, aumentando a temperatura da superfície e/ou do interior do objeto, potencialmente causando alterações ou deformações do material.

Esta propriedade, que foi aplicada à cirurgia laser e ao processamento de materiais pode também causar danos. O corpo humano é vulnerável à incidência de certos lasers, e sob certas circunstâncias, a exposição pode resultar em danos aos olhos e à pele.

Entretanto, desde sua descoberta, nos anos sessenta, o laser tem sido utilizado amplamente na vida diária e em várias técnicas com poucos incidentes se comparados a outras ferramentas de trabalho.

Pesquisas referentes a danos nos olhos e na pele foram feitas de maneira a entender o perigo biológico da radiação laser. É amplamente aceito que o olho humano é sempre mais vulnerável do que a pele.

A potência de uma energia luminosa de um dispositivo laser pode ser medida e avaliada não apenas pela área em que ela se concentra, mas também pelo tempo de exposição sobre uma determinada superfície.

Hoje em dia o tipo de laser mais utilizado é do tipo pulsado, ou seja, são gerados pulsos laser num intervalo muito pequeno de tempo e por ser uma fonte de luz altamente colimada. Muitas vezes superior à de qualquer outra fonte de luz e, teoricamente, a energia emitida pode ser concentrada em um único ponto que, se olhado de frente, pode ser projetado na retina e queimar o tecido, sem que haja tempo de proteger-se piscando os olhos.

Para avaliar os valores aceitáveis da radiação laser que o olho humano suporta é levado em consideração a situação menos favorável. Neste caso considera-se a pupila completamente aberta (situação noturna, por exemplo), com um diâmetro de 7 mm. Se os olhos estão focados para o infinito no momento em que a radiação está incidindo sobre ele, o feixe luminoso da radiação laser irá criar um *spot* circular na retina. Valores aceitáveis para a incidência de radiação laser na retina estão associados à densidade da energia (Joules por metro quadrado) ou pela densidade radiante do fluxo (Watts por metro quadrado). Em ambos os casos, os valores aceitáveis irão depender do período de tempo em que a radiação irá incidir sobre os olhos ou sobre outra parte do corpo (KASPAR et al, 2004).

A principal preocupação, entretanto, é a perigosa exposição da retina no espectro óptico, que vai aproximadamente de 400 nm (luz violeta) até 1400 nm (perto do infravermelho) e inclui toda a porção visível do espectro óptico. Dentro desta região do espectro os raios laser colimados focalizam uma pequena região da retina.

O pior caso de exposição ocorre quando o olho de um indivíduo estiver focado a uma distância curta, com incidência de um raio direto ou refletido através de superfície espelhada. A luz entrando no olho é multiplicada por um fator de 100 vezes quando atinge a retina. Portanto, um raio laser no visível com potência de 10 watt/cm^2 resultará em uma exposição de 1.000 watt/cm^2 na retina, o que tem densidade mais que suficiente para causar dano. Serão necessários níveis muito maiores de radiação laser, para causar danos, no caso do olho não estar focado na direção da emissão ou se o raio estiver refletido por uma superfície difusa (não espelhada).

Felizmente na região visível do espectro óptico há um reflexo (da pálpebra)

que fecha o olho em menos de 0.25 segundos e o previne de uma longa exposição.

Há uma grande variedade de normas de segurança para usuários e fabricantes de aparelhos que utilizam a tecnologia laser. Essas normas classificam os aparelhos laser de acordo com sua potência e efeitos sobre os tecidos. Dentre elas podemos citar as normas americanas (ANSI Z136.1 e CDRH 21 CRF) e a norma européia (IEC 60825-1), que vale a pena entender.

3.5.1. Padrão Internacional IEC 60825-1

Originalmente designado como IEC (International Electrothechnical Commission) 825-1, essa norma foi editada pela primeira vez em 1984. Em 1993 passou a denominar-se IEC 60825-1 sendo que em 1997 recebeu uma emenda sobre a padronização dos LEDs (Light Emitting Diodes) e em 1998 foi reeditada. Uma última edição é de 2001 (BRANDALIZE ET AL, 2002).

De acordo com o padrão IEC – 2001 há quatro classes de laser com subclasses, correspondendo a diferentes níveis de perigo, baseados no conhecimento médico atual:

- **Classe 1**

Dispositivos Laser Classe 1 são extremamente seguros para os olhos. A potência do Laser é tão fraca que a visualização direta ou através de instrumentos óticos de aumento não é danosa. Geralmente são aparelhos encapsulados ou com a potência laser muito baixa.

- **Classe 1M**

Essa classificação foi dada a equipamentos Laser com potência muito baixa, colimado e de diâmetro grande ou altamente divergente. Em relação à potência, são perigosos aos olhos se visualizados por meio de instrumentos óticos, por exemplos lentes e lunetas.

- **Classe 2**

Os dispositivos Laser Classe 2 emitem na região visível do espectro óptico

(400-700nm) e podem operar tanto em modo contínuo quanto em pulso e são seguros para visualização acidental devido ao reflexo do olho (da pálpebra) que é de 0.25 segundos, que o protege contra longo tempo de exposição. A visualização longa e intencional, entretanto, pode ser perigosa, assim como a visualização do laser através de instrumentos óticos.

- **Classe 2M**

São potencialmente perigosos aos olhos se observados por meio de instrumentos óticos. Dependendo dos níveis de radiação e condições geométricas específicas (distância da fonte produtora do laser e espaçamento da malha) um dispositivo da classe 2M pode ser menos perigoso do que um que seja classificado como Classe 2. Dispositivos dessa classe são, portanto, potencialmente baixos quanto aos riscos, operam na região do visível e seu feixe pode ser colimado e de diâmetro grande ou altamente divergente.

- **Classe 3R**

Equipamentos Laser Classe 3R são seguros quando manipulados com precaução, mas podem ser potencialmente perigoso aos olhos se observados por meio de instrumentos óticos ou por visualização direta próxima à fonte de emissão laser. O risco é muito mais baixo do que para os de Classe 3B e, portanto possuem menos requisitos de segurança para fabricação e controle do usuário.

- **Classe 3B**

Lasers ou dispositivos lasers dessa classificação são normalmente perigosos quando ocorre uma exposição direta ao raio. A visualização de uma reflexão difusa é normalmente segura.

- **Classe 4**

Lasers que são capazes de produzir reflexos difusos perigosos. Podem causar danos e até perigo de incêndio. Seu uso requer extrema cautela.

O Limite de Emissão Acessível - LEA (*Accessible Emission Limit* - AEL) é o valor máximo de radiação a que um indivíduo pode ser exposto. Esses valores de

LEA foram elaborados com base nos níveis de Exposição Máxima Permitida (*Maximum Permissible Exposure* - MPE), ou seja, os limites que um indivíduo pode ser exposto sem que isto lhe seja prejudicial. Os níveis de MPE são especificados tanto para o olho humano quanto para a pele e variam em função do comprimento de onda da radiação laser e do tempo de exposição (BRANDALIZE, ET AL, 2002).

3.5.2. Norma ANSI Z 136.1 e CDRH 21 CFR (Padrão Americano)

Depois do invento do laser, a partir da década de sessenta, as normas americanas começaram a ser desenvolvidas e ocorreram sucessivas revisões entre o período de 1973 a 1986, época em que a tecnologia laser alcançou o estado em que se encontra atualmente (BRANDALIZE, ET AL, 2002).

Os Estados Unidos da América utilizam dois tipos de padrão para classificação de equipamentos laser. A norma ANSI Z 136.1 desde 1986 e a norma CDRH 21 CFR desde 1976.

Os usuários dessa tecnologia estão subordinados a regulamentação do ANSI (*American National Standards Institute*) enquanto que os fabricantes estão subordinados ao CDRH (*Center of Devices and Radiological Health*) que por sua vez é um órgão da FDA (*Food and Drug Administration*).

O CDRH requer que todo produto laser vendido nos Estados Unidos desde agosto de 1976 tenha um certificado do fabricante que especifique a potência do laser. Assim como a IEC 6082-1:2001 essa norma classifica os dispositivos lasers de acordo com a LEA (Limite de Emissão Acessível), ou seja, o limite de tempo que um indivíduo pode receber esse tipo de radiação sem que isso cause algum dano a ele.

Segundo o CDHR 21 CFR, produtos lasers podem ser classificados da seguinte forma:

- **Classe I**

Dispositivos lasers dessa classificação não são considerados perigosos.

- **Classe IIa**

Nessa classificação a radiação laser é considerada perigosa se observada num intervalo superior a 1×10^3 s, abaixo desse tempo limite a radiação não causa danos.

- **Classe II**

Podem causar danos à visão se observados diretamente por um período maior que $2,5 \times 10^{-1}$ segundos.

- **Classe IIIa**

Podem causar sérios riscos à visão se observados diretamente ou através de instrumentos óticos por um período maior que $1,8 \times 10^{-4}$ segundos.

- **Classe IIIb**

Lasers classificados como IIIb são considerados perigosos para a pele e visão através de exposição direta.

- **Classe IV**

Lasers de classificação IV são considerados perigosos para a vista. Se forem expostos diretamente ou indiretamente, devem ser manipulados com cuidado.

O conhecimento das características dos equipamentos mostrou-se importante, por exemplo, no momento de mostrar às autoridades brasileiras uma equivalência entre as classes americana e européia, para a liberação de equipamentos junto a empresas de refinaria (Petrobrás), para comprovar que não havia risco de incêndio ou explosão ao se trabalhar em ambientes carregados de gases e produtos inflamáveis.

4. METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta a metodologia do presente trabalho que consiste basicamente na metodologia de uso desses equipamentos que, não vem descrita em livros ou manuais. Trata de todas as fases, começando pelo levantamento de campo com o aparelho (e seu planejamento), coleta de dados, definição e escolha de parâmetros, configuração de equipamentos. Trata de levantamentos complementares com estação total e alinhava seus fundamentos matemáticos. A seguir trata do registro, consolidação e validação da nuvem de pontos, trabalhos típicos de escritório. O capítulo encerra-se com um item sobre modelagem e reconhecimento de primitivas, importante quando se sabe que há elementos a serem levantados que obedecem formas regulares como seções em túneis ou tubulações em plantas industriais.

Como mostrado na tabela 3.1 existe uma grande quantidade de equipamentos e cada um deles possui programas específicos para a coleta de informações em campo. Dessa forma o trabalho de campo pode se diferenciar em alguns pontos de um equipamento para outro.

No presente trabalho foram utilizados, como fonte de pesquisa, os equipamentos Laser Scanner 3D modelo GS100 e GS200 da fabricante Trimble.

Os dois equipamentos têm as mesmas características, fazendo com que o levantamento de campo seja elaborado e executado de maneira idêntica. O programa que é utilizado para coleta de dados é denominado PointScape.

4.1. Levantamento de campo

Os equipamentos de varredura laser (*laser Scanner*) 3D podem ser utilizados para diversas finalidades como será discutido em capítulos posteriores. Independente do tipo de finalidade do levantamento (aplicação), alguns princípios gerais devem ser seguidos.

A partir das necessidades do projeto e localização devem-se analisar todos os parâmetros envolvidos no projeto, como:

- Quantas estações e conseqüentemente quantos dias serão necessários pra realizar tal levantamento;
- Equipe de campo envolvida (definir funções);
- Estimar a densidade (*grid*) com que será coletada a nuvem de pontos;
- Verificar a necessidade de utilizar, como complemento, métodos topográficos convencionais (Estação total ou GPS);
- Definir o sistema de coordenadas.

Têm-se duas opções para definir o sistema de coordenadas do levantamento. Ou se trabalha com um sistema arbitrário ou com um sistema de coordenadas pré-definidas (Sistema topográfico local, por exemplo).

Optando por um sistema arbitrário, o levantamento será feito utilizando apenas o equipamento laser scanner e alvos (planos ou esféricos). Portanto, uma das estações será a origem do sistema, ou seja, terá suas coordenadas arbitradas, bem como o azimuth.

A finalidade dos alvos é fazer a junção das estações de coleta, isto é, definir um sistema único de coordenadas para todo o local. Esse processo é chamado de registro das cenas ou consolidação e será explicado mais adiante. A figura 4.1 mostra dois exemplos de alvos utilizados para essa finalidade.

Nesse caso, além do estudo do local do posicionamento da estação é necessário posicionar os alvos em locais bem distribuídos, pois disso dependerá todo o processo.

Ao contrario da topografia convencional, não é necessário haver intervisibilidade entre as estações. O que se necessita é a visibilidade de ambas para alvos de uma mesma cena, ou seja, alvos que serão escaneados a partir de duas ou mais estações.

Figura 4.1 – Exemplo de alvos planos e esféricos.

Fonte: KERSTEN et al, 2004.

A figura 4.1 retrata dois tipos de alvos utilizados nos levantamentos com os equipamentos Trimble. O equipamento GS100 é visto ao fundo ao lado esquerdo do veículo, estacionado sobre um pilar.

Geralmente são utilizados alvos esféricos ou planos. As esferas são utilizadas quando não se necessita que o levantamento esteja referenciado a um sistema de coordenadas conhecido, portanto trabalha-se com um sistema arbitrário. Os alvos planos podem ser utilizados nessa situação, mas são mais recomendados quando se necessita trabalhar num sistema de coordenadas conhecidas.

Determinando o local onde será estacionado o equipamento, se faz o estudo de locais de posicionamento dos alvos. Essa etapa pode ser considerada a mais importante do trabalho de campo, pois se os alvos não forem posicionados corretamente todo o levantamento de campo pode ser prejudicado.

Para a junção do levantamento feito por duas estações é necessário ter ao menos três alvos em comum, posicionados em campo, ou seja, os mesmos alvos que foram coletados na primeira estação devem ser levantados na segunda. Deve-se tomar cuidado, para que os alvos não sejam posicionados em campo

eqüidistantes entre si e na mesma altura, pois isso produz correlação e pode degradar o resultado do registro dos dados.

Com todos os alvos posicionados em campo e com o local em que será estacionado o equipamento definido, pode-se começar a coleta de dados.

Primeiramente, deve-se escanear todos os alvos dessa estação, para que, se houver algum problema de equipamento durante o levantamento de campo os dados que já tinham sido levantados não percam a referência.

A figura 4.2 mostra a nuvem de pontos de escaneamento visando um alvo esférico (a) e um plano (b) e sua correspondente geometria.

Figura 4.2 – Exemplo de alvos escaneados

Para o reconhecimento automático são utilizados algoritmos que empregam o método dos mínimos quadrados. Esse procedimento será explicado em capítulos posteriores.

Coletados todos os alvos, o próximo passo é o escaneamento dos objetos importantes para o projeto em questão. Nessa etapa, é necessário determinar a densidade da nuvem de pontos a ser coletada.

Podem ocorrer dois problemas nessa etapa. Se a nuvem de pontos for coletada com uma densidade baixa talvez os objetos escaneados não sejam bem definidos em seus detalhes. Em contrapartida se a nuvem de pontos for coletada com grande densidade, o trabalho de campo pode tornar-se muito demorado e fazer com que o arquivo gerado fique muito grande, dificultando sua manipulação.

Para facilitar o processo de interpretação da nuvem de pontos, pode-se utilizar informações a cores, ou seja, é possível coletar as cores de cada objeto escaneado. Um exemplo é mostrado na figura 4.3.

Figura 4.3 – Nuvem de pontos em cor real (RGB)

Esse processo é possível já que durante a aquisição da nuvem de pontos o equipamento coleta automaticamente fotografias (imagem raster), registrando as coordenadas e a orientação do centro perspectivo (CP), como em Fotogrametria. Para mais detalhes ver ANDRADE, 1998.

Como essas fotografias estão referenciadas ao mesmo sistema de coordenadas da nuvem de pontos, o programa faz a junção das informações pontuais (nuvem de pontos) com as informações da imagem (cor), resultando na nuvem de pontos em cor real.

Para trabalhos que necessitam desse tipo de informação, deve-se tomar cuidado no momento da tomada da foto, pois o equipamento coleta primeiro as fotografias depois a nuvem de pontos. Desse modo, pode acontecer de alguma

pessoa, animal ou veículo entrar na área de abrangência da fotografia na hora da tomada, gerando assim uma nuvem de pontos com cores não condizentes com o encontrado.

Além desse tipo de nuvem de pontos (cor real), outros tipos de renderização (texturização) podem ser feitos para visualização (intensidade e níveis de cinza).

Todas essas informações são coletadas simultaneamente, exceto a cor real, pois é necessário indicar se a nuvem será coletada dessa maneira, o que torna o processo mais lento.

Geralmente utiliza-se como referência de precisão e densidade da nuvem de pontos o tipo de classe laser com que se está trabalhando.

Como a sua classificação é dependente da quantidade de energia que é recebida em uma determinada área, é possível determinar em que classificação o aparelho está operando através de três parâmetros: a abertura da malha (*grid*); a distância do equipamento ao objeto e a quantidade de disparos laser por ponto.

A quantidade de disparos laser por ponto é determinante no que tange a qualidade da nuvem de pontos coletada. Configura-se o equipamento para que seja coletado um maior número de observações de um mesmo ponto, ou seja, o equipamento coleta informações de um mesmo ponto várias vezes, sendo que o resultado que é gravado no arquivo é a média entre eles, eliminando dessa maneira alguns erros grosseiros que possam interferir na etapa de processamento dos dados.

Com a variação desses parâmetros os equipamentos podem trabalhar segundo a norma internacional IEC 60825-1, na classificação 2M ou 3M. Para levantamentos expeditos é recomendável utilizar a classificação 2M. Quando se necessita de um levantamento mais preciso e com uma densidade maior, utiliza-se a classificação 3R de acordo com a mesma normatização.

Em campo o operador deve ser capaz de identificar em qual tipo de classificação está trabalhando, pois dessa forma ele pode otimizar o trabalho.

A tabela 4.1 mostra como configurar o espaçamento entre pontos (*grid*) no ato da coleta de dados para se trabalhar em classe 2M.

Tabela 4.1 – Configuração de densidade para atender a classificação 2M

	Distância Aparelho - Objeto (m)							
Disparos	0,25	0,5	1	2	5	10	25	50
	Espaçamento em mm							
1	0,023	0,031	0,031	0,062	0,155	0,31	0,775	1,55
2	0,038	0,046	0,062	0,06	0,155	0,31	1,55	3,1
4	0,155	0,155	0,15	0,124	0,155	0,62	4,65	7,5
9	0,170	0,170	0,186	0,248	0,31	6,2	4,65	7,5
16		0,232	0,3	0,372	0,62	9,3	7,75	13,5
25			0,372	0,496	0,75	9,3	11,25	

Qualquer outro espaçamento que for definido acima do valor mostrado na tabela 4.1, implica em que o equipamento passa a trabalhar em classe 3R.

Para auxiliar o trabalho de campo, alguns equipamentos possuem uma câmara de vídeo mostrando um vídeo em tempo real o que permite que o operador possa escolher e definir como será feita a coleta de dados.

O equipamento utilizado para a presente pesquisa utiliza uma câmara de vídeo integrada em tempo real. Com o vídeo sendo mostrado é necessário selecionar qual área será escaneada e definir parâmetros de resolução da malha que será formado pela nuvem de pontos.

Tendo sido feito todo o levantamento dessa posição, deve-se transferir o equipamento para a seguinte, e realizar todo o procedimento novamente: coletar as esferas e/ou os alvos planos, selecionar os objetos alvos de escaneamento e efetuar a coleta. Deve-se repetir o mesmo procedimento em outras estações, até que toda a área seja escaneada.

4.2. Levantamento topográfico (Estação Total) e Embasamento matemático

Um trabalho de topografia convencional também deve ser realizado durante o levantamento do local. Isso é necessário para que o levantamento feito com o equipamento laser scanner seja colocado num sistema de coordenadas já existente, ou um sistema de coordenadas arbitrário.

O método indicado para realizar esse tipo de levantamento é a intersecção a ré ou também conhecida como problema dos três pontos ou estação livre.

Esse processo consiste em medir, a partir de uma estação desconhecida, as distâncias entre os outros três pontos de posição conhecida. Isto é, consegue-se obter as coordenadas de um ponto com relação a uma rede materializada por três outros (COSTA; SILVA, 2004).

Quando se necessita trabalhar num sistema de coordenadas conhecido, o procedimento é o seguinte:

Estaciona-se a estação total em algum local do qual que se possam visualizar três ou mais pontos com coordenadas conhecidas. Utilizando as opções da estação total e utilizando o método da estação livre, determinam-se as coordenadas do ponto da estação total através de visadas aos três pontos com coordenadas conhecidas.

Com as coordenadas da estação determinada fazem-se visadas para os alvos planos que foram coletados com o *laser scanner*, e desse modo determina-se as coordenadas dos alvos planos, já no sistema de coordenadas locais.

Numa segunda etapa, estaciona-se a estação total num outro ponto de onde sejam visíveis os três alvos que já foram levantados e de maneira análoga, determinam-se as coordenadas da estação. Com essas coordenadas conhecidas é possível determinar as coordenadas de outros alvos que agora estão visíveis para a estação Total. Esse procedimento é feito para toda a área.

Segundo a figura 4.4, considere o ponto P_0 , como sendo o desconhecido (estação total), e P_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, os pontos de posição conhecida. As distâncias D_{bi} , $i = 1, 2, 3, \dots, n$ também são conhecidas, pois foram determinadas pelas observações feitas com a estação total.

Figura 4.4 – Determinação de coordenadas através de distâncias

Para encontrar as coordenadas do P_0 , utiliza-se o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Para se realizar o ajustamento de observações ou medidas, é necessário que os dados excedam o mínimo requerido para a solução do problema, ou seja, devem existir observações redundantes.

Segundo Gemael (1994), a partir das observações redundantes sujeitas a flutuações probabilísticas e de uma estimativa de sua precisão, o ajustamento tem por objetivo estimar, mediante a aplicação de modelos matemáticos adequados e do MMQ, um valor único para cada uma das incógnitas (X) do problema a partir de amostras observadas (Lb) com precisão ($\sum Lb$) e estimar a precisão de tais incógnitas ($\sum x$) e a eventual correlação entre elas.

Dados: (Lb e $\sum Lb$) $\Rightarrow$ estimar: (X e $\sum x$)

O cálculo por mínimos quadrados produz estimativas atualizadas (ajustadas) de todas as variáveis do modelo, bem como a sua MVC (Matriz Variância - Covariância).

Têm-se três incógnitas para esse problema: as coordenadas X , Y e Z do ponto P_0 . As observações (amostras) que serão utilizadas no ajustamento são as distâncias coletadas (Dbi).

O modelo matemático que pode ser usado para realizar o ajustamento das observações pode ser expresso por:

$$Dbi = \left[(Xp_{i-1} - Xp_i)^2 + (Yp_{i-1} - Y_i)^2 + (Zp_{i-1} - Z_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

Utilizando uma das coordenadas já conhecidas, um azimuth e uma distância correspondente, pode-se estimar as coordenadas aproximadas do ponto P0.

Dependendo das variáveis (observações e ou parâmetros) envolvidas a solução pode ser obtida usando o Método Correlato, Método Combinado e Método Paramétrico.

Nesse pode-se utilizar o Método Paramétrico, pois as observações são funções explícitas dos parâmetros, isto é:

$$L_a = F(X_a) \quad (4.2)$$

onde:

L_a – Vetor das observações ajustadas ($n \times 1$)

X_a – vetor dos parâmetros ajustados ($n \times 1$)

F – Função que relaciona L_a e X_a , podendo ser linear ou não

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

$$V = AX - Lb \quad (4.3)$$

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

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

A é a matriz ($n \times u$) de derivadas parciais;

V é o vetor ($u \times 1$) dos resíduos.

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

$$X = -N^{-1}U \quad (4.4)$$

$$Xa = X_o + X \quad (4.5)$$

onde:

X_a - vetor dos parâmetros ajustados ($u \times 1$)

X_0 - vetor dos parâmetros aproximados ($u \times 1$)

X - vetor das correções aos parâmetros ($u \times 1$)

sendo que:

$$N = A^T P A \quad (4.6)$$

$$U = A^T P L_b \quad (4.7)$$

$$P = \sigma_0^2 \left(\sum L_b \right)^{-1} \quad (4.8)$$

sendo P a matriz peso;

σ_0^2 é o fator de variância *a priori* e

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

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

$$La = AX \quad (4.9)$$

$$V = AX - L_b \quad (4.10)$$

O número de observações dependerá diretamente do número de pontos, com coordenadas conhecidas, que serão levantados. Para que se possa realizar o ajustamento deve se ter ao menos 4 pontos, para que se tenham observações superabundantes, pois o número de parâmetros a se determinar sempre será 3, ou seja, as coordenadas X, Y e Z do ponto P0.

No caso em que se tenham apenas 3 pontos, será possível obter um resultado mas não será possível realizar o ajustamento de observações através do MMQ, pois dessa forma têm-se 3 incógnitas (u) para 3 observações (n).

Para n distâncias observadas, tem-se formulado um sistema de n equações com três incógnitas $(X_{P0}; Y_{P0}; Z_{P0})$.

$$D_1 = \left[(X_{P0} - X_{P1})^2 + (Y_{P0} - Y_{P1})^2 + (Z_{P0} - Z_{P1})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

$$D_2 = \left[(X_{P0} - X_{P2})^2 + (Y_{P0} - Y_{P2})^2 + (Z_{P0} - Z_{P2})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

$$D_3 = \left[(X_{P0} - X_{P3})^2 + (Y_{P0} - Y_{P3})^2 + (Z_{P0} - Z_{P3})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.13)$$

$$D_n = \left[(X_{P0} - X_{Pn})^2 + (Y_{P0} - Y_{Pn})^2 + (Z_{P0} - Z_{Pn})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.14)$$

O sistema anterior não é linear, necessitando ser linearizado aplicando o desenvolvimento de Taylor.

A matriz A , para esse caso é dada por:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_1}{\partial X_{P0}} & \frac{\partial D_1}{\partial Y_{P0}} & \frac{\partial D_1}{\partial Z_{P0}} \\ \frac{\partial D_2}{\partial X_{P0}} & \frac{\partial D_2}{\partial Y_{P0}} & \frac{\partial D_2}{\partial Z_{P0}} \\ \frac{\partial D_3}{\partial X_{P0}} & \frac{\partial D_3}{\partial Y_{P0}} & \frac{\partial D_3}{\partial Z_{P0}} \\ \frac{\partial D_n}{\partial X_{P0}} & \frac{\partial D_n}{\partial Y_{P0}} & \frac{\partial D_n}{\partial Z_{P0}} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Definida a matriz A , a solução se dá através das formulações matemáticas acima apresentadas.

Em decorrência da aproximação introduzida na linearização do modelo é requerida uma fase de iterações e testes ao final do ajustamento. A omissão dos termos na série de Taylor e a adoção de valores iniciais aproximados implicam na necessidade de iterações até a convergência, mas em princípio, nem todos os sistemas iterativos convergem. Alguns podem divergir, outros oscilar em torno de um valor e outros convergir, porém para uma solução incorreta.

Para saber se o ajustamento das observações realizado está coerente e confiável, deve-se realizar uma análise estatística, utilizando o valor que foi arbitrado na determinação da Matriz Peso, ou seja, o fator de variância a priori.

O fato de arbitrar-se um valor para o fator de variância a priori (σ_0^2), não acarretara nenhum efeito no ajustamento. Esta escolha é feita antes do ajustamento, para fixação dos pesos e, portanto designado como fator de variância a *priori* (GEMAEL, 1994).

Após o ajustamento pode-se estimar um valor ($\hat{\sigma}_0^2$) em função dos resíduos, chamado de fator de variância a *posteriori*, que é dado por:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n - u} \quad (4.16)$$

Com valores de σ_0^2 e $\hat{\sigma}_0^2$ pode-se fazer uma análise do ajustamento através da estatística Qui-quadrado (χ^2), onde se testa a hipótese básica

$$H_0: \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2 \quad (4.17)$$

contra a hipótese alternativa:

$$H_1: \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2 \Rightarrow \text{teste bilateral} \quad (4.18)$$

ou

$$H_1: \sigma_0^2 > \hat{\sigma}_0^2 \Rightarrow \text{teste unilateral} \quad (4.19)$$

Para a verificação de uma das hipóteses compara-se o valor calculado por:

$$\chi_C^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} (n - u) = \frac{V^T P V}{\sigma_0^2} \quad (4.20)$$

com os valores teóricos (tabela Qui-quadrado) com $v = n - u$ graus de liberdade.

A hipótese básica não é rejeitada, ao nível de significância α , num teste bilateral, se:

$$\chi_C^2 < \chi_{v,1-\alpha/2}^2 \text{ ou } \chi_C^2 > \chi_{v,\alpha/2}^2 \quad (4.21)$$

que corresponde a:

$$\chi_{v,\alpha/2}^2 < \chi_C^2 < \chi_{v,1-\alpha/2}^2 \quad (4.22)$$

No caso de um teste unilateral, a hipótese não é rejeitada a um nível de significância α , se:

$$\chi_C^2 < \chi_{v,1-\alpha}^2 \quad (4.23)$$

Caso contrário, significa que há problemas no ajustamento. Assim uma análise deve ser feita para verificar as possíveis fontes de erros, tais como: erros grosseiros, erros sistemáticos, MVC não condizente com a precisão das observações, modelo funcional não consistente com as observações ou sistema mal condicionado.

4.3. Consolidação ou Registro

Como já foi dito anteriormente, em todo o processo, seja qual for o projeto, é necessário dispor de toda a nuvem de pontos num mesmo sistema de coordenadas. Durante o trabalho de campo, para cada posição que o equipamento for estacionado para coleta de informações é criado um novo sistema de coordenadas, sendo que a origem do sistema é o eixo do equipamento, ou seja, o eixo de rotação horizontal. Nesse caso o sistema de referência que é criado automaticamente durante o trabalho de campo não tem informação em relação ao Norte (Azimute).

A nuvem de pontos coletada a partir de uma estação de referência estará num mesmo sistema de coordenadas, diferente de todas as demais, inclusive as dos alvos esféricos e planos que foram coletados.

O processo de registro ou consolidação é feito para que todo o levantamento seja referido a um sistema único de coordenadas, que pode ser tanto um sistema topográfico local ou arbitrário.

Seguindo a sequência do trabalho de campo, em essência são escaneados alguns alvos (planos ou esféricos) que ficam fixos durante o levantamento, e foram coletados de duas ou mais estações diferentes. Esses alvos são utilizados para realizar a operação de registro e unificação das coordenadas.

Utilizando esses alvos, é feita uma transformação de corpo rígido, ou seja, uma transformação isogonal no espaço, com fator escala igual a 1.

Essa transformação sempre é feita com referência à alguma estação levantada em campo, por exemplo: Num levantamento com 10 estações é utilizada a estação número 1 como referência; dessa forma todas as demais serão

transladadas e rotacionadas para que fique no mesmo sistema de coordenadas da primeira estação, ou seja, a posição dos alvos planos ou esféricos da estação de referência são considerados fiduciais.

A transformação de corpo rígido consiste em determinar 6 parâmetros: três translações (ΔX , ΔY , ΔZ) e três rotações (ϖX , ϖY , ϖZ).

No espaço, o modelo matemático matricial dessa transformação conforme é dada por:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Onde X , Y , Z , X' , Y' e Z' , não as coordenadas nos dois sistemas envolvidos e R é a matriz de rotação.

A matriz de rotação é dada por:

$$R = R_X R_Y R_Z \quad (4.25)$$

Onde:

$$R_X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varpi_X & \sin \varpi_X \\ 0 & -\sin \varpi_X & \cos \varpi_X \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

$$R_Y = \begin{pmatrix} \cos \varpi_Y & 0 & -\sin \varpi_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varpi_Y & 0 & \cos \varpi_Y \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

$$R_Z = \begin{pmatrix} \cos \varpi_Z & \sin \varpi_Z & 0 \\ -\sin \varpi_Z & \cos \varpi_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

Com ϖ_X , ϖ_Y e ϖ_Z sendo as rotações em torno de seus eixos correspondentes.

Essa transformação pode ser realizada, pois cada estação possui alvos escaneados, sendo que esses alvos também foram escaneados de outras estações, tendo suas coordenadas bem definidas em sistemas de coordenadas distintos. São seis parâmetros a serem determinados: os ângulos de rotação (ϖX , ϖY , ϖZ) e os três parâmetros de translação (ΔX , ΔY , ΔZ). Cada ponto gera 3 equações e,

portanto são necessários, no mínimo, 2 pontos em comum (alvos planos ou esféricos). Com mais pontos se aplica o processo dos mínimos quadrados.

Caso exista a necessidade de se trabalhar num sistema de coordenadas conhecido, é necessário realizar uma nova transformação de coordenadas, utilizando o mesmo modelo matemático.

Esse procedimento é feito para informar as coordenadas dos pontos que foram levantados em campo com a estação total, dos alvos planos que foram escaneados.

Alguns erros podem ocorrer durante o levantamento de campo, que só serão percebidos durante a fase de registro dos dados. Se alguns alvos que seriam imprescindíveis para o processo de registro não foram coletados ou não foram gravados no arquivo gerado, ainda há duas outras maneiras de realizar o registro.

A primeira é feita utilizando ao menos três pontos bem definidos em duas estações distintas, ou seja, é necessário realizar o registro manualmente, o que não é muito aconselhável, pois como se tem milhões de pontos coletados é muito difícil identificar com certeza um e seu homólogo de outra estação. Esse procedimento pode causar grandes erros no processo de registro, portanto deve-se tomar muito cuidado em sua aplicação.

Outra maneira de realizar o registro é usar como referencias entidades bem definidas na nuvem de pontos, de forma que seja possível extrair sua geometria utilizando as ferramentas do programa. São modeladas as entidades (cilindros, caixas, esferas, etc.) que estão bem definidas em duas estações distintas. Com isso, é feita uma simulação de alvos e registram-se as cenas realizando uma transformação de corpo rígido.

Essas duas alternativas são muito demoradas, pois o operador do programa deve manipular a nuvem de pontos para que, ou reconheça pontos em comum em duas estações diferentes ou extraia a geometria a partir da nuvem de pontos e posteriormente faça o registro, com o risco de introduzir erros grosseiros.

4.4. Validação da nuvem de pontos

Devido à existência de interferência em alguns locais e a necessidade de ter uma cobertura completa de toda área, após as essas etapas descritas

anteriormente, é necessário verificar e validar a nuvem de pontos. É uma fase decisiva para a boa qualidade de todo o trabalho. A experiência mostra que não é tão simples eliminar incongruências e incompatibilidade entre dados tomados a partir de diferentes estações.

Quando alguns locais não são escaneados, a nuvem de pontos fica deficitária, e dependendo do local pode ou não prejudicar a modelagem dos dados. Esses locais são chamados de áreas de sombra ou pontos cegos.

A nuvem de pontos coletada em campo deve ser pré-configurada antes do escaneamento. Deve-se saber a priori, qual a finalidade daquelas observações, e assim definir o nível de detalhamento requerido. Na maioria dos sistemas já existentes é possível determinar o espaçamento da malha da nuvem de pontos que será levantada.

A validação é feita apenas pela visualização direta da nuvem de pontos, verificando se:

- Todos os objetos de interesse foram escaneados;
- Não há sombras que prejudiquem a interpretação dos dados;
- A malha está compatível com o nível de detalhamento necessário;
- A consolidação dos dados foi feita com sucesso.

Caso exista alguma inconsistência na nuvem de pontos é necessário avaliar se é preciso voltar a campo para coletar mais alguma cena, ou basta alterar os parâmetros no processo de consolidação para resolver o problema.

A figura 4.5 ilustra uma nuvem de pontos com problemas na etapa de consolidação.

Figura 4.5 – Exemplo de consolidação ruim resultando em desalinhamento e descontinuidade na geometria formada

Verifica-se que o cilindro que constitui uma tubulação industrial não está bem definido na nuvem de pontos mostrada na figura 4.5, podendo-se perceber facilmente diferenças e desalinhamentos da geometria formada. A geometria formada pela a nuvem de pontos não é precisa, pois há um grande desalinhamento da nuvem de pontos que pode ser facilmente detectada.

Nesse caso é necessário refazer tal processo verificando se esse tipo de erro será corrigido. Caso não seja possível a correção, pode-se considerar a hipótese de haver algum problema relacionado à calibração do equipamento.

4.5. Modelagem

Com a nuvem de pontos referida a um único sistema de coordenadas utilizam-se ferramentas de programas específicos que reconheçam a geometria e formas primitivas capazes de gerar os modelos tridimensionais. Esse reconhecimento é feito realizando um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ). As observações realizadas se caracterizam pela presença de erros decorrentes não apenas de falhas humanas, mas também da imperfeição do equipamento e da influência das condições ambientais nas quais se processa a medição (GEMAEL, 1994).

Utilizando o MMQ procura-se gerar um resultado que seja único e que possa representar com a maior confiança a grandeza medida, a partir de dados redundantes inexatos (pelas discrepâncias que apresentam).

Nenhum resultado terá valor científico ou técnico se não estiver acompanhado de sua precisão. Essa precisão pode ser expressa por 1σ (desvio padrão), 2σ , 3σ e etc., portanto o que se consegue no final do ajustamento são valores para as incógnitas e estimativas de sua precisão.

Devido às propriedades estocásticas das observações, observações redundantes, usualmente, não são compatíveis com o modelo funcional. Então, num modelo ou sistema de equações lineares ou linearizadas, redundantes e inconsistentes, as soluções que se obteriam para o conjunto de variáveis a partir de diferentes subsistemas seriam distintas. Nenhum resultado único é possível a partir de observações redundantes, a menos que um critério seja introduzido. Esta situação permite a aplicação do princípio básico do ajustamento pelo MMQ para derivar um único conjunto de estimativas para todas as variáveis do modelo, com certas propriedades (estimativa não tendenciosa, de variância mínima).

4.5.1. Reconhecimento de primitivas

Para aplicações em que a nuvem de pontos represente sólidos geométricos, como por exemplo, levantamentos industriais, onde toda a planta pode ser representada por sólidos (Caixas, cilindros, toro circular, pirâmides, etc.), os programas de modelagem devem ser capazes de gerar sólidos utilizando o MMQ, a partir da nuvem de pontos coletada.

Na prática, o que é feito é separar um pedaço da nuvem de pontos que represente algum sólido, e através de ferramentas dos programas específicos indicarem qual sólido a nuvem de pontos representa.

A figura 4.6 ilustra a modelagem de um componente industrial constituído de três cilindros e dois toros circulares.

Figura 4.6 – Modelagem de componentes industriais através do MMQ

A figura acima mostra de maneira simples, os três passos necessários para que o programa modele pequenos segmentos de nuvem de pontos. No primeiro passo (figura 4.6 A) é feito o processo de segmentação, onde são criadas listas de pontos para cada tipo de figura geométrica. No passo seguinte (figura 4.6 B), utilizam-se ferramentas dos programas para o reconhecimento da geometria da lista de ponto segmentada. O último passo (figura 4.6 C) é dizer quais os limites de cada geometria reconhecida, assim o programa gera os sólidos que compõem a nuvem de pontos.

Os programas devem ser capazes de modelar, a partir da nuvem de pontos, qualquer tipo de geometria. Desse modo é possível modelar qualquer tipo de componente, gerando um modelo fidedigno.

O programa deve estar preparado também para modelar elementos que não possuem uma geometria definida, como, por exemplo, em aplicações para modelagem digital de terrenos, arqueologia e outros. Para tal, são utilizadas ferramentas de triangulação de Delaunay.

Como produto final de modelagem deve-se obter um produto confiável e com todos os elementos necessários modelados.

Figura 4.7 – Diferentes tipos de modelagem

A figura 4.7 mostra dois tipos de modelagem, uma utilizando a triangulação de Delaunay (figura da esquerda) e outra, através da criação de sólidos utilizando o MMQ.

Para mais informações a respeito dos Métodos dos Mínimos Quadrados ver GEMAEL, 1994, VANICEK, 1973 e WOLF, 1997.

PARTE II - APLICAÇÕES

As aplicações que serão citadas e descritas nesta parte da dissertação são fruto de trabalhos realizados ao longo de 4 anos de pesquisas técnicas e científicas na área de levantamentos com equipamentos de varredura laser 3D (*Laser Scanner 3D*).

5. TÚNEIS

O objetivo desse capítulo é avaliar se o equipamento *laser scanner 3D* é viável nesse tipo de aplicação e para isso serão utilizados como fonte de pesquisa, os dados de um projeto realizado no município de Candói no estado do Paraná, onde está localizada a Usina Santa Clara.

Foi levantado um túnel de adução dessa usina de aproximadamente 2 km de extensão. O levantamento de campo foi realizado em aproximadamente 20 horas de trabalho, com aproximadamente 40 milhões de pontos coletados e o trabalho de escritório se concluiu em 40 horas, totalizando 60 horas de trabalho para a entrega do produto final.

5.1. Introdução: problemática, diversos métodos e opções

Neste capítulo descreve-se uma aplicação referente a um tipo de trabalho muito comum: levantar dados de estruturas (no exemplo concreto, túneis) já construídas para detectar mudanças em sua geometria ou alterações durante sua construção, com relação ao que foi projetado.

Os danos causados na superfície do túnel constituem uma permanente preocupação dos donos ou responsáveis pelas obras, já que este fenômeno pode significar grandes perdas, podendo gerar conflitos entre a contratada e contratante em alguns casos. Esses danos estão relacionados com as irregularidades na superfície das secções transversais dos túneis chamadas de *overbreak* (excesso) e *underbreak* (deficiência) que são ocasionados devido ao uso de explosivos no desmonte das rochas (Figura 5.1).

O *underbreak* e *overbreak* são indesejáveis, pois a sua reparação é demorada e cara, por isso é necessária uma medição adequada para minimizá-los e conseqüentemente ter o controle do total escavado e o do concreto usado para corrigir o *overbreak*.

O *overbreak* é definido como pedaço de rocha removida além do necessário considerando o gabarito máximo de escavação, enquanto que o *underbreak* é porção de rocha indesejável que restou durante o processo de escavação, considerando o gabarito mínimo (FRANKLIN et al., 1989).

Figura 5.1 – O underbreak e overbreak

Diferentes métodos e instrumentos vêm sendo utilizados durante anos para adquirir dados para a avaliação de túneis, alguns com mais vantagens que outros.

Na maioria das vezes, o que é suficiente para avaliar a estrutura de um túnel são secções transversais ao longo de sua construção. Para gerar essas secções podem ser utilizados vários métodos de levantamento de dados que podem ser divididos em duas categorias; manual e automática, onde o método manual requer o controle de uma pessoa durante todo o processo de levantamento enquanto que o automático necessita de apenas uma supervisão (CLARKE, 1996).

A tabela 5.1 detalha alguns equipamentos que são utilizados em levantamentos de túneis, inclusive o laser scanner 3D.

Tabela 5.1 - Métodos utilizados em levantamentos subterrâneos
Fonte: CLARKE, 1996.

Método	Equipamentos	Prós e contras
Manual	Teodolito MED Estação Total	Pró: Alta precisão, a coleta de dados e o processamento podem ser feitos em campo.
		Contra: grande número e demoradas observações, gerando um tempo grande para a coleta de dados.
	Taqueômetro ótico	Pró: barato, rápido e o equipamento pode ser usado em locais perigosos.
		Contra: precisão limitada, trabalho intensivo, o objeto necessita estar iluminado e gravação manual.
	Taqueômetro laser	Pró: rápido e fácil de utilizar, precisão aceitável para muitas aplicações e com baixo custo.
		Contra: Operação e gravação manual, restrito a classificação laser de segurança.
	Fotogrametria terrestre	Pró: alta precisão, rápida aquisição da fotografia sendo que esta oferece informação que fica armazenada podendo coletar informações adicionais a qualquer momento
		Contra: Equipamentos caros, o local necessita de boa iluminação, pessoal altamente qualificado.
	<i>Light sectioning</i>	Pró: Alta precisão, boa identificação da secção transversal.
		Contra: longo tempo de exposição do laser, operador altamente qualificado.
Automático	Teodolitos automáticos	Pró: Alta precisão e operação automática
		Contra: baixa velocidade de operação, equipamento caro, configuração do equipamento demorado.
	Refletor MED	Pró: operação simples, uma boa velocidade de coleta de dados, gravação automática de dados.
		Contra: caro e não preciso para todas as aplicações.
	Triangulação ótica	Pró: preciso, rápido, gravação automática e portátil.
		Contra: problemas de sombras e deve estar de acordo com regulamentação de segurança laser.
	Laser Scanner 3D	Pró: alta precisão, rápida taxa de gravação, coleta informações de todo o objeto, não apenas de secções isoladas.
		Contra: equipamento caro, operador altamente qualificado, deve-se trabalhar conjuntamente com uma estação total (alguns equipamentos), deve estar de acordo com regulamentação de segurança laser.

Todos esses equipamentos foram e são utilizados para levantamentos em túneis, para extração de secções transversais ao longo de seu eixo, com a finalidade de avaliar sua construção. Dentre os equipamentos citados acima, o método mais utilizado atualmente é o que emprega uma estação total. Recentemente, com o

advento do laser scanner 3D, em alguns casos passou-se a utilizar esse tipo de equipamentos para esses projetos devido a dois fatores:

- A velocidade na coleta de informações, fazendo com que o trabalho de levantamento de campo seja rápido;
- A sua alta precisão nominal, que pode variar de 3 a 6 mm.

5.2. Levantamento de campo

A equipe envolvida era composta de 4 pessoas, sendo um engenheiro responsável, e três técnicos agrimensores.

Foram utilizados os seguintes materiais:

- *Laser Scanner 3D* modelo GS100 da Trimble/Mensi;
- Uma estação total modelo Trimble 3305;
- Um computador portátil;
- Quatro alvos planos;
- Oito alvos esféricos;
- Programa para o processamento da nuvem de pontos (RealWorks Survey).

Figura 5.2 – Fotografia tirada pelo equipamento na entrada do túnel

Figura 5.3 – Nuvem de pontos na entrada do túnel

Para que a nuvem de pontos estivesse referenciada a um sistema de coordenadas conhecido, no início do levantamento, como mostram as figuras 5.2 e 5.3, posicionou-se vários alvos planos que foram escaneados com o equipamento laser scanner 3D e levantados com uma estação total.

Com a estação total estacionada em um ponto em que fosse possível visar três marcos de coordenadas conhecidas e pelo menos três alvos planos, foram feitas observações topográficas para determinar as coordenadas dos alvos no sistema de projeto do túnel.

Com um sistema de coordenadas já definido, a geração da nuvem de pontos foi realizada de acordo com o seguinte procedimento:

Na primeira estação (fora do túnel) foram escaneados os alvos planos que dariam referência topográfica a todo o levantamento e a entrada do túnel, como mostra a figura 5.2. A segunda estação (dentro do túnel) foi posicionada no início do túnel onde seria possível escanear pelo menos três alvos planos que foram coletados

na primeira estação. Nessa posição fez-se um escaneamento completo, ou seja, uma visada de 360° na horizontal e 60° na vertical, coletando o máximo de informação possível. Para todo o túnel foi utilizada uma malha de 10 mm em lances de 50 metros, com a finalidade de não perder nenhum tipo de informação durante o levantamento de campo.

Para que as próximas estações estivessem no mesmo referencial de coordenadas topográficas, posicionaram-se alguns alvos esféricos à vante da estação de trabalho, que foram escaneados e permaneceram fixos até a finalização da estação seguinte, ou seja, esses alvos serviram para dar referência à próxima estação.

Esse procedimento foi realizado sucessivamente, com um espaçamento aproximado de 50 metros entre as estações, até a finalização de todo o trabalho de campo, ou seja, um total de 40 estações até o final do túnel.

Nota-se que a referência topográfica só foi realizada no início do levantamento. Ao final deste capítulo será avaliada a precisão encontrada com esse tipo de procedimento, verificando se seria necessário um controle topográfico maior durante todo o trabalho de campo, ou mesmo um fechamento na saída do túnel.

Ao final do trabalho de levantamento de campo, obteve-se um arquivo de um pouco mais de 40 milhões de pontos ocupando um espaço de 1.2 Gb no disco rígido.

5.3. Processamento de escritório

O trabalho de escritório foi desenvolvido por uma equipe de três pessoas, sendo um engenheiro responsável (o autor do presente trabalho) e dois desenhistas CAD.

A primeira etapa no processamento dos dados em escritório é a consolidação dos dados de campo, fazendo com que toda a nuvem de pontos esteja num sistema de coordenadas único, e preferencialmente que este sistema seja um sistema topográfico local, definido pelo projeto da obra.

Para esse projeto, primeiramente se fez a consolidação de toda a nuvem de pontos sem utilizar como referência o sistema topográfico local.

Quando se utiliza uma das estações como sendo a referência, todas as outras estações são transformadas para o sistema de coordenadas dessa, através de uma

transformação de corpo rígido no espaço, conforme explicado anteriormente. Esse procedimento é realizado apenas para facilitar o processo de consolidação, não tendo nenhuma característica obrigatória em sua execução, podendo ser feita de outras maneiras diferentes, mas sempre com o mesmo princípio de operação.

Depois de toda a nuvem de pontos estar num sistema de coordenadas único, a próxima etapa foi transformar a nuvem de pontos para o sistema de projeto, ou seja, o sistema de coordenadas da construção do túnel.

Para tal operação utilizou-se ferramentas do programa para realizar uma nova transformação de corpo rígido no espaço, fazendo com que toda a nuvem de pontos estivesse no sistema de coordenadas de projeto, sendo possível a geração das secções e uma posterior avaliação da escavação desse túnel, verificando se foi realizado dentro das expectativas ou não.

A próxima etapa foi a inserção manual, através de um arquivo com extensão DXF (AutoCad), do eixo do túnel. Em posse de todas as coordenadas no eixo de projeto do túnel, criou-se um arquivo de CAD em formato 2D. Esse arquivo foi importado para o programa de processamento da nuvem de pontos.

O operador indicou, diretamente sobre a nuvem de pontos, o início e o fim do túnel, e o programa utiliza o arquivo 2D e a nuvem de pontos para transformar o eixo 2D em 3D, como mostra a figura 5.4.

Figura 5.4 – Nuvem de pontos de um trecho do túnel e seu eixo (amarelo)

Esse procedimento foi feito de forma semi-automática, sendo necessária uma moderada intervenção do operador.

Com o eixo já determinado, a próxima etapa foi a construção das secções transversais. Com ferramentas específicas para tal procedimento, o programa, utilizou como referência o eixo do túnel para gerar as secções através da nuvem de pontos.

Figura 5.5 – Ferramentas do programa de extração de secções através da nuvem de pontos

A figura 5.5 ilustra a ferramenta de extração automática de secções. Esse procedimento foi feito de forma automática, ou seja, sem interferência do operador, pois o programa reconhece a informação referente ao eixo do túnel, que foi inserida anteriormente e gera as secções espaçadas de acordo com o solicitado.

Na parte inferior da figura 5.5, aparece uma pequena parte da nuvem de pontos do túnel com linhas, onde cada linha representa um corte no qual será gerada uma secção. Na parte superior da mesma figura aparece, em detalhes, uma secção extraída da nuvem de pontos.

O operador deve indicar o ponto inicial e o espaçamento das secções transversais para que o programa possa extrair essas informações automaticamente.

Foi definido um intervalo de 10 metros entre as secções. As figuras 5.6 e 5.7 mostram as secções geradas sobre a nuvem de pontos ao longo de um trecho do túnel de adução.

Figura 5.6 – Secções transversais (em amarelo) sobrepostas com a nuvem de pontos, na região próxima da embocadura (E)

Figura 5.7 – Detalhes das Secções transversais (em amarelo) sobrepostas com a nuvem de pontos e o eixo do túnel (vermelho)

Para consolidar a criação das secções, o programa gera sobre a nuvem de pontos as diversas polilinhas que representam graficamente as secções geradas. Em alguns casos, quando existe uma descontinuidade da nuvem de pontos, a polilinha gerada pode apresentar falhas, sendo necessária uma edição para que cada uma dessas linhas fosse fechada, formando um polígono. A extensão de 2 km resultou em 200 secções.

Os programas desenvolvidos para trabalhar com as nuvens de pontos provenientes de um levantamento executado com o equipamento *laser scanner 3D*, são capazes de gerar as informações necessárias para diferentes projetos e exportar para programas específicos para cada tipo de aplicação.

A figura 5.8 mostra com detalhes as secções geradas do túnel levantado.

Figura 5.8 – Detalhes das Secções transversais em formato CAD.

Para continuar o processo, as secções extraídas da nuvem de pontos foram exportadas para um sistema CAD, em formato 2D e 3D. O CAD escolhido para trabalhar com os dados exportados foi o AutoCad 2000.

Trabalhando num ambiente 2D, com base nos dados de projeto fornecido pela contratante, foi criada a secção “ideal”, ou seja, a secção de projeto. Utilizando as secções criadas a partir da nuvem de pontos foi feita a comparação de cada uma com a secção de projeto. Isso está exemplificado na figura 5.9.

Figura 5.9 – Secções transversais em sistema CAD 2D, comparando o projeto com o real escaneado

Na figura acima, a linha em vermelho representa a secção ideal e a linha em preto representa a secção extraída sobre a nuvem de pontos na posição desejada.

A figura 5.10 mostra, com detalhes, o produto final em formato CAD com as secções levantadas, a secção ideal e a tabela de volume do túnel.

Figura 5.10 – Secções transversais em sistema CAD 2D, comparando o projeto com o real escaneado

Com esses dados extraídos e utilizando ferramentas do CAD foi possível verificar o volume escavado e a quantidade de *overbreak* e *underbreak* ao longo do túnel, verificando a necessidade de algum ajuste no túnel, pois dependendo da magnitude desses fatores, poderá haver alguma alteração significativa de vazão de água dentro do túnel, alterando a produção de energia da usina.

5.4. Avaliação do método

Com o trabalho realizado pode-se verificar que houve um ganho considerável já na primeira etapa, o trabalho de campo. O trabalho de escritório também foi realizado com grande rapidez, gerando um produto final confiável e consistente.

Utilizando outros métodos de levantamento, por exemplo, uma estação total, o tempo gasto no trabalho de campo, pela experiência do autor com esse tipo de tarefa, seria superior a 4 dias, pois mesmo sendo método eficiente, ainda é muito demorado quando comparados com o trabalho usando *laser scanner 3D*.

Uma grande vantagem, talvez a maior delas, é que a qualquer momento se podem obter novas informações diretamente da nuvem de pontos (semelhante a fotografias), pois todo o interior do túnel foi levantado, o que não acontece utilizando outras técnicas que coletam informações somente nos locais definidos a priori, por exemplo, em secções especificadas e com certo espaçamento.

Comparando o projeto do eixo do túnel e o eixo do túnel definido sobre a nuvem de pontos (calculado), obteve-se uma discrepância máxima de 10 mm. Essa comparação foi realizada utilizando as coordenadas da entrada e saída do túnel do eixo de projeto e o levantado. Resta saber se esse desvio foi gerado na construção e escavação do túnel ou no levantamento realizado com o *laser scanner 3D*. Como não se obteve os dados do projeto e construção do túnel, não foi possível avaliar essa situação. No entanto a diferença é suficientemente pequena para que haja preocupações relevantes sobre a precisão do levantamento.

No cálculo da volumetria de todo o túnel, utilizando métodos convencionais o cálculo seria feito através de formulações matemáticas simplificadas através de secções equiespaçadas, gerando um volume cuja aproximação (erro) depende do espaçamento das secções. No caso do *laser scanner 3D*, a representação é muito

mais fidedigna, pois as secções podem ser geradas com espaçamento tão pequenos quanto se queira, proporcionando uma aproximação melhor e mais confiável.

Outra opção é utilizar a triangulação de Delaunay para gerar um sólido a partir da nuvem de pontos. Dessa forma seria possível determinar o volume do túnel com um nível de precisão maior, pois seria calculado o volume diretamente sobre o modelo 3D gerado e não através de formulações matemáticas aproximadas.

A figura 5.11 mostra um trecho do túnel modelado através da triangulação de Delaunay.

Figura 5.11 – Triangulação de Delaunay aplicada sobre a nuvem de pontos.

No detalhe da figura 5.10 é possível visualizar um detalhe que poderia ser encoberto se o levantamento fosse realizado de maneira tradicional, utilizando uma estação total.

Esse método tem a vantagem de informar com mais precisão o cálculo do volume, pois toda a geometria do túnel pode ser representada e utilizada na obtenção do volume. Em contrapartida é um método que gera arquivos muito grandes e são lentos computacionalmente.

Uma questão interessante que se levanta é a da propagação de erros, relacionada também com a precisão do método, questão levantada no próximo capítulo. O problema resume-se no seguinte: parte de pontos de coordenada conhecida antes da embocadura do túnel e deve-se fechar o levantamento após a

saída do túnel. Essas coordenadas podem ser colocadas como injunção no sistema, isto é, são invariáveis. Os erros ocorridos no processo de levantamento interno do túnel devem controlados e, se aceitáveis, podem ser distribuídos. Esses erros (nas três coordenadas) podem ser avaliados através da comparação entre as coordenadas fornecidas dos pontos na saída do túnel (injunções) com essas mesmas coordenadas calculadas pelo transporte ao longo do túnel, num processo que guarda certa analogia com poligonais lineares abertas ou apoiadas.

Descendo ao detalhe, em cada estação visam-se pontos a ré e a vante (alvos e pontos do objeto). Na primeira visam-se pontos fora do túnel a ré, com coordenadas conhecidas. Seus pontos de vante serão visados a partir da estação seguinte, mas como pontos de ré. As coordenadas das estações são determinadas pelo programa, em função das distâncias e ângulos medidos e existe um erro. Esse erro vai-se refletir diretamente nas coordenadas dos pontos e estações seguintes. Assim existe uma propagação de erros.

Seria interessante, em trabalhos futuros, encontrar formas de avaliar esses erros e sua propagação. Uma forma seria realizar um teste em que fossem determinadas as coordenadas das estações, ocupando-as com uma estação total. Ou seja, levantando uma poligonal de alta precisão ao longo do túnel. Assim se poderia verificar o resíduo em cada estação. Caso se constate erros acima do tolerável, esse procedimento (poligonal de precisão como apoio e injunção) poderia fazer parte de uma metodologia para levantamentos precisos. Seria necessário verificar a forma de incluir essas injunções no programa, que não é aberto para alterações e não fornece essa possibilidade.

PARTE III – TESTES

6. TESTES DE PRECISÃO E QUALIDADE

Para verificar a precisão do equipamento GS200 da Trimble, usado no presente trabalho, foram realizados quatro testes, todos desenvolvidos nos pilares da raia olímpica localizados na Universidade de São Paulo (Figura 6.1)

Figura 6.1 – Disposição dos pilares utilizados nos testes.
Fonte (Google Earth, 2006)

O principal objetivo dos testes foi verificar se suas especificações de catálogo estão coerentes e determinar os erros encontrados em simulações.

A precisão nominal (desvio padrão) do equipamento é apresentada na tabela 6.1 em conformidade com o catálogo do fabricante.

Tabela 6.1: Precisão nominal do equipamento GS200
 FONTE: Trimble (2006)

Alcance (metros)	5	25	50	100	150	200
Desvio Padrão (milímetros)	1,4	1,4	1,4	2,5	3,6	6,5
Albedo ¹ – 99%						

A seguir, na figura 6.2, apresenta-se de forma gráfica os valores da tabela 6.1.

Figura 6.2 – Precisão nominal do equipamento utilizado.

6.1. Primeiro Teste: Precisão em distância

Esse teste foi realizado para verificar a precisão linear do equipamento, ou seja, numa situação sem interferência de outros fatores, como por exemplo, o servomotor que faz a rotação do equipamento.

¹ Albedo é uma medida da reflectividade de um corpo ou de uma superfície. É a razão entre a radiação eletromagnética refletida e a quantidade incidente.

O equipamento foi instalado sobre o P0 na raia olímpica e alvos planos foram instalados sobre bases nivelantes no pilares P1A, P1, P2A e P2, conforme o esquema da figura 6.3

Figura 6.3 – Pilares alinhados da raia olímpica – USP.

A partir do P0 foi realizado o escaneamento dos alvos planos. Com isso foi possível determinar as distâncias até os demais pilares.

Foram utilizados para comparação os dados de Netto (1997), que determinou e ajustou as coordenadas de todos os pilares com o medidor eletrônico de distâncias modelo DI-2002 e após um ajuste pelo processo dos mínimos quadrados, foram determinadas as distâncias oficiais dessa base, que constam na coluna DI-2002 da tabela 6.2.

Os pilares, com os alvos foram escaneados e a nuvem de pontos foi transferida para o programa que calculou as distâncias, que figuram na coluna Laser Scanner dessa mesma tabela

A comparação pode ser vista na tabela 6.2

Tabela 6.2: Comparação dos dados – TESTE 1.

PILARES	DI-2002	Laser Scanner	Diferenças
P0 – P1A	4.9670 m	4.9642 m	-0.0028 m
P0 – P1	19.6189 m	19.6209 m	0.0020 m
P0 – P2A	29.8084 m	29.8088 m	0.0004 m
P0 – P2	68.1662 m	68.1629 m	-0.0033 m

Tabela 6.3: Resultados estatísticos – TESTE 1

ERRO MÉDIO	-0.0009 m
ERRO MÁXIMO	0.0033 m
DESVIO PADRÃO	0.0026 m

Pode-se concluir das diferenças da tabela 6.2 e do resumo da tabela 6.3 que os resultados são bons, com desvio padrão de 2,6 mm e erro máximo de 3,3 mm a 68 metros, o que é, um pouco superior ao preconizado, mas que pode ser suficiente para diversas aplicações, considerando o valor de catálogo o desvio padrão deveria ser em torno de 1,9 milímetros.

Esse erro maior do que o previsto no catálogo pode ter ocorrido em função de condições atmosféricas. Sugere-se em trabalhos futuros, controlar essas condições e fazer testes em dias diferentes do ano (diferentes condições atmosféricas).

6.2. Segundo Teste: Condições de Trabalho

O teste 2 foi executado com a finalidade de verificar em situações normais a precisão do equipamento, isto é, uma situação em que os pontos medidos podem estar alinhados e o ponto de medição está fora desse alinhamento, mas com uma boa geometria e exigindo uma rotação ampla do equipamento, como exemplificado pela figura 6.4.

Figura 6.4: Esquema gráfico do levantamento do Teste 2.

Para esse teste, o equipamento foi instalado fora do alinhamento dos pilares (posição E), como mostram as figuras 6.4 e 6.5, onde se vê o equipamento e pilares escaneados

Figura 6.5 – Realização do segundo teste – USP

Dessa forma, foi feito o escaneamento dos alvos planos instalados sobre os mesmos pilares do teste 1, obtendo-se os dados da tabela comparativa 6.4, sendo

que as distâncias são fornecidas pelo programa, mediante solicitação do operador, clicando sobre os pontos (alvos) de interesse.

Tabela 6.4: Comparação dos dados – TESTE 2.

PILARES	DI-2002	Laser Scanner	Diferenças
P0 – P1A	4.9670 m	4.9639 m	-0.0031 m
P0 – P1	19.6189 m	19.6191 m	0.0002 m
P0 – P2A	29.8084 m	29.7997 m	-0.0087 m
P0 – P2	68.1662 m	68.1335 m	-0.0327 m

Nessa situação o erro máximo foi de 3,3 cm e o desvio padrão foi de 1,5 cm. A observação realizada sobre o P2 apresentou o maior erro nesse teste, sendo que o equipamento estava estacionado a 44,442 metros de distância (E-P2). Segundo as informações de catálogo, para essa distância, o erro padrão seria de aproximadamente 1,4 mm.

Essa discrepância pode-se caracterizar como erro grosseiro, já que apenas uma observação apresenta grandes desvios. Se eliminarmos a última observação, o erro máximo fica na casa de 8 mm e o desvio padrão de 4 mm. Seria necessário verificar o porquê desse erro grosseiro e também das demais discrepâncias.

Uma conclusão preliminar é que, em geral, os valores obtidos não estão dentro das especificações do catálogo. Também se conclui pela necessidade da aferição desse tipo de equipamento antes de campanhas de maiores responsabilidades.

6.3. Terceiro Teste: Transporte de coordenadas e verificação da influência do tipo de alvo

Esse teste teve duas finalidades: a) verificar possíveis erros no transporte de coordenadas de estações de escaneamento; b) verificar possíveis diferenças utilizando alvos fixos planos ou alvos esféricos.

Em primeiro lugar, foram feitas duas experiências de forma idêntica, variando apenas o tipo de alvo fixo. No primeiro caso foram utilizados alvos esféricos e no segundo alvos planos.

Em segundo lugar foi feita a verificação da precisão alcançada ao longo de caminhamentos em obras de engenharia, como em caso de túneis.

Em ambos os testes, o equipamento foi estacionado numa posição E na qual se poderia escanear cinco alvos planos estacionados sobre os pilares P0, P1A, P1, P2A e P2 de acordo com a figura 6.6. Essa posição E foi variando de E1 a E4, como se faz em caminhamentos.

Figura 6.6 – Esquema gráfico do levantamento.

Desse ponto fez-se o escaneamento dos alvos planos e esféricos que foram utilizados como referência para a próxima estação de escaneamento, por exemplo, E2.

Com o equipamento instalado na próxima posição (E2) fez-se o escaneamento dos alvos fixos já levantados da estação anterior e assim consecutivamente até o pilar 3C, utilizando sempre pontos comuns entre uma estação e seus vizinhos. Todas as visadas estão indicadas na figura 6.6.

Dessa forma, foi possível determinar a precisão alcançada, ao final do trajeto, pois o levantamento foi iniciado visando pontos (pilares) de coordenadas conhecidas e finalizado em outros de coordenadas também conhecidas.

Para efeito de cálculo e resultados os cinco pilares iniciais do levantamento foram considerados como injunções no ajustamento, deixando o ultimo pilar como ponto de verificação. Essa situação simula o que ocorre no levantamento de um túnel: parte-se de pontos com coordenadas conhecidas antes do emboque e deve-se fechar o levantamento a céu aberto, do outro lado do túnel, em pontos de coordenadas conhecidas e referidas ao mesmo sistema em que estão os próximos à entrada.

Os resultados obtidos foram:

Tabela 6.5: Resultados estatísticos – Alvos Planos.

	X (metros)	Y(metros)	Z(metros)
P3C – Oficial	150146,0565	249922,8266	721,0044
P3C - Encontrado	150146,0695	249922,8449	720,8837
Diferenças	0,0130	0,0183	-0,1207

Tabela 6.6: Resultados estatísticos – Alvos Esféricos.

	X (metros)	Y(metros)	Z(metros)
P3C - Oficial	150146,0565	249922,8266	721,0044
P3C - Encontrado	150146,0410	249922,8220	720,9550
Diferenças	-0,0155	-0,0046	-0,0494

Do exame das duas tabelas e da comparação entre elas conclui-se:

- Utilizando alvos esféricos obtiveram-se resultados sensivelmente melhores em Y e Z e resultados similares em X;
- Utilizando alvos planos obteve-se um erro de 0,61mm/metro, já no caso dos alvos esféricos obteve-se um erro de 0,26mm/metro. Isso permite simular o que ocorreria numa obra de determinada extensão. Por exemplo, num túnel de 1 km, o erro seria de 0,26 m (1:4000), o que pode ser aceitável ou não.
- A geometria dos pontos de injunção (pontos alinhados, o que não ocorre no emboque de túneis) pode ter degenerado as matrizes do ajustamento. Sugere-se realizar testes com melhor geometria e verificar os novos obtidos;

- d) Em levantamentos desse tipo, recomenda-se o uso de uma estação total para controlar os desvios durante o levantamento.

6.4. Quarto Teste: Precisão Inversa

O quarto teste foi realizado para verificar a precisão alcançada nas coordenadas da estação de escaneamento, já que, num esquema de transporte, como indicado na figura 6.6, a precisão as coordenadas desta estação influi diretamente na precisão das coordenadas dos pontos de ligação. Para isso utilizou-se o método de estação livre, ou seja, a partir de visadas a pelo menos 3 pontos com coordenadas conhecidas.

O equipamento Laser Scanner foi estacionado numa posição frontal aos pilares P0, P1A, P1, P2A e P2 e alvos planos foram instalados sobre os mesmos e escaneados conforme o esquema da figura 6.4. A partir das coordenadas oficiais dos pilares e as distâncias medidas dos pilares ao equipamento foi possível determinar as coordenadas da estação de levantamento (estação livre) utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (Método Paramétrico) e estimar a precisão das coordenadas dessa estação.

A modelagem matemática, utilizando o MMQ, encontra-se no Anexo A. As coordenadas utilizadas figuram na tabela 6.7, o resultado das distâncias encontra-se na tabela 6.8 e as coordenadas resultantes, com suas precisões, são mostradas na tabela 6.9.

Tabela 6.7: Coordenadas Topográficas dos Pilares Utilizados.

Pilares	X	Y
P0	149982,6541	250009,1671
P1A	149987,0479	250006,8428
P1	150000,0000	250000,0000
P2A	150009,0136	249995,2399
P2	150042,9264	249977,3238

Tabela 6.8: Distâncias dos Pilares à Estação de escaneamento

DISTÂNCIA 3D (Laser Scanner)	
P0 – E	31,827
P1A – E	28,340
P1 – E	21,728
P2A – E	22,255
P2 – E	49,443

Tabela 6.9: Coordenadas Ajustadas

Estação E (Laser Scanner)		
E	X = 149993,528 m	± 0,00145 m
	Y = 249979,256 m	± 0,00106 m

Percebe-se que as coordenadas ajustadas apresentam boas precisões, ou seja, em torno de 1 milímetro.

A partir dos mesmos dados foi feito um ajustamento incluindo a coordenada Z. O resultado foi bastante insatisfatório, talvez devido aos mesmos problemas que levaram a grandes erros em Z no terceiro teste. Esse erro também pode ter ocorrido devido ao fato da coordenada Z ser muito semelhante para o topo dos pilares (e, portanto para os alvos).

Tendo em conta os resultados e as conclusões parciais de cada teste, pode-se dizer, que uma maneira geral, que os testes de precisão merecem um estudo específico e bastante detalhado, tarefa que fica para trabalhos futuros.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente dissertação apresentou um breve descritivo da evolução dos equipamentos topográficos até o desenvolvimento do *Laser Scanner* 3D, mostrando a seguir os princípios de coleta de informação e suas características físicas e matemáticas.

Percebe-se que a grande maioria dos sistemas de escaneamento utiliza o tempo de percurso do pulso laser para medir as distâncias. Isso se deve à boa precisão alcançada em distâncias maiores, e a relativa rapidez de coleta de pontos. Mas, pela evolução da tecnologia, acredita-se que esse tipo de método será substituído pela comparação de fase, que hoje é limitado pela distância de coleta com precisão aceitável (em torno de 25 metros). Essa é uma tendência das empresas que desenvolvem esse tipo de equipamento.

De acordo com o apresentado pôde-se concluir que esse tipo de equipamento pode ser caracterizado pela boa precisão, alta densidade de pontos levantados, pouco tempo necessário para adquirir uma enorme quantidade de dados e alta automação para o processamento dos dados.

Procurou-se exemplificar os métodos de coleta e relatar os tipos de equipamento existentes no mercado para que os usuários dessa tecnologia possam discernir qual o equipamento mais adequado à sua aplicação, com base nas informações de precisão, alcance e qualidade da nuvem de pontos (menor nível de ruído). Utilizando equipamentos inapropriados, o desenvolvimento do projeto pode ser comprometido, não alcançando suas expectativas, quanto à precisão e automação do processo de escritório.

Para o eficiente uso dessa tecnologia, é necessário que o usuário esteja familiarizado com os princípios básicos de operação, funcionamento do equipamento e limitação da tecnologia (incluindo as estações totais que em alguns casos devem ser utilizadas). Dessa forma, essas fases foram descritas no presente trabalho, no qual se inclui também uma metodologia que pode ser útil para diversos usuários, sendo que, talvez, alguns passos mostrados devam ser adaptados para outras aplicações não relatadas nesse trabalho.

Essa metodologia foi desenvolvida ao longo da presente pesquisa e aplicada a mais de 15 projetos ao longo de 3 anos, apresentando bons resultados. Pode ser, portanto considerada como validada.

Em projeto de túneis o método de trabalho mostrou-se bem eficaz, tendo em vista a rapidez na coleta de campo e no processamento dos dados. Esse método empregado poderá ser utilizado para outros levantamentos semelhantes, já que os resultados obtidos foram satisfatórios. Consegui-se um levantamento de campo rápido e preciso e no escritório o processo de extração de informação foi feito com alto grau de automação.

Para esse tipo de aplicação, esse método empregado mostrou-se altamente confiável, pois todas as diferenças para com o projeto (underbreak e overbreak) existentes ao longo de todo o túnel puderam ser medidas e avaliadas.

Outro ponto importante foi a precisão alcançada. Verificou-se, neste caso, uma diferença máxima de 10 mm entre as coordenadas do eixo do túnel de projeto e do levantado, ainda que a temática precisão necessite ser mais estudada, como ficou claro no capítulo correspondente.

De maneira geral pode-se concluir que nesse tipo de aplicação foi possível verificar a grande capacidade de automatizar esse tipo de levantamento, principalmente a etapa de escritório. É possível realizar o trabalho de campo com menos horas de trabalho, minimizando custos e mesmo assim tendo melhores resultados do que em métodos utilizados no passado. Esse capítulo pode ser útil, não só para túneis, mas para diversos outros projetos em engenharia, sendo necessária uma adaptação para atender as necessidades de cada caso.

É importante destacar que o bom desenvolvimento desse projeto, que foi pioneiro no Brasil, só foi possível pela adequação da metodologia de trabalho e da correta escolha do tipo de equipamento, o que valoriza a contribuição do presente trabalho.

Na área de mapeamento de plantas industriais, esse tipo de levantamento vem sendo utilizado em grande escala no mercado brasileiro com segurança e economia, com satisfação dos usuários. A diferença, para com o caso dos túneis, é que o desenvolvimento da obra não é mais linear (uma dimensão altamente predominante e de grande extensão), mas concentra-se numa área menor e o objeto é de alta complexidade.

Aplicações em outras áreas vêm ocorrendo (levantamento de monumentos e sítios arqueológicos) e podem ser ampliadas. Logicamente cada aplicação tem suas condições e características que podem exigir estudos específicos.

Os testes realizados na raia olímpica da USP tiveram a finalidade de determinar a precisão alcançada em certas simulações de campo e pode-se concluir que:

- a) Nos testes realizados, em muitos casos não se atingiu a especificação do manual e será necessário identificar as possíveis fontes de erros
- b) O estudo da precisão merece um trabalho específico, com mais testes, já não são apenas medidas distâncias para quantificá-las. Existem outros fatores que devem ser estudados, como por exemplo, as condições atmosféricas e seus componentes eletro-mecânicos (servomotores);
- c) Os equipamentos necessitam de aferição periódica, em uma base calibrada, como acontecem com estações totais, níveis, distanciômetros e etc.;
- d) É necessário definir uma metodologia de aferição com uma base de campo adequada.

O presente trabalho pode ser considerado como uma primeira contribuição ao tema, já que muitos aspectos podem ser explorados.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. B.; **Fotogrametria.** – 1988

BOEHLER, W.; BORDAS VICENT, M.; MARBS, A.; **Investigating Laser Scanner Accuracy.** XIX CIPA Symposium at Antalya, Turkia, 30/07 a 04/10 de 2003.
Atualização para apresentação na Web – Abril de 2004.

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.

BALTSAVIAS, E. P. **Airbone Laser Scanning: Basic Relations and Formulas.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999.

BRANDALIZE, M. C. B.; PHILIPPS J.: **Padrões de classificação de equipamentos laser utilizados em levantamentos terrestres e aéreos.** COBRAC 2002 · Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário · UFSC Florianópolis · 6 a 10 de Outubro 2002

BRANDALIZE, M. C. B.; PHILIPS, J. W.: **Laseres nos Levantamentos Terrestres.** Revista InfoGeo, Ano 4, No. 22, Jan/Fev 2002, p. 52-55.

CLARK, J.; ROBSON, S.: **Accuracy of measurement made with a cyrax 2500 laser scanner against surfaces of know colour.** Survey Review, 37, 294 (Outubro de 2004).

CLARKE, T. A.: **A review of tunnel profiling methods.** International Review Paper, 1996.

COSTA, M. F.; SILVA, A. S.; **Determinação de coordenadas planas: uma metodologia de cálculos pelo processo de ressecção linear.** VII CONEA, Salvador, Anais, (1996) p.130-135.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R.: **Sistema Laser Scanner: Conceitos e princípios de funcionamento (edição revisada)** – Curitiba, UFPR, 2003.

FARO: Disponível em <http://www.faro.com>, Acesso em 10/01/2006.

FRANKLIN, J. A.; IBARRA, J.; MAERZ, N. H.: **Blast overbreak measurement by light sectioning**. International Journal of Mining and Geological Engineering, 1989, 7, 232 – 331.

GEMAEL, C.; **Introdução ao ajustamento de observações**. Curitiba. Ed. UFPR, 1994.

GORDON, S.; LICHTI, D.; STEWART, M.: **Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements**, The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Proceedings. Orange, California, USA, p. 23-32, 2001.

GORDON, S.; LICHTI, D.; **Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Hering Recording**. FIG Working Week. Grécia, 2004.

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

KASPAR, M.; KREMEN, T.; TEJKAL, M.; POSPISIL, J.: **Laser Scanning in civil engineering and land surveying**. 2004.

KERSTEN, TH.; MECHELKE, C.; PARDO A. C.; STERNBERG. H.: **Terrestrial Laser Scanning system Mensi GS100/GS200 – Accuracy tests, experiences and projects at Hamburg University of applied sciences**. IAPRS, VOL XXXIV. Alemanha 2004.

LADEIRA, C. R.: **Medida Eletrônica de Distâncias**. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP. Janeiro de 1977

LEINWOLL, S.: **Understanding Lasers and Masers**. Tradução Daniel Santano e Leon. MADRI 1969.

LEICA: Disponível em <http://www.leica-geosystems.com>, Acesso em 10/01/2006.

LENGYEL, B. A.: **Introduciton to Laser Physics**. 1967

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.

MDL Laser System: Disponível em <http://www.mld.co.uk>, Acesso em 10/01/2006.

NETTO, N. P.; **Calibração de medidores eletrônicos de distância: construção de uma base multipilar da USP e metodologia de aferição** – Tese de doutorado – Escola politécnica da universidade de São Paulo – 1990.

NETTO, N. P.; **Campo de provas para instrumentos de medição e posicionamento** – Livre Docência – Escola politécnica da universidade de São Paulo – 1997.

OPTECH: Disponível em <http://www.optech.ca>, Acesso em 10/01/2006.

RIEGL: Disponível em <http://www.riegl.com>, Acesso em 10/01/2006.

T. KERSTEN, H. STERNBERG, K. MECHELKE, C. ACEVEDO PARDO.: **Terrestrial Laser scanning system Mensi GS100/GS200 – Accuracy tests, experiences and projects at the Hamburg university of applied science**. IAPRS, vol XXXIV. Alemanha 19 de fevereiro de 2004.

TOMMASELLI, A. M. G.: **Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a curta Distância**. Geodésia Online (UFSC). 2004.

TRIMBLE: Disponível em <http://www.trimble.com>, Acesso em 10/01/2006.

VANICEK, P. **Introduction to adjustment calculus**. UNB, Lecture Notes n 3. Frederiction, 1973.

WEHR, A.: **Laser Scanning and its potential to support 3D panoramic recording**. ISPRS, Berlin Germany 24-25 February 2005.

WOLF, P.R.; GHILANI, C. D. **Adjustment computations: statistics and least square in surveying and GIS**. Ed.: John Wiley & Sons, Inc, New York, 1997. 564 p. ISBN 0-471-16833-5.

WUTKE, J. D.: **Métodos para avaliação de um sistema laser scanner terrestre.**
Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Paraná, 2006

Zoller+Frohlich: Disponível em <http://www.zf-laser.com>, Acesso em 10/01/2006.

ANEXO A

Número de Observações: 5

Modelos Matemáticos:

$$D_1 = \left[(X_E - X_{P1})^2 + (Y_E - Y_{P1})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$D_2 = \left[(X_E - X_{P2})^2 + (Y_E - Y_{P2})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$D_3 = \left[(X_E - X_{P3})^2 + (Y_E - Y_{P3})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$D_4 = \left[(X_E - X_{P4})^2 + (Y_E - Y_{P4})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$D_5 = \left[(X_E - X_{P5})^2 + (Y_E - Y_{P5})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Número de Incógnitas: 2

$$E = \begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \end{bmatrix}$$

Graus de Liberdade: 3

Coordenadas dos pilares da Raia Olímpica

	X (metros)	Y (metros)
P0	149982,6541	250009,1671
P1A	149987,0479	250006,8428
P1	150000,0000	250000,0000
P2A	150009,0136	249995,2399
P2	150042,9264	249977,3238

Observações:

Distâncias 3D	
E – P0	31,827
E – P1A	28,340
E – P1	21,728
E – P2A	22,255
E – P2	49,443

Coordenadas do Ponto E aproximado

$$E0^T = \begin{bmatrix} 149993,5180 & 249979,2440 \end{bmatrix}$$

1ª Iteração

$$L0 = \begin{bmatrix} 31,834 \\ 28,347 \\ 21,745 \\ 22,271 \\ 49,446 \end{bmatrix} \quad Lb = \begin{bmatrix} 31,827 \\ 28,340 \\ 21,728 \\ 22,255 \\ 49,443 \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} 0,007 \\ 0,007 \\ 0,017 \\ 0,016 \\ 0,003 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0,3413 & -0,9400 \\ 0,2282 & -0,9736 \\ -0,2981 & -0,9545 \\ -0,6958 & -0,7182 \\ -0,9992 & 0,0388 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 0,510204082 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,510204082 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,510204082 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,510204082 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,510204082 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} 1,740028861 & 0,202487658 \\ 0,202487658 & 3,259971139 \\ 1,740028861 & 0,202487658 \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{vmatrix} -0,011779341 \\ -0,040743508 \end{vmatrix}$$

$$X1 = \begin{vmatrix} 0,005353913 \\ 0,01216557 \end{vmatrix}$$

$$E1 = X1 + E0 \quad \begin{vmatrix} 149993,523 \\ 249979,256 \end{vmatrix}$$

2ª Iteração

$$L0 = \begin{vmatrix} 31,825 \\ 28,336 \\ 21,731 \\ 22,258 \\ 49,441 \end{vmatrix}$$

$$Lb = \begin{vmatrix} 31,827 \\ 28,340 \\ 21,728 \\ 22,255 \\ 49,443 \end{vmatrix}$$

$$L = \begin{vmatrix} -0,002 \\ -0,004 \\ 0,003 \\ 0,003 \\ -0,002 \end{vmatrix}$$

$$A = \begin{vmatrix} 0,341536312 & -0,93986858 \\ 0,228520366 & -0,973539133 \\ -0,298031743 & -0,95455596 \\ -0,69593434 & -0,71810542 \\ -0,999235912 & 0,039084413 \end{vmatrix}$$

$$P = \begin{vmatrix} 0,510204082 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,510204082 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,510204082 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,510204082 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,510204082 \end{vmatrix}$$

$$N = \begin{vmatrix} 1,740488544 & 0,201714881 \\ 0,201714881 & 3,259511456 \\ 1,740488544 & 0,201714881 \end{vmatrix}$$

$$U = \begin{vmatrix} -0,004875276 \\ 0,000186605 \end{vmatrix}$$

$$X2 = \begin{vmatrix} 0,002828014 \\ -0,000232261 \end{vmatrix}$$

$$E2 = X2 + E1 \begin{vmatrix} 149993,526 \\ 249979,256 \end{vmatrix}$$

3ª Iteração

$$L0 = \begin{vmatrix} 31,826 \\ 28,337 \\ 21,731 \\ 22,256 \\ 49,438 \end{vmatrix} \quad Lb = \begin{vmatrix} 31,827 \\ 28,340 \\ 21,728 \\ 22,255 \\ 49,443 \end{vmatrix} \quad L = \begin{vmatrix} -0,001 \\ -0,003 \\ 0,003 \\ 0,001 \\ -0,005 \end{vmatrix}$$

$$A = \begin{vmatrix} 0,341612463 & -0,939840904 \\ 0,228613128 & -0,973517354 \\ -0,29791012 & -0,954593924 \\ -0,695863597 & -0,718173972 \\ -0,999236008 & 0,039081957 \end{vmatrix}$$

$$P = \begin{vmatrix} 0,510204082 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,510204082 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,510204082 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,510204082 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,510204082 \end{vmatrix}$$

$$N = \begin{vmatrix} 1,740412223 & 0,201462003 \\ 0,201462003 & 3,259587777 \\ 1,740412223 & 0,201462003 \end{vmatrix}$$

$$U = \begin{vmatrix} -0,002832733 \\ 0,000110039 \end{vmatrix}$$

$$X3 = \begin{vmatrix} 0,001643287 \\ -0,000135323 \end{vmatrix}$$

$$E2 = X3 + E2 \quad \begin{vmatrix} 149993,528 \\ 249979,256 \end{vmatrix}$$

Cálculo dos Resíduos

$$V = \begin{vmatrix} -0,001 \\ -0,002 \\ 0,002 \\ 0,000 \\ -0,001 \end{vmatrix}$$

$$V^T P V = \begin{vmatrix} 3,66432E-06 \end{vmatrix}$$

Sigma a Posteriori = 1,2214E-06

$$MVC_E = \begin{vmatrix} 2,1206E-06 & -1,31066E-07 \\ -1,31066E-07 & 1,13227E-06 \end{vmatrix}$$

Teste de Precisão – Qui-Quadrado Teste Unilateral

TESTE UNILATERAL	
Qui-quadrado calculado	1,2214E-06
Qui-quadrado tabela (2-0,05)	0,07
Nível de significância de 5%	

Hipótese básica aceita

$$\chi_C^2 < \chi_{v,1-\alpha}^2$$

Resultado do Ajustamento

Estação E (Laser Scanner)		
E	X = 149993,528 m	± 0,00145 m
	Y = 249979,256 m	± 0,00106 m