

**RODRIGO GONÇALES**

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

**São Paulo**

**2007**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**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**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Gonçales, Rodrigo**

**Dispositivo de varredura 3D terrestre e suas aplicações na engenharia, com ênfase em túneis / R. Gonçales. -- 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 Petrobras, em nome do amigo Carlos Augusto Pereira, pela autorização de divulgação dos testes realizados, bem como os resultados obtidos, enriquecendo o conteúdo desse 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 uma metodologia para quantificar a precisão que se obtém por essa tecnologia.

Palavras Chave: Nuvem de pontos, *Laser Scanner* 3D, Túneis , *as-built*, plantas industriais.



## **ABSTRACT**

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

This technical evolution has become the surveying more and more fast 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 technology Laser Scanner 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, as-built and presents a method to quantization the accuracy.

**Keywords:** Point Cloud, Laser Scanner 3D, Tunnels, Engineering Plant As-built, Plant and Process.

# SUMÁRIO

PARTE I – INTRODUÇÃO E FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	11
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 (Time of Flight-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 DE USO .....	47
4.1. Levantamento de campo .....	47
4.1.1. Levantamento topográfico (Estação Total) .....	53
4.1.2. Consolidação ou Registro .....	59
4.1.3. Validação da nuvem de pontos .....	62
4.1.4. Modelagem .....	63
4.1.5. Reconhecimento de primitivas .....	64

PARTE II - APLICAÇÕES .....	67
5. TÚNEIS .....	68
5.1. Introdução.....	68
5.2. Levantamento de campo .....	71
5.3. Processamento de escritório .....	74
5.4. Avaliação do método .....	81
6. PLANTAS INDUSTRIAIS .....	83
6.1. Produtos Gerados.....	84
6.1.1. Nuvem de Pontos e Análise de interferências .....	86
6.1.2. Modelo CAD/CAE .....	88
6.1.3. Controle Dimensional .....	99
6.1.3.1. Procedimento de trabalho.....	100
PARTE III – TESTES .....	103
7. TESTES DE PRECISÃO E QUALIDADE .....	103
7.1. Primeiro Teste: Precisão em distância .....	104
7.2. Segundo Teste: Condições de Trabalho .....	106
7.3. Terceiro Teste: Transporte de coordenadas e verificação da influência do tipo de alvo.....	108
7.4. Quarto Teste: Precisão Inversa .....	111
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	113
REFERÊNCIAS .....	116
ANEXO A .....	120
ANEXO B .....	125

## 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 ângulos 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, com certa precisão.

Essa evolução tecnológica fez com que os levantamentos se tornassem cada vez mais rápidos e precisos, aumentando a produtividade. No entanto, a evolução não para por aí; a última palavra em topografia é o levantamento através de um sistema de varredura a laser (*Laser Scanner 3D*). Esses aparelhos vêm-se difundindo com muita rapidez nos últimos anos. Já existem algumas empresas que dominam essa tecnologia, tendo desenvolvido equipamentos específicos para as diferentes finalidades. 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 a inclinação dessa observação. A partir dessas coordenadas polares 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. A obtenção das coordenadas dos pontos refletidos pelos objetos escaneados é calculada através da comparação dos três comprimentos de onda.

Devido à rapidez e à enorme quantidade de informação adquirida com essa tecnologia, a aérea 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 na área, 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 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 que possa ser útil em diversas áreas, a quantificação da precisão apresentada por essa tecnologia e mostrar aplicações nas áreas de túneis e plantas industriais.

### **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 precessores) 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 está dividida em 2 capítulos e exemplifica dois tipos de aplicações. No capítulo 5, com mais detalhes, são mostradas aplicações na área de túneis e no capítulo 6 levantamentos em plantas industriais

A Parte III, composta pelo capítulo 7, mostra alguns testes de precisão desenvolvidos nos pilares situados na raia olímpica da USP.

E, por fim, o capítulo 8 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)

<b>Instrumento</b>	<b>Ano</b>	<b>Origem</b>	<b>Função</b>
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 e utilizou, em vez da tecnologia eletro-ótica do primeiro, a de microondas (BRANDALIZE et al., 2004).

A partir e 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 geodeta sueco F. Bergstrand desenvolveu um método de determinação da ve

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 (CALDAS, 1986).

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 à 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  $3 \times 10^8$  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
<b>Luz visível</b>		<b>0,400 a 0,780 microns</b>
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.

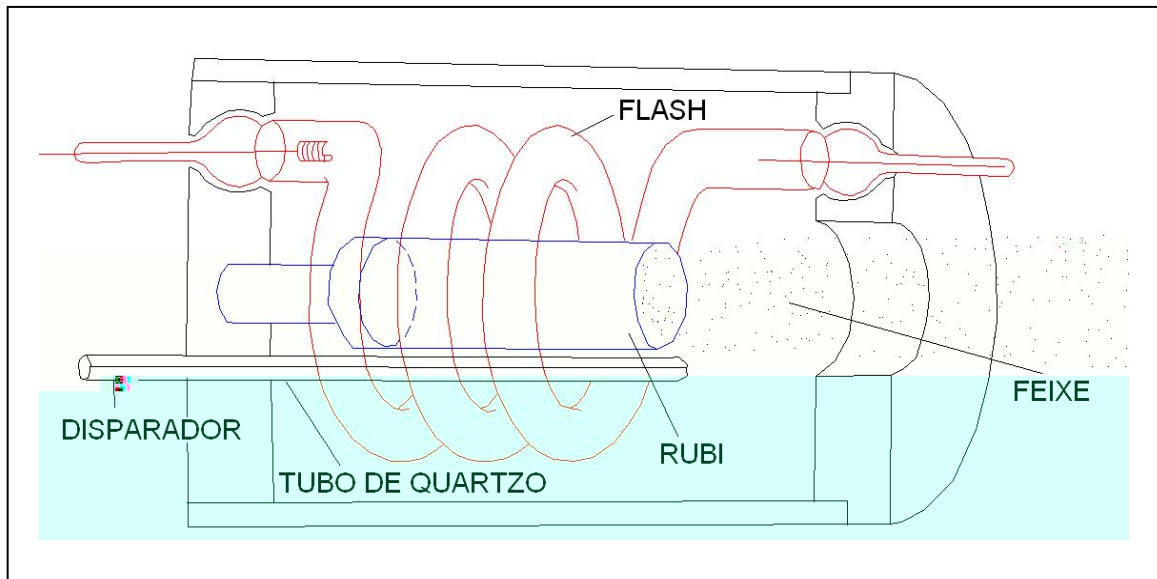


Figura 2.1 - Laser de rubi

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.

<b>Tipo</b>	<b>Meio ativo</b>	<b>Comprimento de onda (nm)</b>	<b>Potência</b>	<b>Exemplos</b>
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 <sub>2</sub>
	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

Segundo Caldas (1986), os dispositivos lasers são classificados por diferentes critérios. Como verificado pela tabela 2.3, geralmente 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 frequência de emissão, fazendo com que o comprimento de onda se divida por dois num processo chamado na literatura inglesa de *frequency doubling*.

### **3. LASER SCANNER 3D TERRESTRE**

Sistemas *laser scanner 3D* permitem a construção de modelos 3D, visualização e análise de estruturas complexas, com extraordinária velocidade, precisão e segurança. O objeto escaneado pode ser visualizado através de um software de manipulação da nuvem 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, determinando a posição dos pontos através de coordenadas polares.

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 objetivo do presente trabalho é 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 ou gravam coordenadas tridimensionais de uma dada região ou objeto. Esse tipo de equipamento pode ser classificado de acordo com sua precisão, alcance e taxa de coleta de informações. A partir 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.



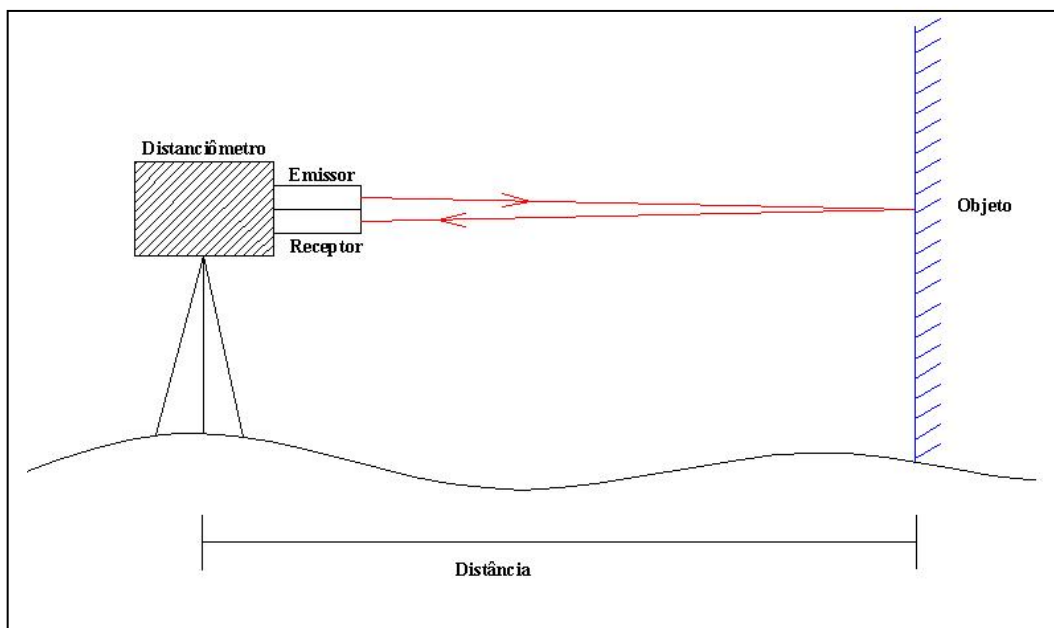


Figura 3.1 – Medidor Eletrônico de Distância sem refletor

O sistema laser scanner trabalha basicamente da mesma forma, mas além da distância entre o aparelho e o objeto, é necessário coletar outras informações, pois o que se necessita são as coordenadas tridimensionais de cada ponto coletado. Segundo Tommaselli (2004), o 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.

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

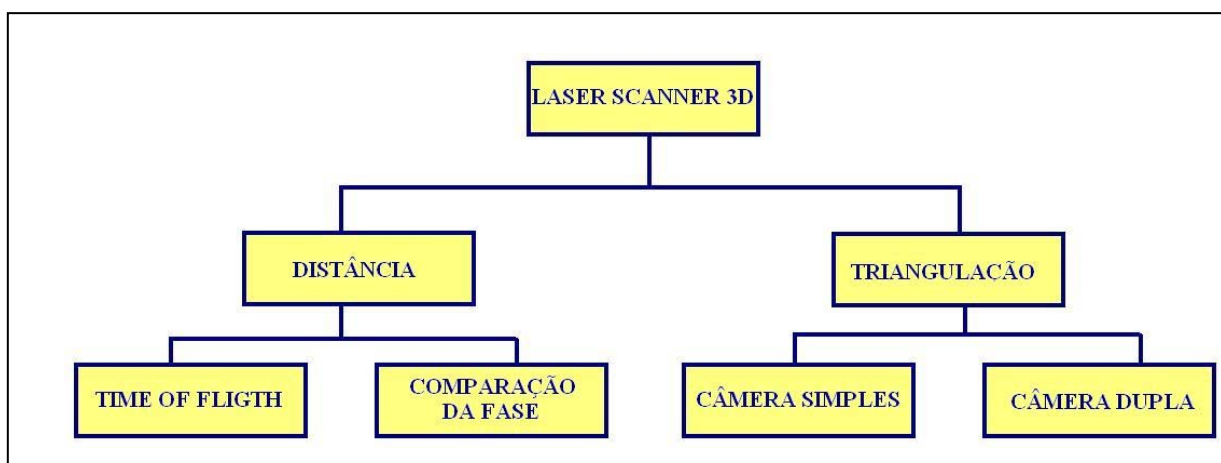


Figura 3.2 – Divisão por princípios de medição

Fonte: Adaptado de KASPAR ET AL, 2004

Os dois métodos mais utilizados são o de tempo de percurso e da comparação da fase por se tratarem de métodos mais rápidos de coleta (até 700.000 pontos por segundo) e possuírem maior alcance (até 1000 metros)

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

As medições realizadas pelo princípio do tempo de retorno no 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  $3 \times 10^8$  m/s (velocidade da luz), assim para uma distância de 15 m, o tempo de retorno do sinal é de  $1 \times 10^{-7}$  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;

$\Delta t$  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 polares do ponto em relação ao referencial do laser.

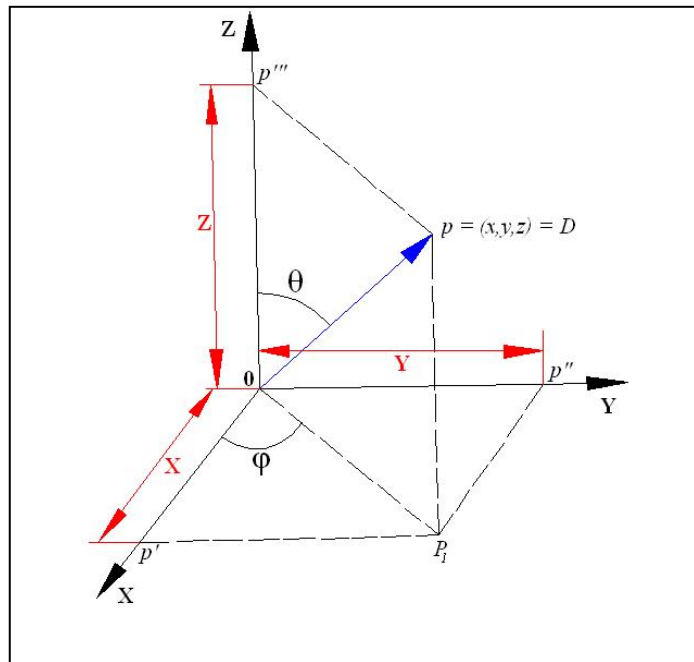


Figura 3.3 – Ilustração esquemática de coleta de coordenadas polares

Segundo a figura 3.3, as coordenadas polares do ponto P são conseguidas através da medição dos ângulos  $\theta$  (Elevação) e  $\varphi$  (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:

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

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

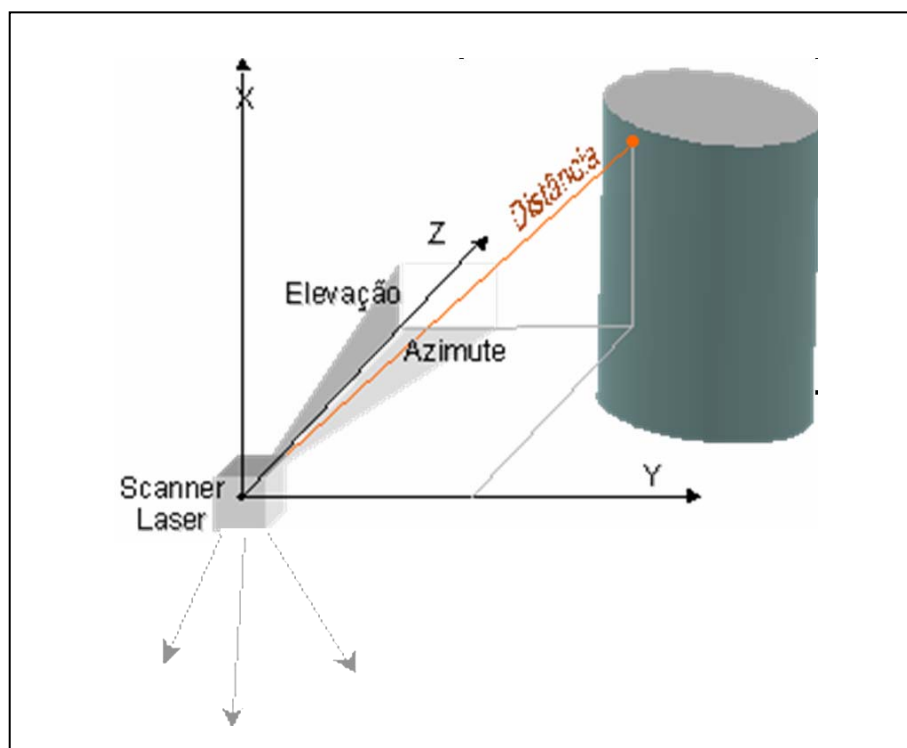


Figura 3.4 – Princípio de medição por tempo de percurso (*Time of Flight – TOF*)

Fonte: Adaptado de 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

Utilizar a comparação da fase da onda laser para coletar coordenadas X, Y, Z dos pontos registrados, 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.

O equipamento LS, por exemplo, do fabricante FARO, faz a quebra em três diferentes comprimentos de onda, 76 m (azul), 9,6 m (vermelho) e 1,2 m (amarelo), como mostrado na figura 3.5.

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

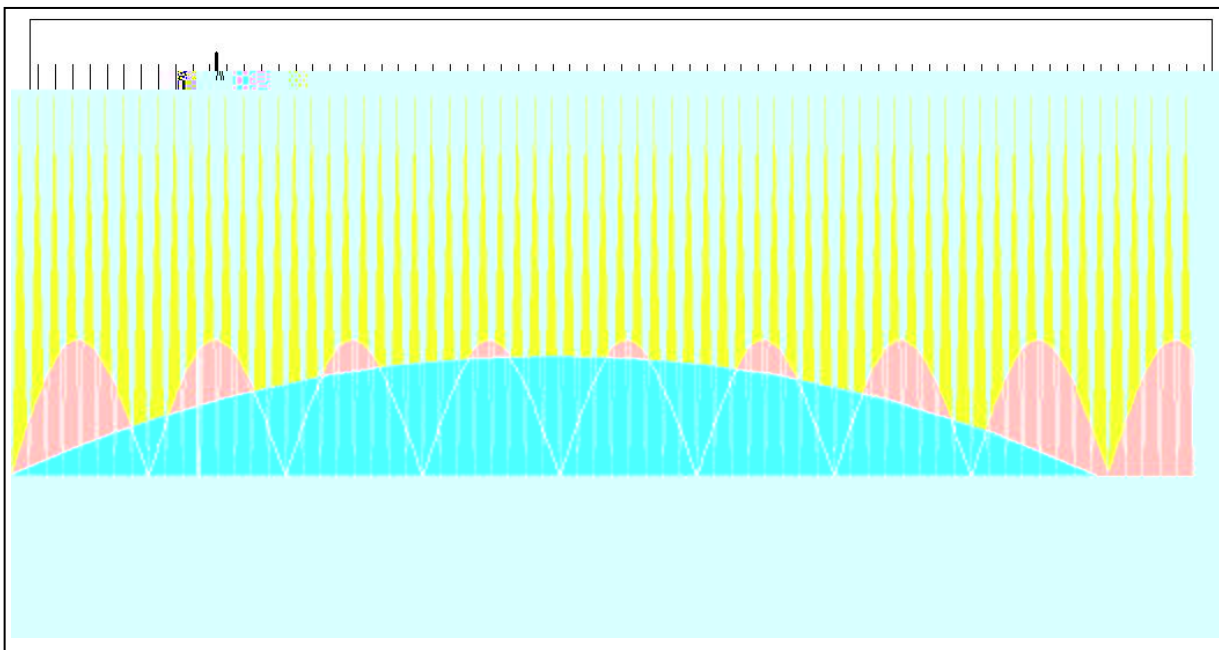


Figura 3.5 – Exemplo de medições através de comparação de fase

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.

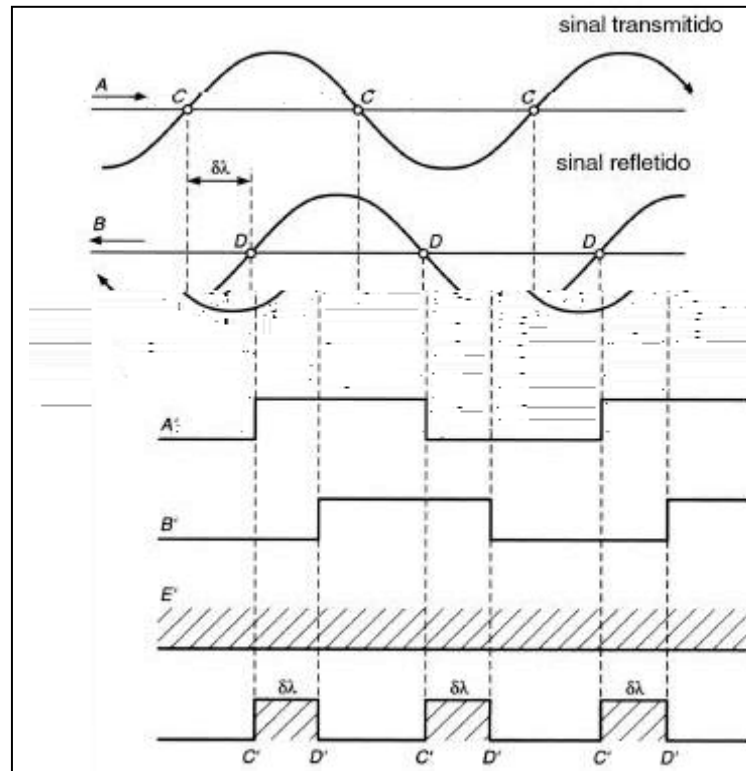


Figura 3.6 – Esquema gráfico de medições através de comparação de fase

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.

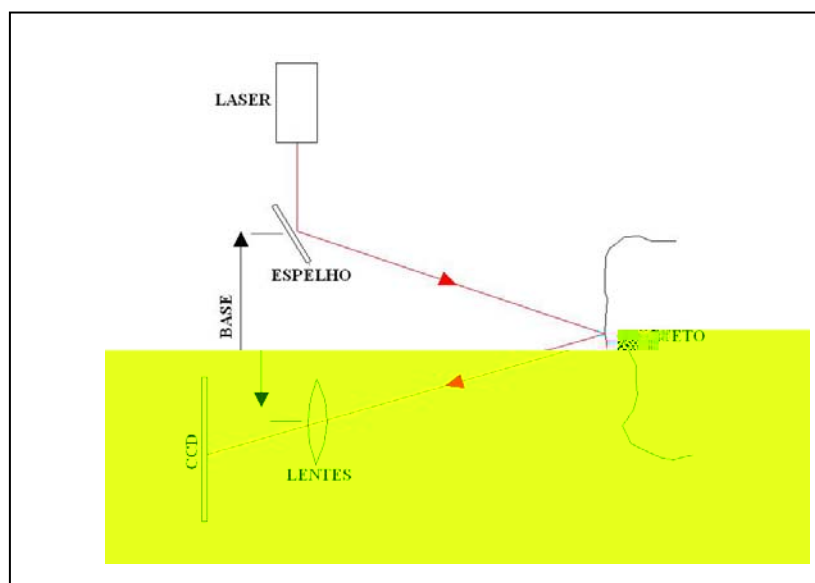


Figura 3.7 – Método de triangulação – Câmera Simples

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.

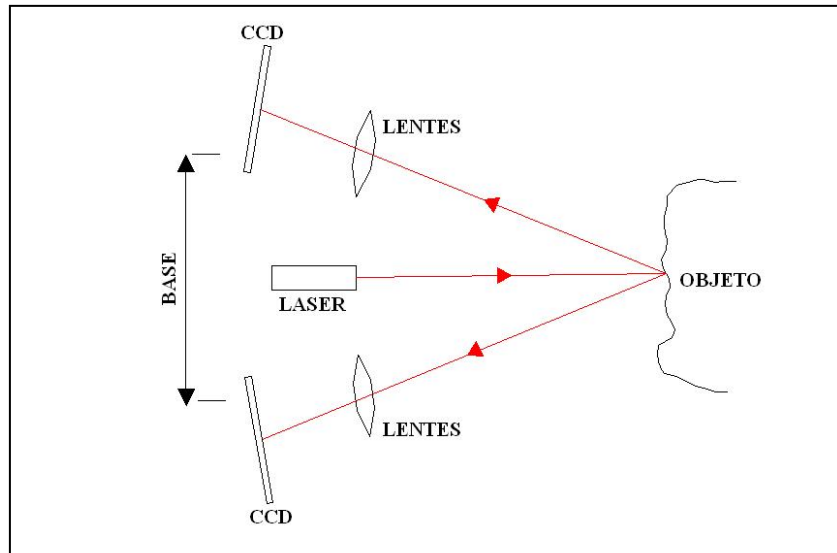


Figura 3.8 – Método de triangulação – Câmera Dupla

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 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.

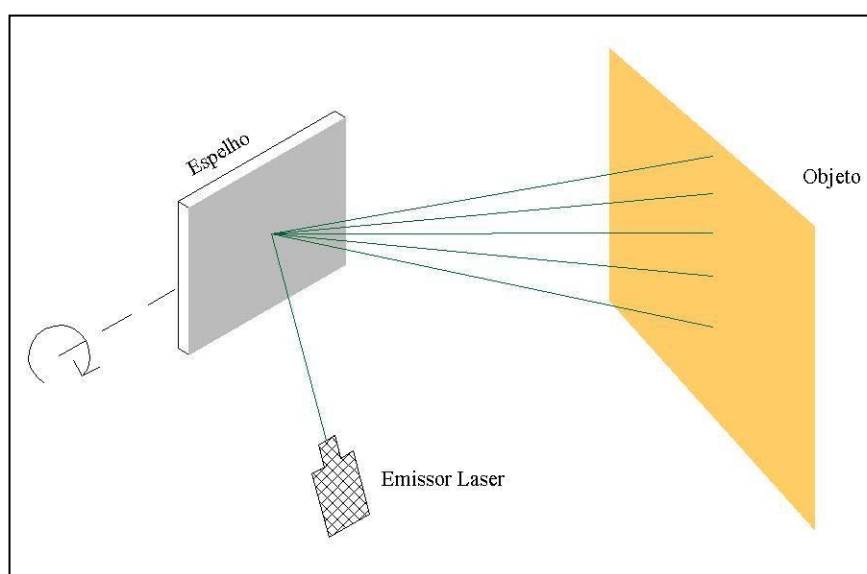


Figura 3.9 – Espelho oscilador.

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  $60^\circ$ . Na horizontal esse equipamento possui um servo-motor com capacidade de giro de  $360^\circ$  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 polígono 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, realizando assim a medição em três dimensões. Esse método é mostrado na figura 3.10.



Figura 3.10 – Polígono de rotação.

Um sistema similar aos que são utilizadas em estações totais motorizadas

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 ( $\text{CO}_2$ ) 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 mmHg de pressão, contendo 0,03% de CO<sub>2</sub>

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

$P$  é a pressão durante a observação (mmHg);

$E$  é a pressão do vapor de água (mmHg)

$\lambda_0$  é o comprimento de onda do sinal no vácuo

### 3.4. Equipamentos

Atualmente existe um grande número de equipamentos e fabricantes, cada qual desenvolvido para uma determinada aplicação e 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 que 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)

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

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

\*\*polígono 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 colimado, 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  $\text{watt/cm}^2$  resultará em uma exposição de 1.000  $\text{watt/cm}^2$  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 europeia (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. O poder do Laser é tão fraco 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 utiliza 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 potencia 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. A tabela a seguir mostra o LEA para dispositivos lasers Classe I.

Tabela 3.2 – Classe I CDHR 21 CFR

Comprimento de onda (nanômetros)	Duração da emissão (segundos)	Classe I - LEA		
		Valor	Unidade	Quantidade
≥ 180 e ≤ 400	≤ 3.0 x 10 <sup>4</sup>	2.4 x 10 <sup>-5</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub> *	Joules (J)	Energia
	>3.0 x 10 <sup>4</sup>	8.0 x 10 <sup>-10</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub> *	Watts (W)	Potência
≥ 400 e ≤ 1400	>1.0 x 10 <sup>-9</sup> a 2.0 x 10 <sup>-5</sup>	2.0 x 10 <sup>-7</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	J	Energia
	> 2.0 x 10 <sup>-5</sup> a 1.0 x 10 <sup>1</sup>	7.0 x 10 <sup>-4</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	J	Energia
	> 1.0 x 10 <sup>1</sup> a 1.0 x 10 <sup>4</sup>	3.9 x 10 <sup>-3</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	J	Energia
	>1.0 x 10 <sup>4</sup>	3.9 x 10 <sup>-7</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	W	Potência
	>1.0 x 10 <sup>-9</sup> a 1.0 x 10 <sup>1</sup>	10 k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	Jcm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>	Radiância Integrada
	>1.0 x 10 <sup>1</sup> a 1.0 x 10 <sup>4</sup>	20 k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	Jcm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>	Radiância Integrada
	>1.0 x 10 <sup>4</sup>	2.0 x 10 <sup>-3</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	Wcm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>	Radiância
≥ 1400 e ≤ 2500	> 1.0 x 10 <sup>-9</sup> a 1.0 x 10 <sup>-7</sup>	7.9 x 10 <sup>-5</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	J	Energia
	> 1.0 x 10 <sup>-7</sup> a 1.0 x 10 <sup>1</sup>	4.4 x 10 <sup>-3</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	J	Energia
	> 1.0 x 10 <sup>1</sup>	7.9 x 10 <sup>-4</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	W	Potência
> 2500 e ≤ 1.0 x 10 <sup>6</sup>	> 1.0 x 10 <sup>-9</sup> a 1.0 x 10 <sup>-7</sup>	1.0 x 10 <sup>-2</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	Jcm <sup>-2</sup>	Exposição
	> 1.0 x 10 <sup>-7</sup> a 1.0 x 10 <sup>1</sup>	5.6 x 10 <sup>-1</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	Jcm <sup>-2</sup>	Exposição
	> 1.0 x 10 <sup>1</sup>	1.0 x 10 <sup>-1</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	Jcm <sup>-2</sup>	Exposição
	> 1.0 x 10 <sup>1</sup>			

\* Fatores de correção k<sub>1</sub> e k<sub>2</sub> são mostrados na Tabela 3.3

Tabela 3.3 – Valores de correção k1 e k2 dependendo do comprimento de onda

Comprimento de onda (nanômetros)	K1	K2		
180 a 302.4	1.0	1.0		
> 302,4 a 315	$10^{\left[\frac{\lambda-302.4}{5}\right]}$	1.0		
> 315 a 400	330	1.0		
> 400 a 700	1.0	1.0		
>700 a 800	$10^{\left[\frac{\lambda-700}{515}\right]}$	se: $t \leq \frac{10100}{\lambda - 699}$ então: k2 = 1.0	se: $\frac{10100}{\lambda - 699} < t \leq 10^4$ então: k2 = $\frac{t(\lambda - 699)}{10100}$	se: $t > 10^4$ então: k2 = $\frac{\lambda - 699}{1.01}$
> 800 a 1060	$10^{\left[\frac{\lambda-700}{515}\right]}$	se: $t \leq 100$ então: k2 = 1.0	se: $100 < t \leq 10^4$ então: k2 = $\frac{1}{100}$	se: $t > 10^4$ então: k2 = 100
>1060 a 1400	5.0			
> 1400 a 1535	1.0	1.0		
> 1535 a 1545	$t \leq 10^{-7}$ k1 = 100	1.0		
	$t > 10^{-7}$ k1 = 1.0			
> 1545 a $1.0 \times 10^6$	1.0	1.0		

Na tabela 3.3 as unidades de tempo (t) em segundos e comprimento ( $\lambda$ ) de onda em nanômetros.

- **Classe IIa**

Nessa classificação a radiação laser é considerada perigosa se observada num intervalo superior a  $1 \times 10^3$ s, abaixo desse tempo limite a radiação não causa danos. A tabela abaixo mostra o limite de Emissão Acessível para essa classificação.

Tabela 3.4 – Classe IIa CDHR 21 CFR

Comprimento de onda (nanômetros)	Duração da emissão (segundos)	Classe IIa- LEA		
		Valor	Unidade	Quantidade
$\geq 400$ e $\leq 710$	$> 1.0 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-6}$	W	Potência

- **Classe II**

Podem causar danos à visão se observados diretamente por um período maior que o LEA mostrado na tabela abaixo.

Tabela 3.5 – Classe II CDHR 21 CFR

Comprimento de onda (nanômetros)	Duração da emissão (segundos)	Classe II- LEA		
		Valor	Unidade	Quantidade
$\geq 400$ e $\leq 710$	$> 2.5 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-3}$	W	Potência

- **Classe IIIa**

Podem causar sérios riscos à visão se observados diretamente ou através de instrumentos óticos.

Tabela 3.6 – Classe IIIa CDHR 21 CFR

Comprimento de onda (nanômetros)	Duração da emissão (segundos)	Classe IIIa- LEA		
		Valor	Unidade	Quantidade
$\geq 400$ e $\leq 710$	$> 1.8 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-3}$	W	Potência

- **Classe IIIb**

Lasers classificados como IIIb são considerados perigosos para a pele e visão através de exposição direta dependendo dos Limites de Exposição, como mostra a tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Classe IIIb CDHR 21 CFR

Comprimento de onda (nanômetros)	Duração da emissão (segundos)	Classe IIIb - LEA		
		Valor	Unidade	Quantidade
≥ 180 e ≤ 400	≤ 2.5 x 10 <sup>-1</sup>	3.8 x 10 <sup>-4</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub> *	J	Energia
	>2.5 x 10 <sup>-1</sup>	1.5 x 10 <sup>-3</sup> k <sub>1</sub> k <sub>2</sub> *	W	Potência
≥ 400 e ≤ 1400	>1.0 x 10 <sup>-9</sup> a 2.0 x 10 <sup>-1</sup>	10 k <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	Jcm <sup>-2</sup>	Exposição
	>2.5 x 10 <sup>-1</sup>	5.0 x 10 <sup>-1</sup>	Jcm <sup>-2</sup> W	Exposição Potência
≥ 1400 e ≤ 1.0 x 10 <sup>6</sup>	>1.0 x 10 <sup>-9</sup> a 1.0 x 10 <sup>1</sup>	10	Jcm <sup>-2</sup>	Exposição
	>1.0 x 10 <sup>1</sup>	5.0 x 10 <sup>-1</sup>	W	Potência

\*Fatores de correção k<sub>1</sub> e k<sub>2</sub> são mostradas na tabela 3.3

- **Classe IV**

Lasers de classificação IV são considerados perigosos para a pele e visão se forem expostos diretamente ou indiretamente, devem ser manipulados com cuidado.

## 4. METODOLOGIA DE USO

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 que serão necessárias 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 azimute.

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 contrário 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 sejam posicionados em campo equidistantes 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, devem-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 plano (a) e um esférico (b) e sua correspondente geometria reconhecida automaticamente pelo programa PointScape do fabricante Trimble.

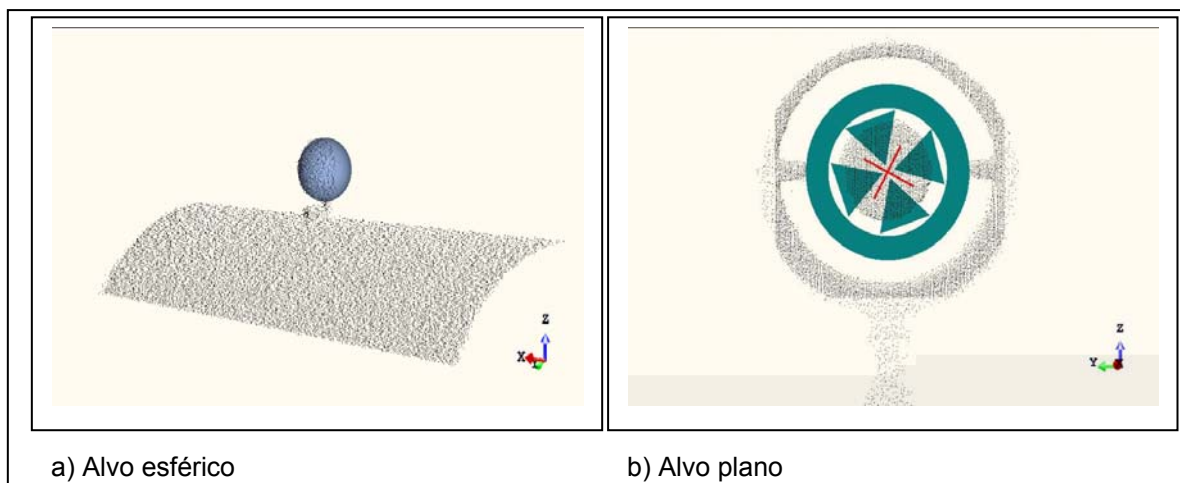


Figura 4.2 – Exemplo de alvos escaneados

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

Para facilitar o processo de interpretação da nuvem de pontos, pode se utilizar informações de 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 podem ser referidas 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 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 feitas e visualizadas (intensidade e níveis de cinza).

Todas essas informações são coletadas simultaneamente, apenas a cor real não, 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 esta 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.

Sendo 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.

#### 4.1.1. Levantamento topográfico (Estação Total)

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 aos 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 não 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 de 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.

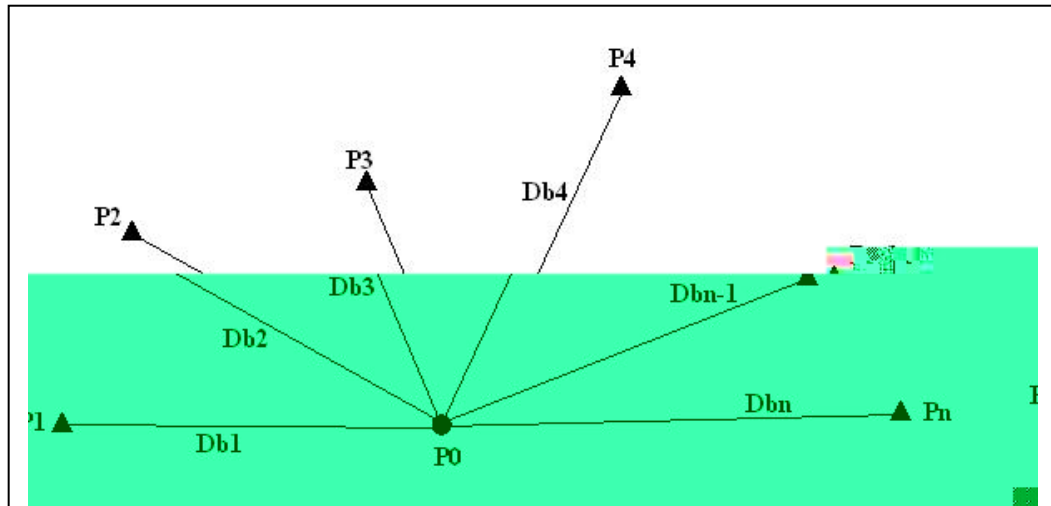


Figura 4.4 – Determinação de coordenadas através de distâncias

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:

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

Utilizando uma das coordenadas já conhecidas, um azimute e uma distância correspondente, podem-se descobrir 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 a equação de condição envolve observações e parâmetros, mas 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 x 1)

$X_a$  – vetor dos parâmetros ajustados (n x 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 x 1) dos valores das observações;

X é o vetor (u x 1) dos parâmetros incógnitos;

A é a matriz (n x u) de escalares conhecidos;

V é o vetor (u x 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:

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

$X_o$  - 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;

$\sigma_0^2$  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 tenha apenas 3 pontos disponíveis será possível obter um resultado mas não será possível realizar o ajustamento de observações através do MMQ, pois dessa forma tem-se 3 incógnitas (u) para 3 observações (n).

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

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

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

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

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

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

A matriz A, para esse caso é dada por:

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

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 esta 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 ( $\sigma_0^2$ ), 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  $\sigma_0^2$  e  $\hat{\sigma}_0^2$  pode-se fazer uma análise do ajustamento através da estatística Qui-quadrado ( $\chi^2$ ), 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  $\alpha$ , 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  $\alpha$ , 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.

#### 4.1.2. 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, 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 os 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 seqüência do trabalho de campo, em essência foram escaneados alguns alvos (planos ou esféricos) que ficaram 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 ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) e três rotações ( $\varpi X$ ,  $\varpi Y$ ,  $\varpi Z$ ).

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

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varpi_x & \text{sen } \varpi_x \\ 0 & -\text{sen } \varpi_x & \cos \varpi_x \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos \varpi_y & 0 & -\text{sen } \varpi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } \varpi_y & 0 & \cos \varpi_y \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos \varpi_z & \text{sen } \varpi_z & 0 \\ -\text{sen } \varpi_z & \cos \varpi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

Com  $\varpi_x$ ,  $\varpi_y$  e  $\varpi_z$  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 ( $\varpi X$ ,  $\varpi Y$ ,  $\varpi Z$ ) e os três parâmetros de translação ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ). 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 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.

### 4.1.3. Validação da nuvem de pontos

Devido à existência de interferência em alguns locais, à necessidade de ter uma cobertura completa de toda área, após as essas etapas descritas anteriormente, é necessário verificar e validar a nuvem de pontos.

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.

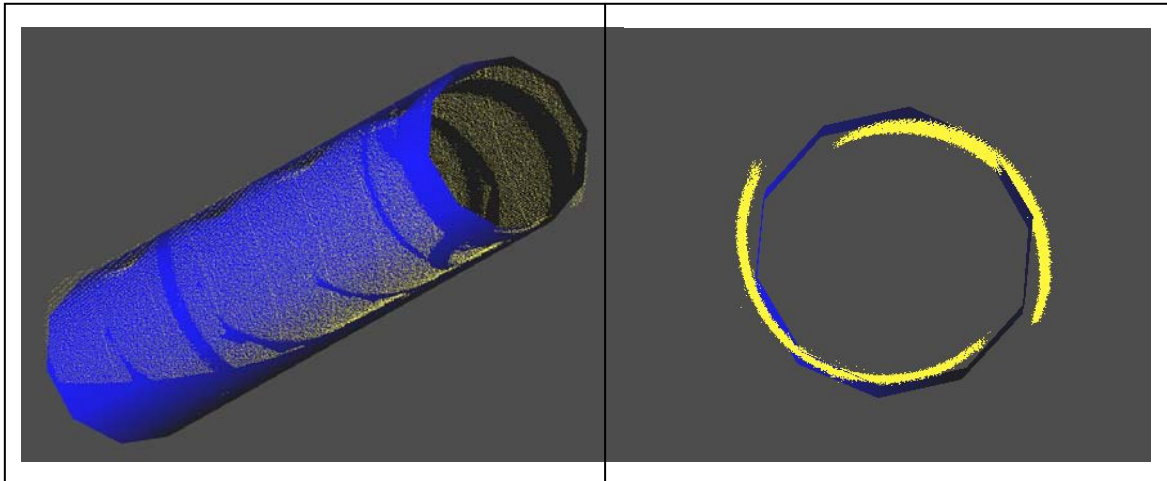


Figura 4.5 – Exemplo de consolidação ruim resultando em desalinhamento e descontinuidade na geometria formada

Verifica-se que o cilindro que constitui uma tubulação industrial não está bem definido na nuvem de pontos mostrado 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.

#### 4.1.4. 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  $1\sigma$  (desvio padrão),  $2\sigma$ ,  $3\sigma$  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).

#### **4.1.5. 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.

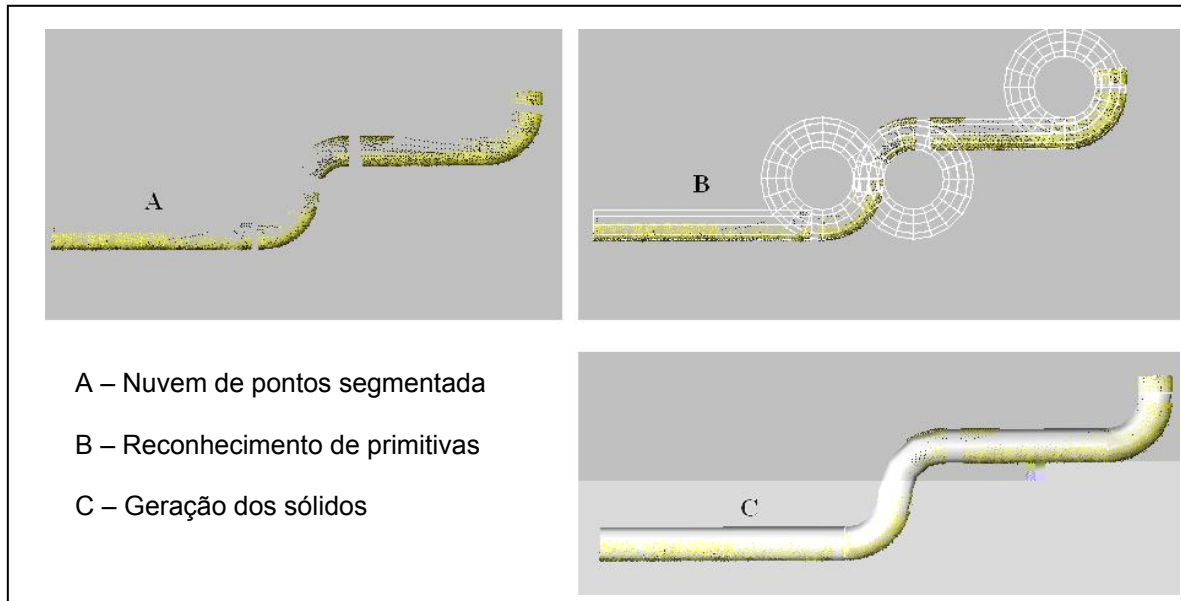


Figura 4.6 – Modelagem de componentes industriais através do MMQ

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 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.

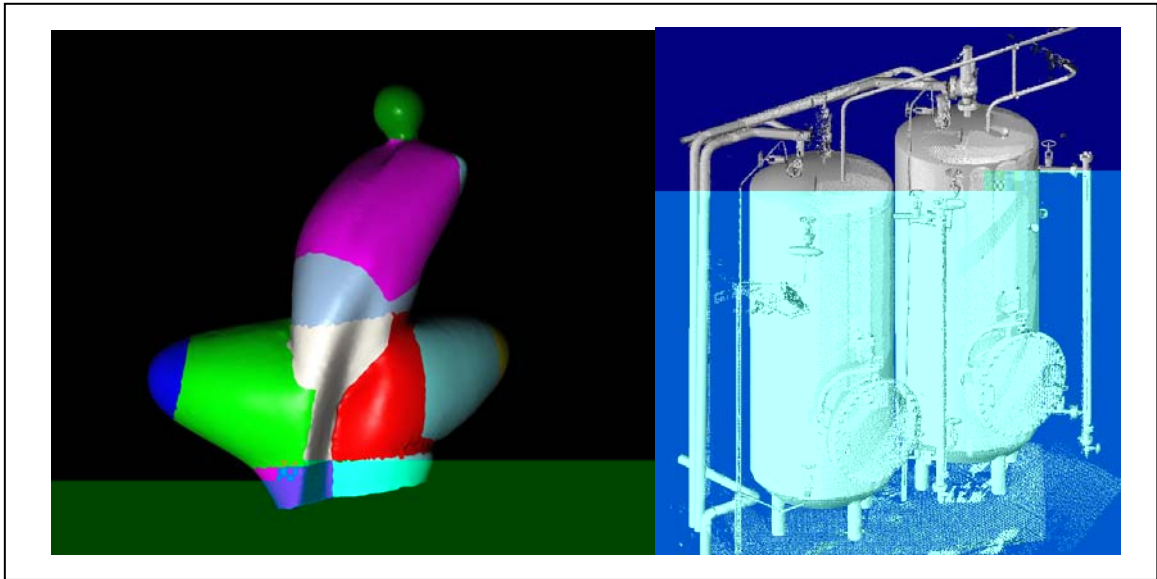


Figura 4.7 – Diferentes tipos de modelagem

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

Um equipamento de varredura laser 3D para levantamentos terrestres pode ser definido com um dispositivo de emissão laser, geralmente pulsado, que registra ou grava coordenadas tridimensionais de uma dada região ou objeto. Nota-se que esse tipo de equipamento pode ser classificado de acordo com sua precisão, alcance e taxa de coleta de informações. A partir dessas três características é possível definir o equipamento mais adequado para cada aplicação

No mercado atual existe uma enorme quantidade de equipamentos que podem ser utilizados para diferentes aplicações. A presente pesquisa irá tratar de alguns projetos desenvolvidos com o equipamento laser scanner 3D, modelo GS100 e GS200 da fabricante TRIMBLE.

As aplicações que serão citadas e descritas nos itens abaixo são alguns exemplos 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

### 5.1. Introdução

Geralmente é necessário levantar dados de estruturas (túneis) já construídas para detectar mudanças em sua geometria ou alterações durante sua construção.

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).

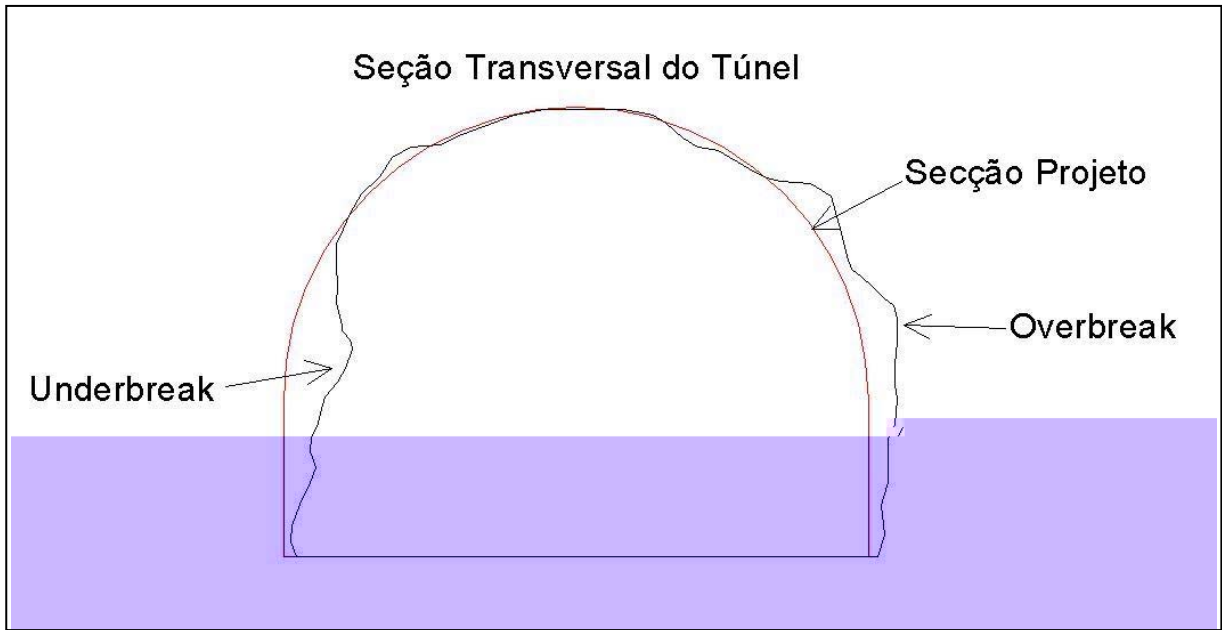


Figura 5.1 – O underbreak e overbreak

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 seções transversais ao longo de sua construção. Para gerar essas seções podem ser utilizados vários métodos de levantamento de dados que podem se 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.

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.

## **5.2. 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

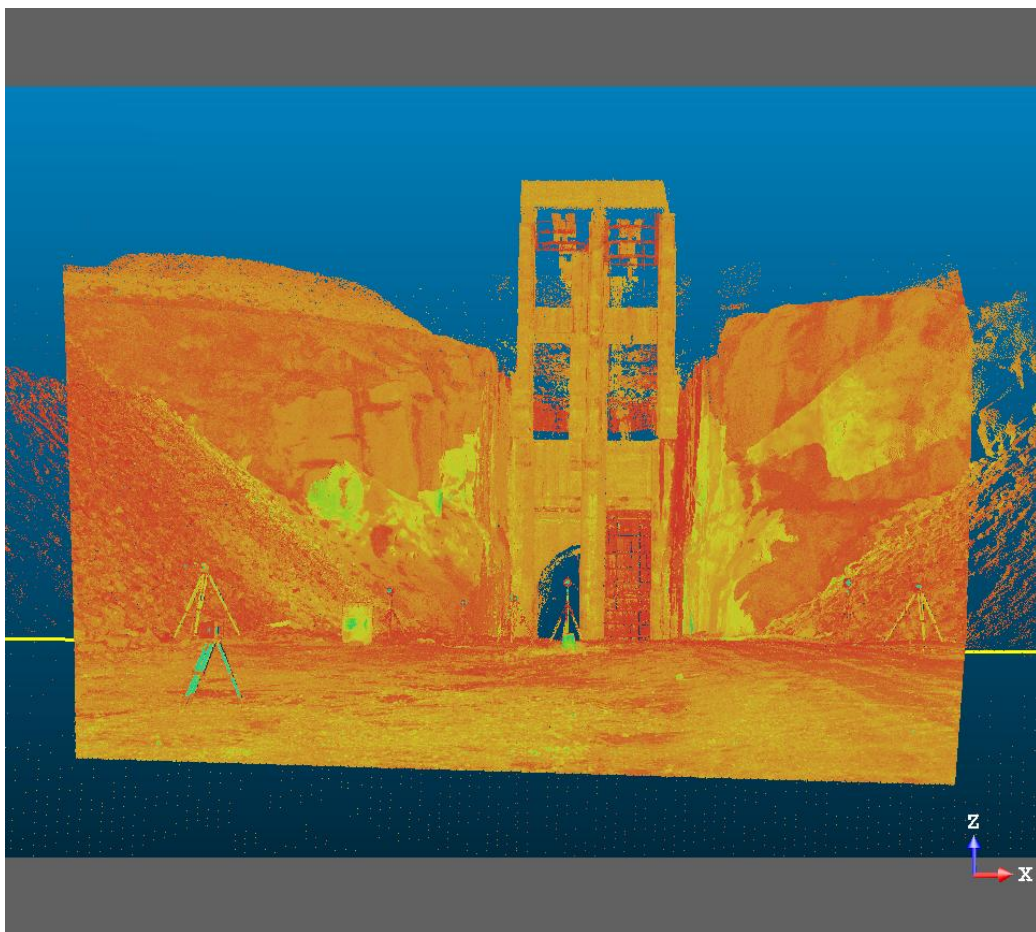


Figura 5.3 – Nuvem de pontos na entrada do túnel

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 no 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 isogonal 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 isogonal 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.

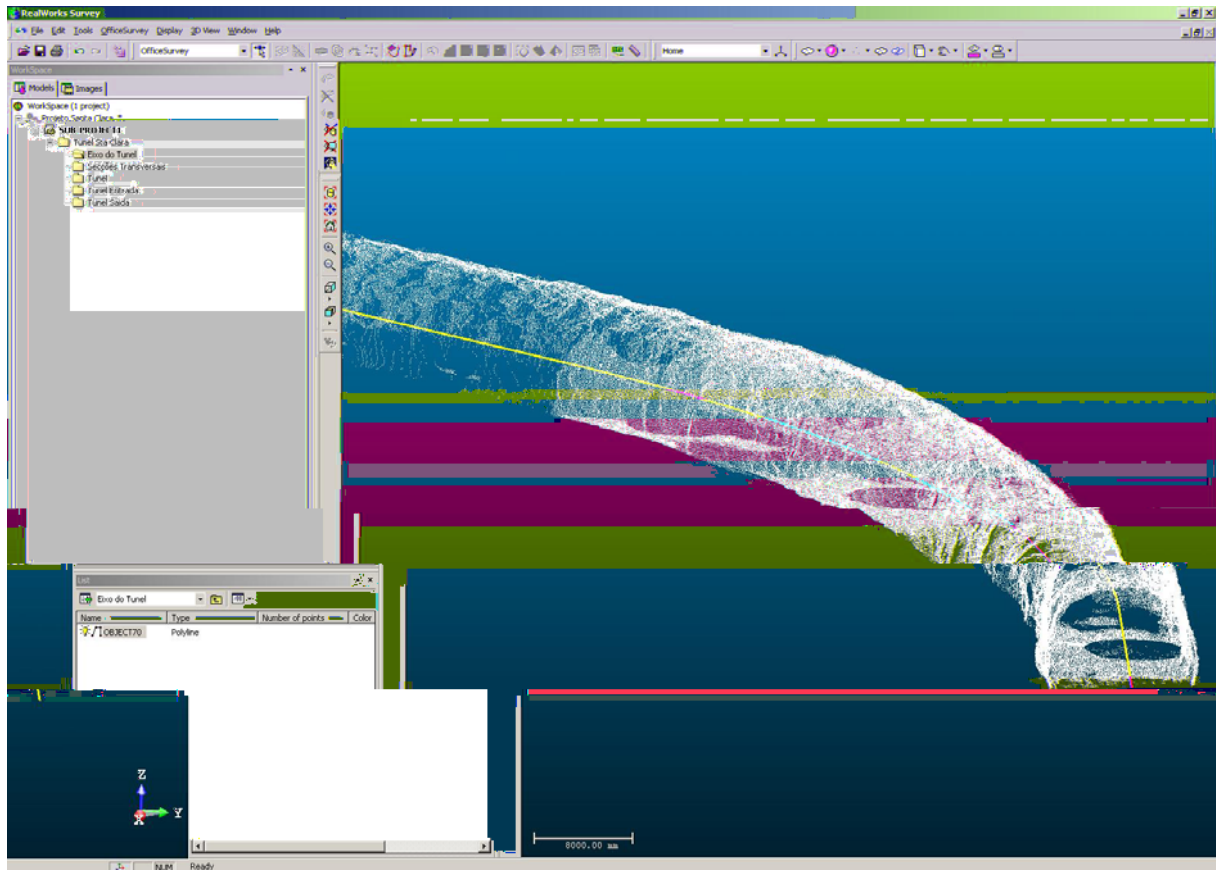


Figura 5.4 – Nuvem de pontos de um trecho do túnel e seu eixo (amarelo)

A partir de agora o eixo do túnel agora estava coincidindo com a nuvem de pontos. 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.

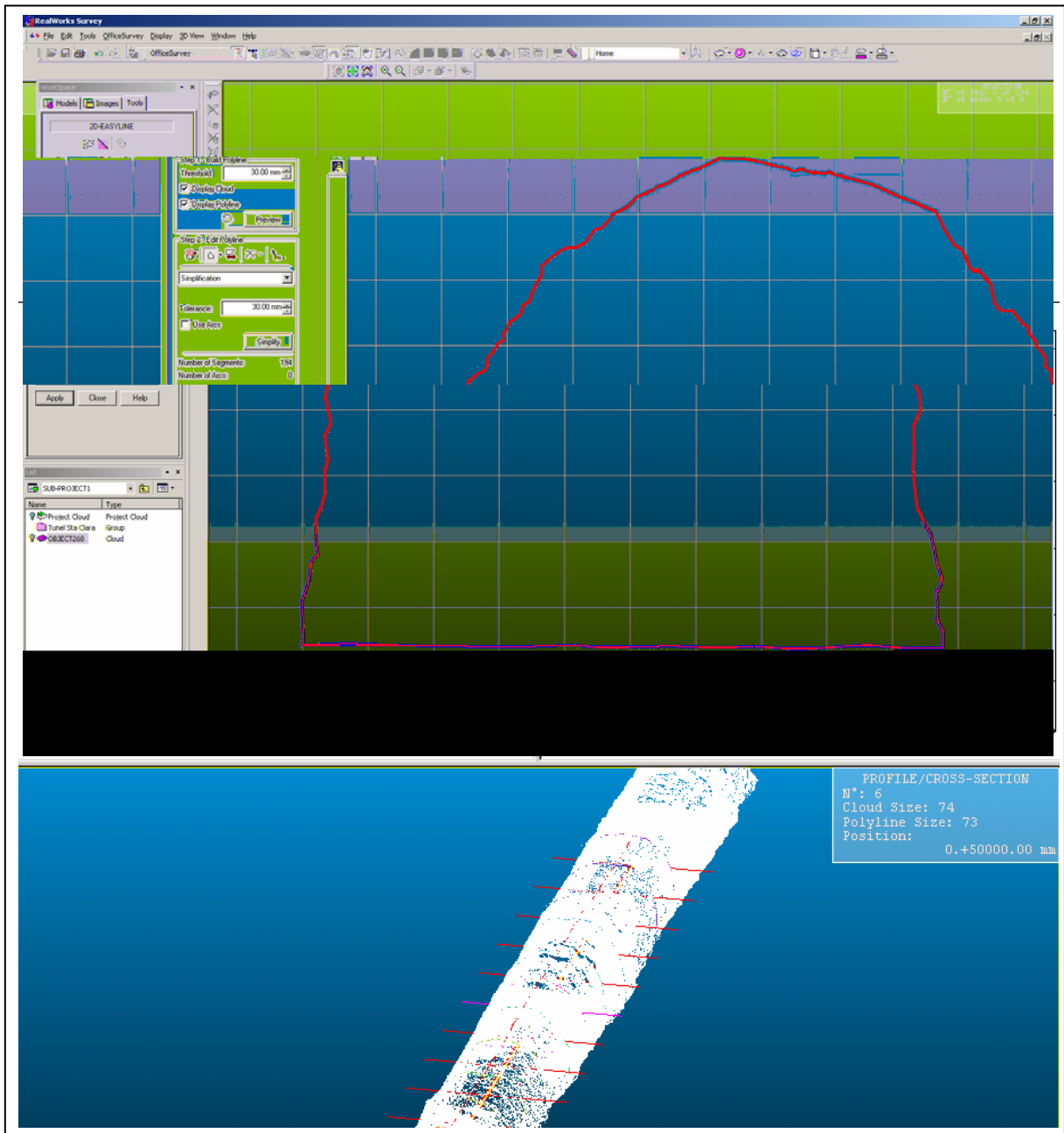


Figura 5.5 – Ferramentas do programa de extração de secções através da nuvem de pontos

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 gerado 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.

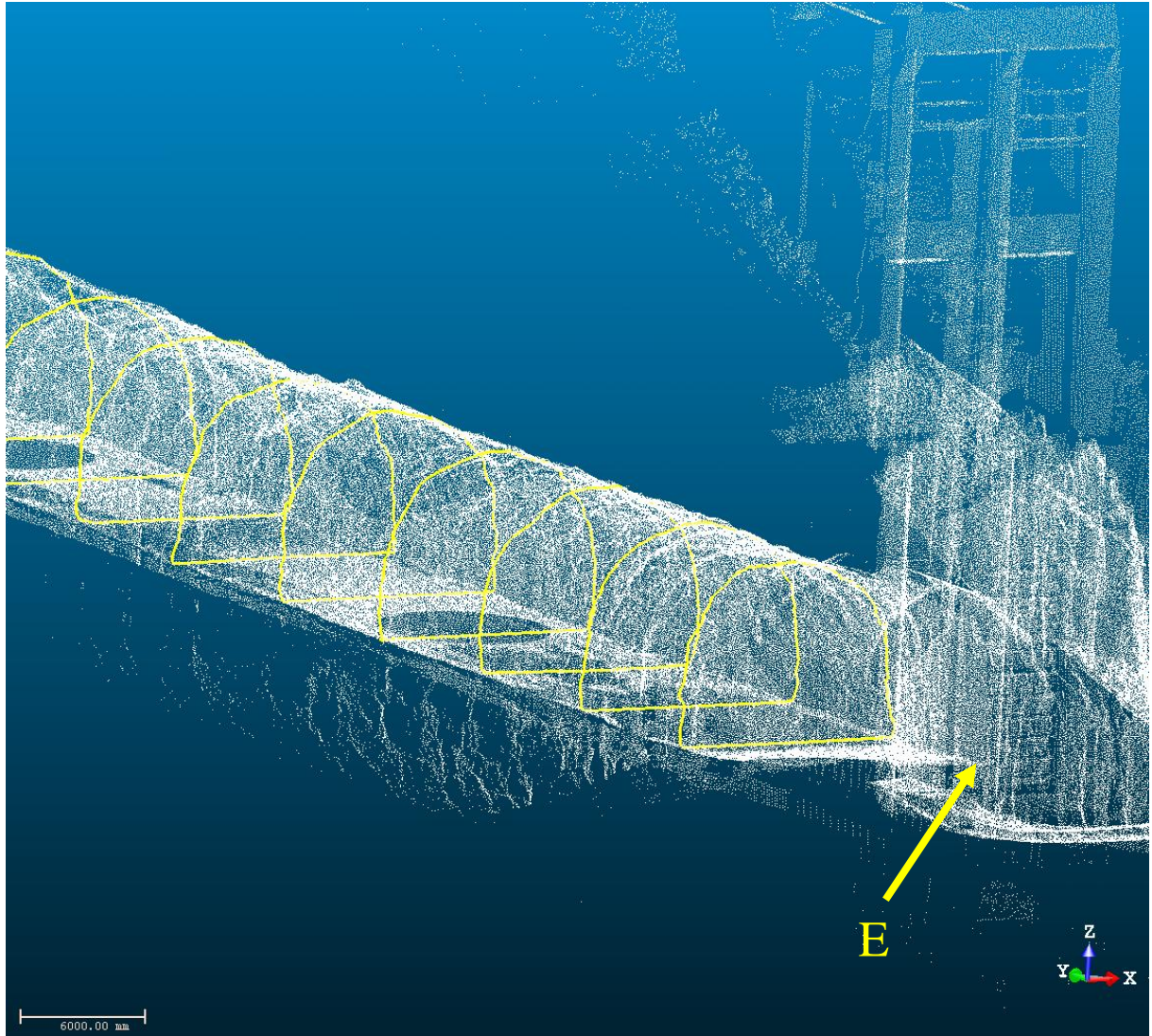


Figura 5.6 – Secções transversais (em amarelo) sobrepostas com a nuvem de pontos, na região próxima da embocadura (E)

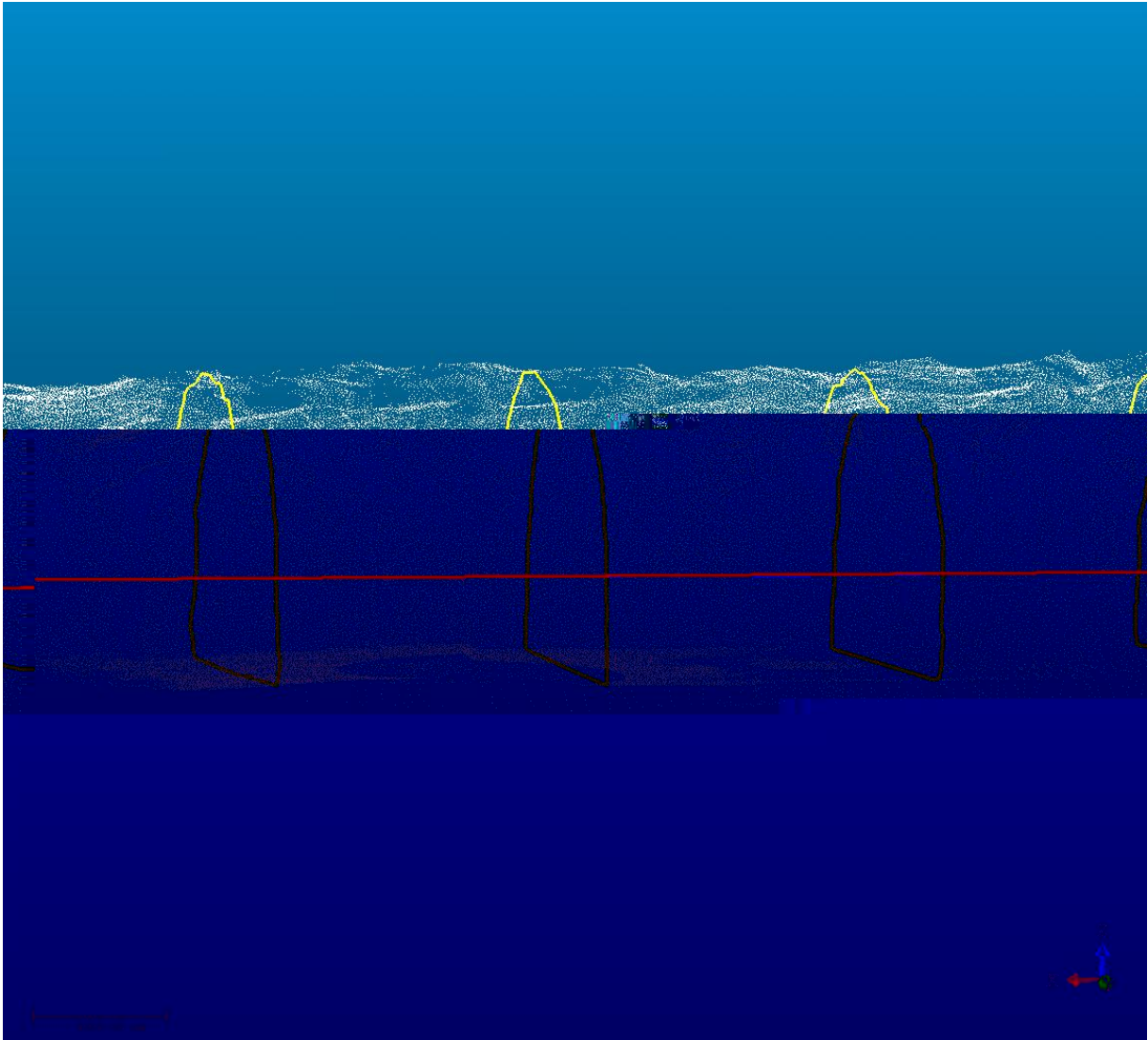


Figura 5.7 – Detalhes das Secções transversais (em amarelo) sobrepostas com a nuvem de pontos e o eixo do túnel (vermelho)

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.

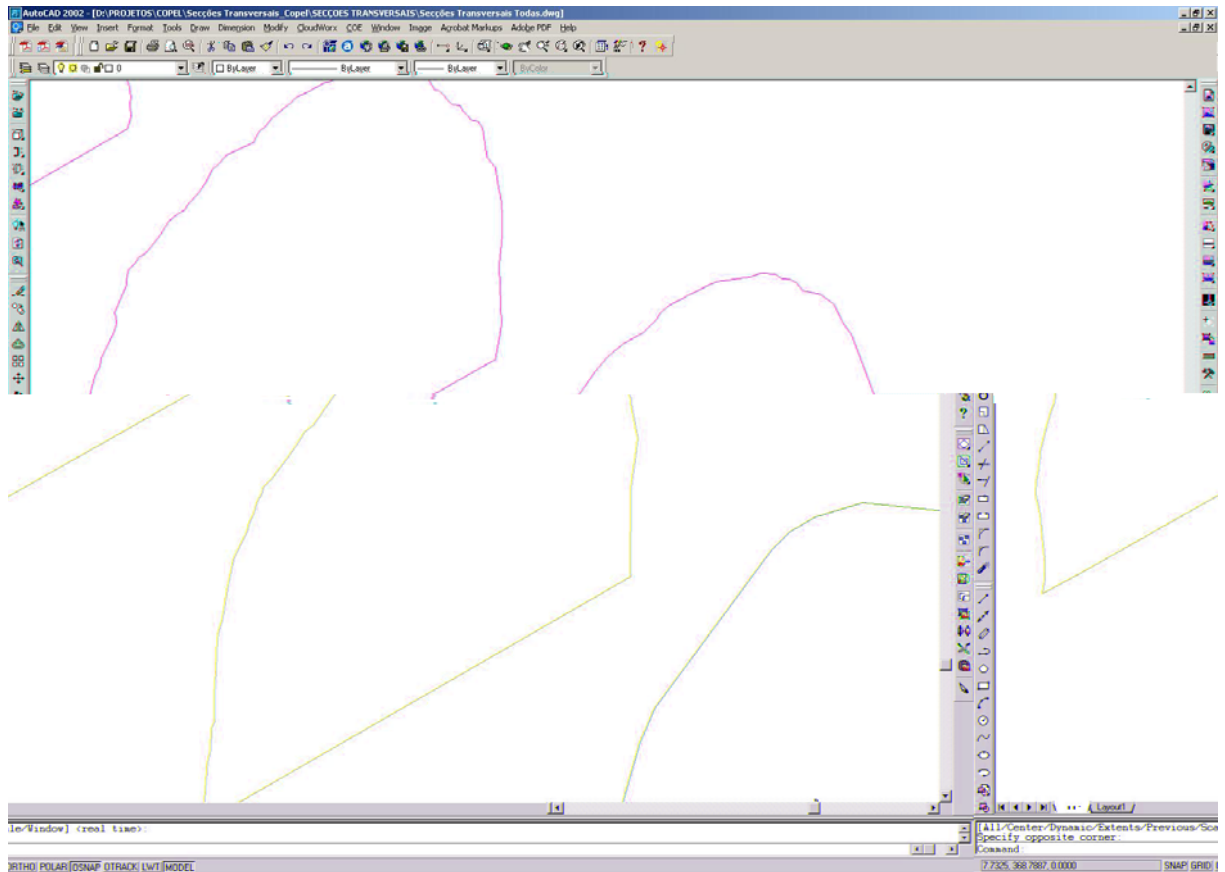


Figura 5.8 – Detalhes das Secções transversais em formato CAD.

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.



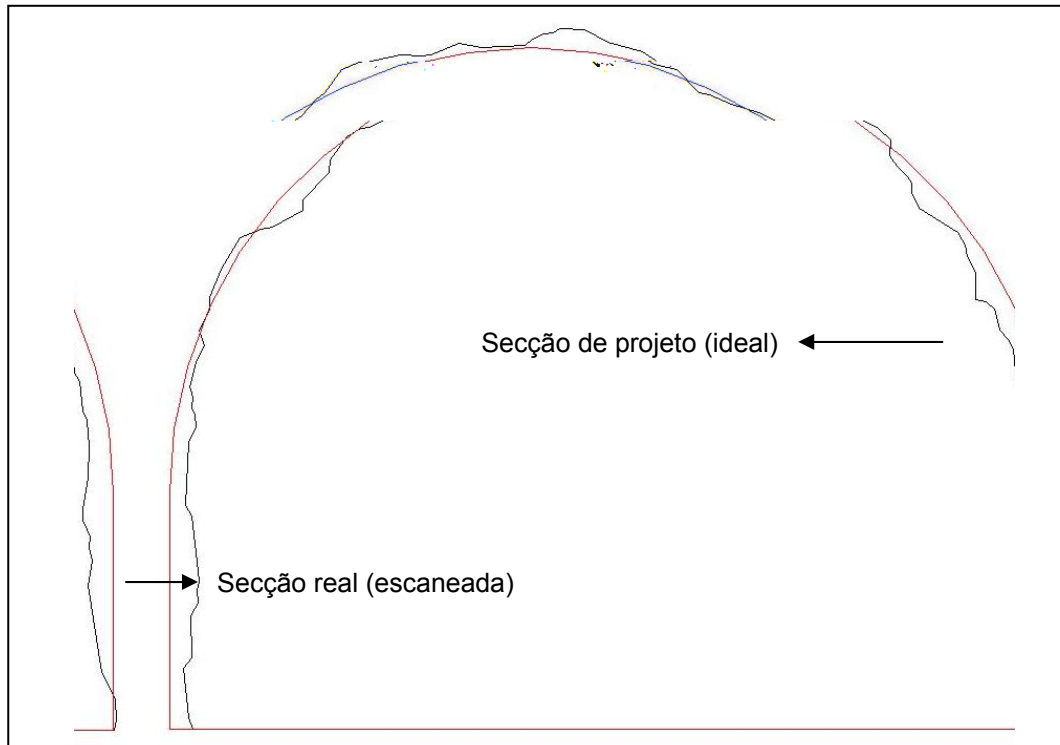


Figura 5.9 – Secções transversais em sistema CAD 2D, comparando o projeto com o real escaneado

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.

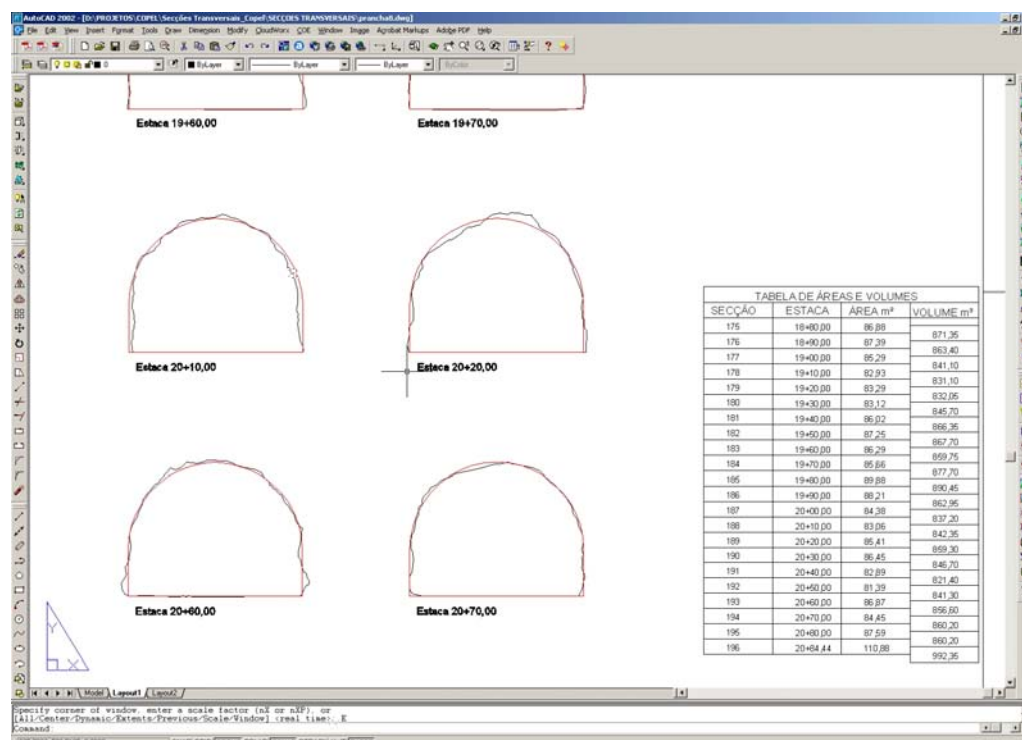


Figura 5.10 – Secções transversais em sistema CAD 2D, comparando o projeto com o real escaneado

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.

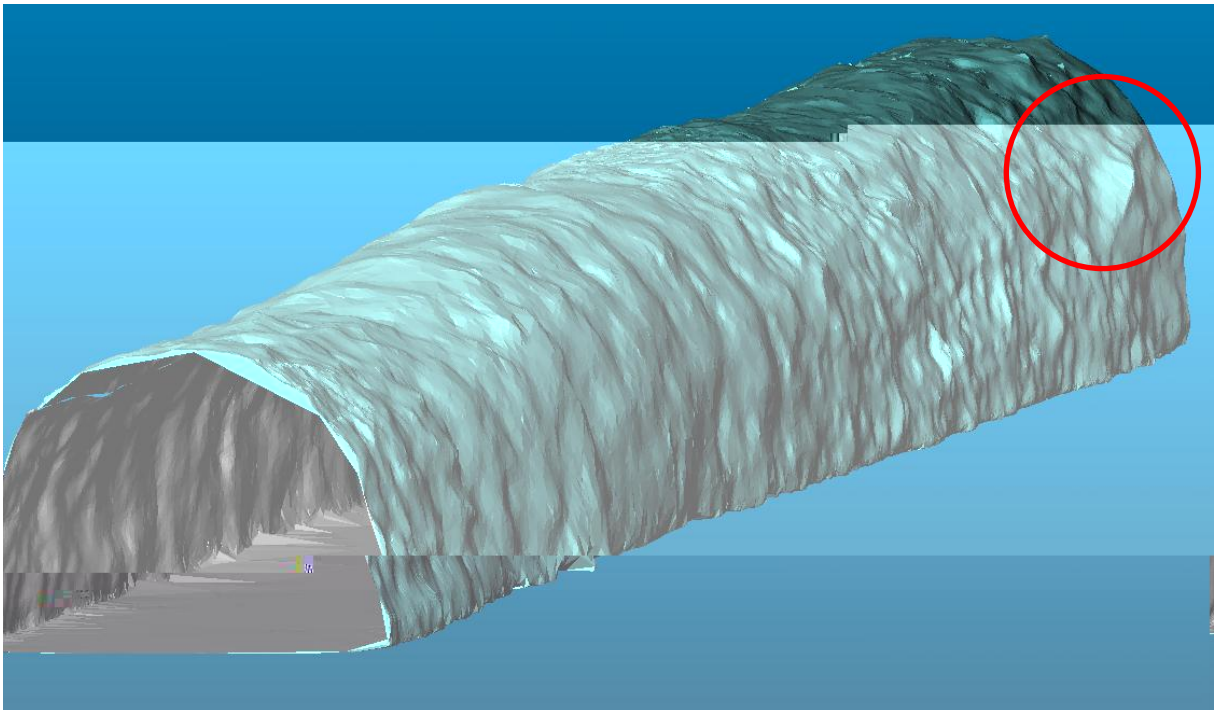


Figura 5.11 – Triangulação de Delaunay aplicada sobre a nuvem de pontos.

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.

## 6. PLANTAS INDUSTRIAIS

A complexidade de projetos de unidades industriais torna desafiadora a tarefa de projetar melhorias operacionais ou mesmo de planejar sua manutenção ou *REVAMP*<sup>1</sup>. Todas essas tarefas passam pelo levantamento do estado atual da obra ou *as-built*, já que ocorrem mudanças com relação ao projetado, ou mesmo não se dispõe das plantas da obra.

Uma maneira de obter dados e documentação com alta confiabilidade para realizar tais tarefas, é através de um levantamento tridimensional que possibilite obter dados para a construção de uma maquete eletrônica da unidade e de plantas de engenharia com informações dimensionais.

Geralmente as plantas industriais, como mostra a figura 6.1, mostram-se desatualizadas ou inexistentes, portanto é necessário fazer um levantamento tridimensional para registrar os componentes da área, ou seja, obter dados suficientes para construir uma maquete eletrônica da obra em questão: Indústria, refinaria, etc.

Essas plantas contêm uma enorme quantidade de componentes que podem ser divididas em grupos conforme a tabela abaixo:

Tabela 6.1: Exemplo de componentes industriais

<b>Tubulações</b>	<b>Equipamentos</b>	<b>Elétrica</b>	<b>Civil</b>	<b>Metálica</b>
Tubos	Tanques	Bandejamento Elétrico	Muros	Escadas
Curvas	Vasos	Tomadas	Piso	Guarda corpo
Válvulas	Torres	Eletrodutos	Apoios de concreto	<i>Pipe Rack</i>

Os componentes de cada grupo não estão limitados aos apresentados na tabela acima, que são uma amostra. Além disso, existe uma quantidade enorme de dados provenientes de cada componente, o que torna atraente a automação de levantamento.

<sup>1</sup> *REVAMP* – O nome que é dado para reparo e manutenção de dispositivos mecânicos ou elétricos, para a execução de ações rotineiras de manutenção e ou manutenção preventiva.

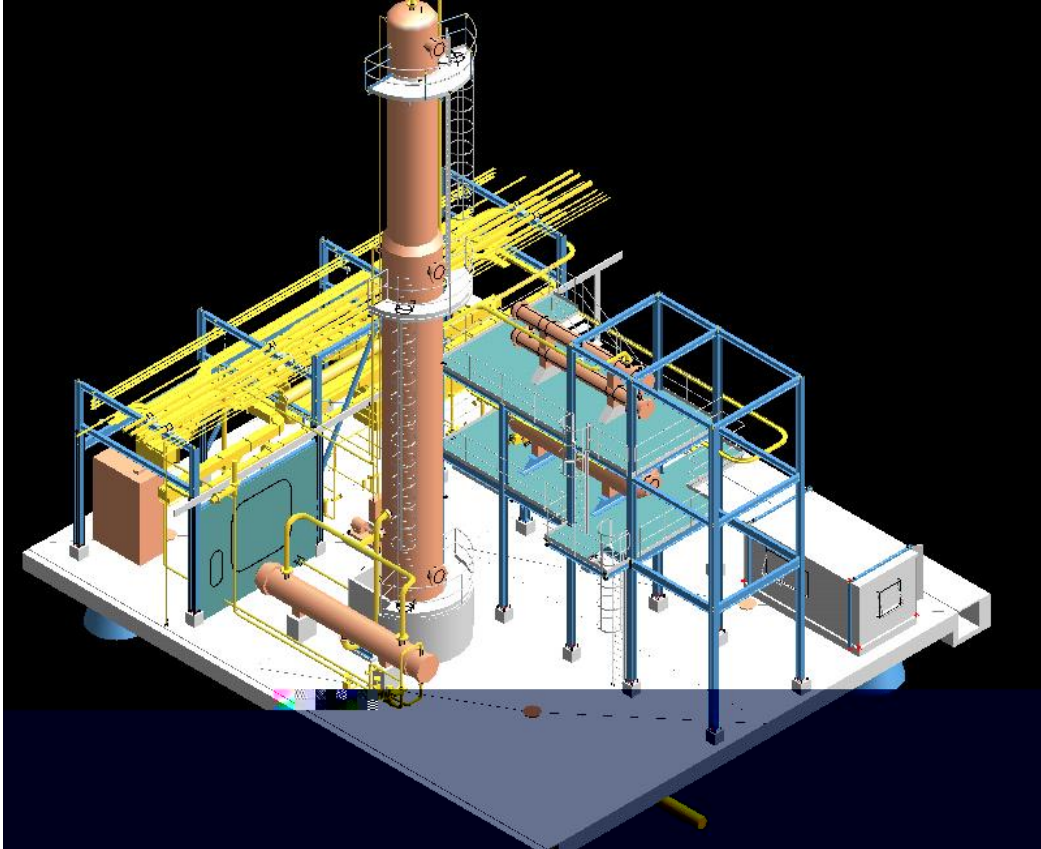


Figura 6.1 – Maquete eletrônica, planta industrial.

### 6.1. Produtos Gerados

A tecnologia Laser Scanner 3D pode ser empregada para gerar diferentes produtos com a finalidade de auxiliar no desenvolvimento e na segurança de plantas industriais.

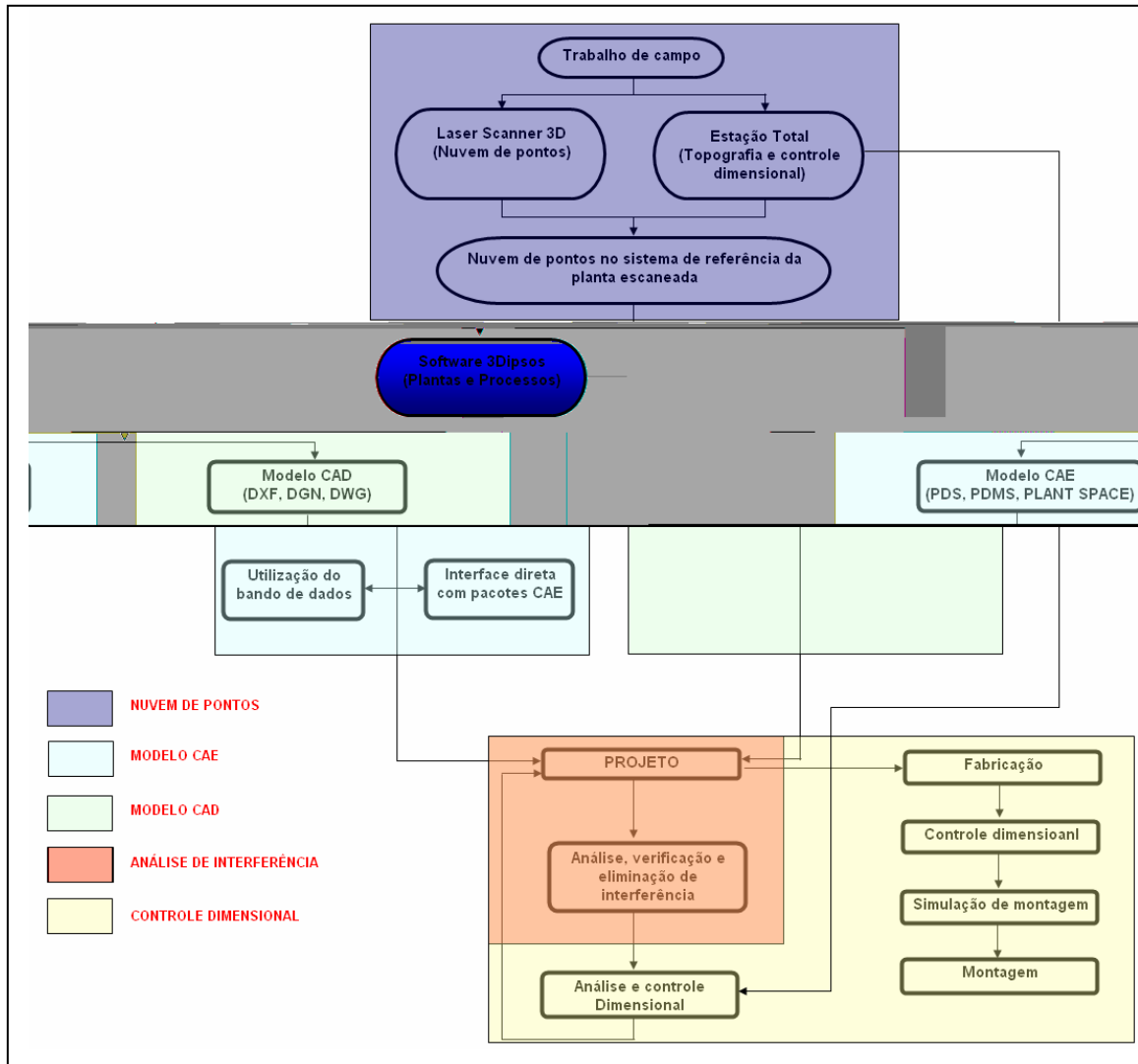


Figura 6.2 – Fluxograma de trabalho e produtos gerados

Basicamente, seguindo o fluxograma mostrado na figura 6.2, em levantamentos industriais com laser scanner 3D, pode oferecer cinco tipos de produtos distintos, mas relacionados entre si:

1. Nuvem de pontos;
2. Análise de interferência;
3. Modelo CAD;
4. Modelo CAE;
5. Controle dimensional.

A nuvem de pontos pode ser conseguida através do levantamento de campo que juntamente, e com o auxílio de uma estação total possibilita referir a nuvem de

pontos ao sistema de coordenadas terrestres da planta. Esse produto pode ser utilizado diretamente para analisar e eliminar interferências em novos projetos.

Com a nuvem de pontos já num sistema de coordenadas conhecido, é possível gerar o Modelo CAE ou modelo CAD a partir da nuvem. Após o levantamento de campo a nuvem de pontos se torna a referência para a criação do modelo geométrico, que consiste na identificação e definição de sólidos que melhor representem os componentes da planta industrial.

O controle dimensional é utilizado como peça chave para a manutenção e instalação de novos componentes em uma planta industrial. Com esse produto dispõem-se dos dados necessários para a fabricação de peças e sua instalação, sem perda de material no processo de fabricação, minimizando soldagens durante a montagem e conseqüentemente minimizando o tempo de parada da planta.

Todos os produtos que podem ser gerados para prover informações à área de processos industriais estão interligados, sendo que para cada tipo de necessidade pode ser gerado um tipo de produto diferente. A seguir são analisados com mais detalhes esses produtos.

#### **6.1.1. Nuvem de Pontos e Análise de interferências**

Gerar a nuvem de pontos é o processo inicial para qualquer tipo de levantamento utilizando a tecnologia Laser Scanner 3D, mas dependendo da aplicação esses dados já são suficientes, constituindo o único produto necessário.

A coleta de informação pode ser feita por qualquer método ou equipamento descrito no capítulo 3. Sua finalidade principal é prover dados para futuros processos de modelagem ou para realizar uma análise de interferência diretamente sobre ela.

Após a coleta da nuvem de pontos, o próximo passo é o processo de consolidação e validação, como apresentado no capítulo 4, ou seja, a nuvem de pontos é utilizada diretamente para o processo de modelagem ou para analisar interferências.

Normalmente as indústrias possuem um sistema topográfico bem definido, no qual todos os projetos ou levantamentos são feitos. Assim, com a nuvem de pontos já referida a esse sistema de coordenadas, é possível utilizá-la para analisar interferências em novos projetos.

Geralmente esse processo é realizado em ambientes CAD/CAE que são capazes de trabalhar com a nuvem de pontos.

A nuvem de pontos é transferida para esse ambiente e sobre ela é possível realizar novas tarefas, analisando em tempo real, possíveis interferências, ou seja, evitando projetar novos componentes em lugares onde já existam outros, minimizando as paradas durante a instalação e economizando material a ser comprado para tal instalação. Da mesma forma evitam-se outros imprevistos como, por exemplo, cortar tubulações, mudar layout do projeto existe ou até mesmo, alterar posicionamento de equipamentos (bombas, tanques, etc.).

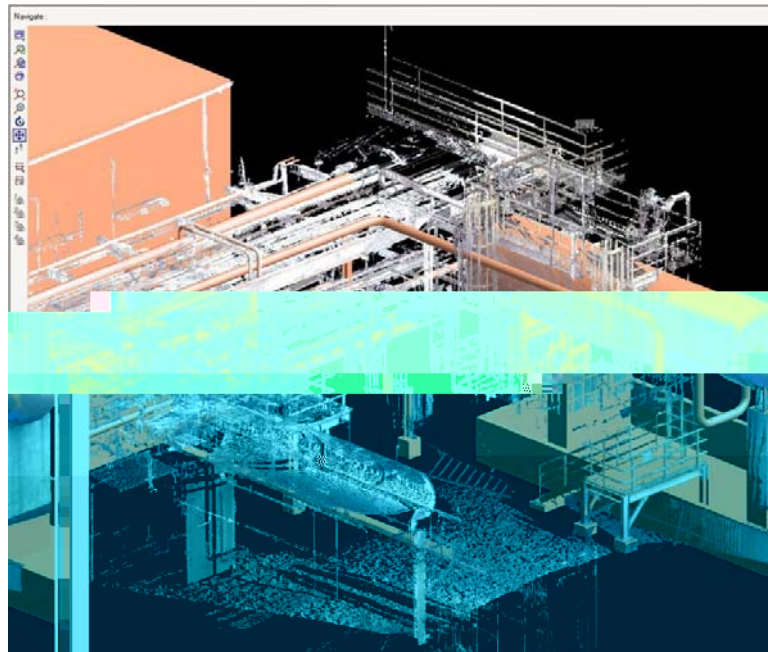


Figura 6.3 – Nuvem de pontos visualizada em no sistema PDMS

A figura 6.3 mostra um exemplo de nuvem de pontos visualizada em um sistema CAE, podendo-se destacar a complexidade de sistemas como esse. Já a figura 6.4 mostra uma ocorrência de interferência, com uma tubulação nova (cor branca) interpenetrando com uma tubulação existente (cor laranja).



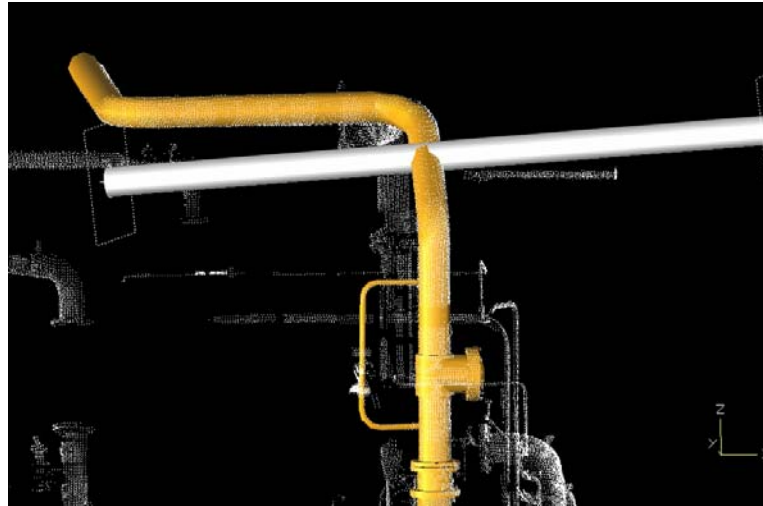


Figura 6.4 – Análise de interferência

A grande vantagem dessa metodologia é a rapidez na coleta de informações necessárias para possibilitar esse tipo de análise, evitando a necessidade do re-trabalho. Isso também seria possível em outros métodos, mas com muito mais trabalho e intervenção humana, consumindo mais tempo e estando sujeito a erros.

### 6.1.2. Modelo CAD/CAE

Em superfícies complexas, como áreas industriais, o trabalho de campo deve ser desenvolvido com muito cuidado, pois devido à sua estruturação essas áreas apresentam grande densidade de informação a ser coletada, ou seja, geralmente a área é pequena, mas com grande quantidade de equipamentos, tubulações, estruturas metálicas de suportes, etc.

Dependendo do tipo de projeto, esses elementos devem ser levantados por completo, o que demanda um trabalho de campo bem elaborado e executado, pois grandes áreas de sombras (ocultação) podem ser formadas, prejudicando o resultado final do levantamento de campo.

Grande parte das indústrias brasileiras surgiu na década de 70 e são poucas as que mantiveram a sua documentação atualizada, ou seja, não possuem uma documentação que retrate a realidade atual, através de plantas topográficas, plantas de tubulações e outras.

Quando se necessita realizar algum tipo de manutenção ou alteração nessas áreas utilizam-se as plantas existentes, complementadas com levantamento para determinar a sua situação atual (*as-built*).

Uma técnica de levantamento que ainda hoje é utilizada por não necessitar de pessoal altamente qualificado é a utilização de trena e prancheta. Nessa técnica, técnicos projetistas de tubulações vão a campo com prancheta e trena, e visualmente vão mapeando os equipamentos, tubulações, suporte e outros componentes da área. Posteriormente, na posse dos dados levantados em campo, a equipe de escritório faz a transformação dos dados 2D para 3D, inserindo as informações em programas CAD ou CAE 3D. Para que essa planta 2D fosse transformada em uma maquete eletrônica, também é necessário um levantamento topográfico, para que a maquete eletrônica 3D esteja num sistema de coordenadas adequado.

Além de dar suporte à equipe de manutenção das tubulações, a maquete eletrônica é útil para simular novas áreas de montagem, para prevenção de acidentes e principalmente para ter um detalhamento completo dos componentes que estão instalados no local, informando o tipo de material com que foram construídas cada peça, peso, diâmetro nominal das linhas, tipo de equipamentos, capacidade de produção, etc.

Para facilitar as tarefas são necessários programas que consigam trabalhar com todas essas informações dentro de um ambiente CAE. Existem no mercado programas desenvolvidos para tal aplicação, os mais utilizados são: PDMS (Plant Design Management System) e PDS (Plant Design System).

O PDMS, desenvolvido pela AVEVA é um ambiente totalmente integrado com um banco de dados único que gerencia automaticamente gráficos e dados. Isso permite que times de projeto ou de manutenção trabalhem seguros da integridade dos dados e de que a consistência será mantida durante todo o processo. O resultado é a economia de tempo e de custo e a obtenção de um projeto livre de conflitos.

O PDS da INTERGRAPH cria e mantém modelos e bancos de dados precisos. Estes dados permitem criar listas de materiais, isométricos e plantas ortogonais precisas e em formato CAD. Todo o trabalho no PDS baseia-se em catálogos e especificações que padronizam os dados que estão sendo trabalhados. O

PDS permite integração com os fluxogramas de engenharia, carregando os dados de processo diretamente do P&ID<sup>2</sup> durante o processo de modelamento da linha.

Devido à grande funcionalidade de tais programas a integração com a tecnologia *laser scanner 3D* está sendo cada dia mais utilizada. Para ilustrar melhor a aplicação desse equipamento para documentação de plantas industriais, será apresentado um projeto real desenvolvido para essa finalidade.

Esse projeto foi realizado na Refinaria Duque de Caxias (REDUC) da Petrobrás, realizado sob a supervisão do autor desse trabalho.

Esse projeto foi realizado utilizando um equipamento modelo GS100 – Trimble, por uma equipe de campo formada também por dois técnicos agrimensores.

O trabalho de campo foi realizado em 6 horas, com 5 estações de coleta e aproximadamente 10 milhões de pontos coletados.

O objetivo de tal projeto foi obter dados para alimentar o banco de dados do sistema PDMS através dos dados modelados sobre a nuvem de pontos.

O programa utilizado para modelar os dados provenientes de campo foi o 3Dipsos da TRIMBLE, que é capaz de trabalhar juntamente com a nuvem de pontos e o banco de dados do sistema CAE em questão, nesse caso o PDMS.

A primeira etapa após o levantamento de campo foi a consolidação de coordenadas, pois foram 5 estações de coleta, cada uma num sistema distinto de coordenadas. Esse processo consistiu em transformar todos os dados para um sistema de coordenadas único de acordo com o exposto no capítulo 4.

Após a conclusão e validação dessa etapa o próximo passo foi definir o banco de dados a ser utilizado no projeto.

O sistema PDMS é capaz de exportar dados através de arquivos texto com especificações de todos os componentes. Esse arquivo é chamado de SPEC e contém grande quantidade de informações que serão utilizados pelo programa de modelagem da nuvem de pontos.

---

<sup>2</sup> *P&ID - Process and instrumentation diagram* - Diagramas que mostram tubulações e instrumentação de conexão entre unidades de processos em plantas químicas, plantas de energia, tratamento de água e outras.

```

TEXT 'PIPING'

HEADING
NAME TYPE DIAMEXT PBORO MIN LENGTH STYP SHOP CATREF DETAIL MATXT CMPREF BLTREF
DEFAULTS
-----
*/P-XSTRG_15 TUBE 21.3 15.00 50,55 A TRUE /AAPA100DD /AAPA100-SR /ABB /P-XS-15 0
*/P-XSTRG_20 TUBE 26.7 20.00 50,55 A TRUE /AAPA100EE /AAPA100-SR /ABB /P-XS-20 0
*/P-XSTRG_25 TUBE 33.4 25.00 50,55 A TRUE /AAPA100FF /AAPA100-SR /ABB /P-XS-25 0
*/P-XSTRG_40 TUBE 48.3 40.00 50,55 A TRUE /AAPA100HH /AAPA100-SR /ABB /P-XS-40 0

HEADING
NAME TYPE PBORO PBOR3 STYP SHOP CATREF DETAIL MATXT CMPREF BLTREF
DEFAULTS
-----
TRUE
*/ST_20_20 TEE 20.00 20.00 ST TRUE /ABTA530EE /ABTA530-D /LKB /T-T-20 0
*/TOL_20_20 TEE 20.00 20.00 TOL TRUE /BFTY530EE /BFTY530-D /AAO /WOLSTD-20 0
*/TOL_20_15 TEE 20.00 15.00 TOL TRUE /BFTY530ED /BFTY530-D /AAO /WOLSTD-20 0
*/TR_20_15 TEE 20.00 15.00 TR TRUE /ABTA530ED /ABTA530-D /LKB /T-T-20 0
*/TR_25_25 TEE 25.00 25.00 TR TRUE /ABTA530FF /ABTA530-D /LKB 0 0

HEADING
NAME TYPE PBOR1 PBOR2 LENGTH STYP SHOP CATREF DETAIL MATXT CMPREF BLTREF
DEFAULTS
-----
TRUE
*/ER_20_15 REDU 20.00 15.00 - ECC TRUE /OONEE0SED /OONEE0S-D /ABA /SN-160-20 0
*/CR_20_15 REDU 20.00 15.00 - CCNC TRUE /OONSE0SED /OONSE0S-D /ABA /SN-160-20 0
*/ER_25_15 REDU 25.00 15.00 - ECC TRUE /OONEE0SFD /OONEE0S-D /ABA /SN-160-25 0

HEADING
NAME TYPE PBOR1 STYP SHOP CATREF DETAIL MATXT CMPREF BLTREF
DEFAULTS
-----
*/BFRF_15 FLAN 15.00 FB FALS /AAFBB0D0 /AAFBB0D-D /LKB /FB-A-15 /ISBD
*/FRF_15 FLAN 15.00 SCRD TRUE /AAFTB0DD /AAFTB0D-D /ABB /FS-A-15 /ISBD
*/BFRF_20 FLAN 20.00 FB FALS /AAFBB0E0 /AAFBB0D-D /LKB /FB-A-20 /ISBE
    
```

Figura 6.5 – SPEC PDMS em formato DATAL

A figura 6.5 mostra uma parte de uma SPEC exportada do PDMS. Essa tabela relaciona os vários tipos de componentes existente no banco de dados do PDMS e suas características, como, mostrado na figura 6.6.

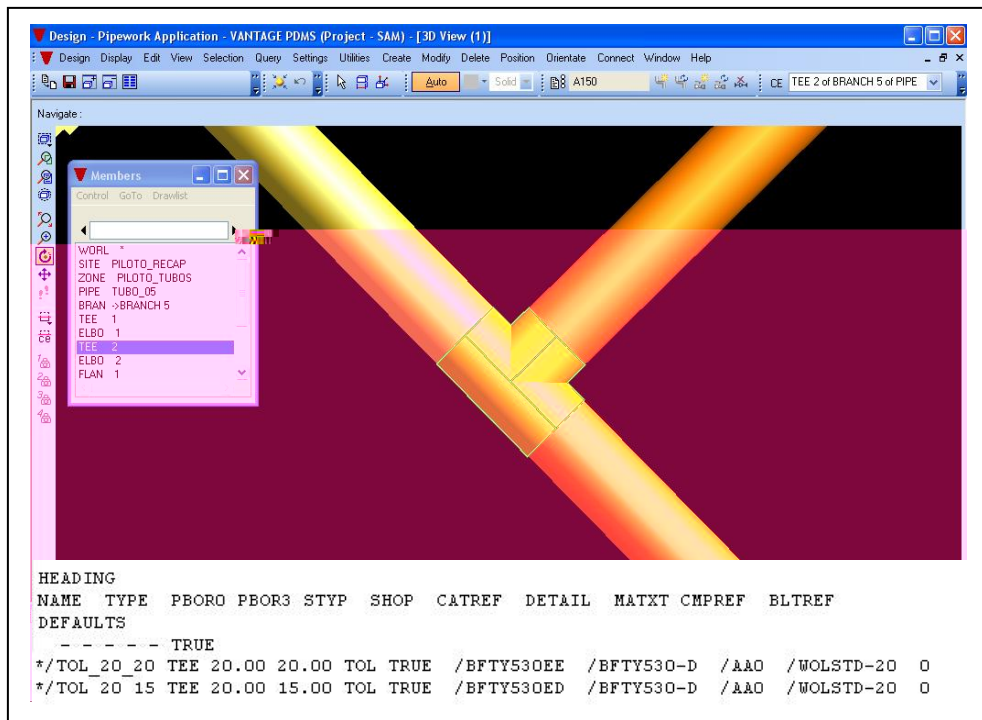


Figura 6.6 – Componente industrial (TEE)

Essa figura mostra detalhes do componente TEE, com suas informações de especificação (SPEC). A tabela mostrada abaixo do componente na figura 7.6 mostra o código de referência (campo NAME), o tipo (campo TYPE), os diâmetros nominais de entrada e saída (campo PBOR0 E PBOR3), a sigla que irá representar esse componente no sistema (campo STYPE). Os demais dados referem-se à listagem de material (campo MATXT), tipo de parafuso que irá dar suporte a esse componente (BLTREF). São mostradas também informações adicionais como seu código de referência no catálogo, etc.

Para que se possa modelar a nuvem de pontos com informações adicionais do banco de dados do sistema PDMS é necessário realizar a importação da SPEC para dentro do programa de modelagem, nesse caso o 3Dipsos.

Essa etapa é relativamente simples, pois basta importar esse arquivo para dentro do programa através de comandos do menu principal. É possível trabalhar com diversas SPEC's ao mesmo tempo, pois uma mesma unidade industrial contém várias especificações diferentes, sendo que para cada tipo de especificação um tipo de SPEC deve ser utilizado.

Após a importação ter sido concluída com sucesso a próxima etapa é iniciar a modelagem utilizando as SPECs carregadas.

Sempre que se está trabalhando em áreas industriais é necessário utilizar como base de dados a documentação (plantas e fluxogramas de processo) já existente, que na maioria das vezes não está atualizada.

Esses documentos são utilizados para agregar informações à nuvem de pontos, pois além do posicionamento preciso dos componentes é necessário saber algumas características de material, por exemplo, de uma determinada linha de tubulação. São utilizados também para evitar que ocorram erros grosseiros no processo de modelagem, como no exemplo a seguir.

Se uma tubulação possuir isolamento externo o trabalho de campo coletará a geometria total e não da tubulação. Dispondo de plantas e/ou fluxogramas é possível saber qual o diâmetro nominal da linha e assim, durante a modelagem, gerar o modelo geométrico excluindo as informações (espessura) do isolamento.

Utilizando as especificações do sistema PDMS e ferramentas do programa de modelagem é possível gerar um modelo geométrico já com informações do banco de dados, assim quando o produto final for aberto dentro do sistema CAE/PDMS esse já possuirá toda a relação da geometria dos componentes com o banco de dados.

A primeira etapa do processo de modelagem é a segmentação, ou seja, agrupar através de ferramentas de edição, a nuvem de pontos por entidades (cilindros, caixas, toro circular, pirâmide, esfera, etc.).

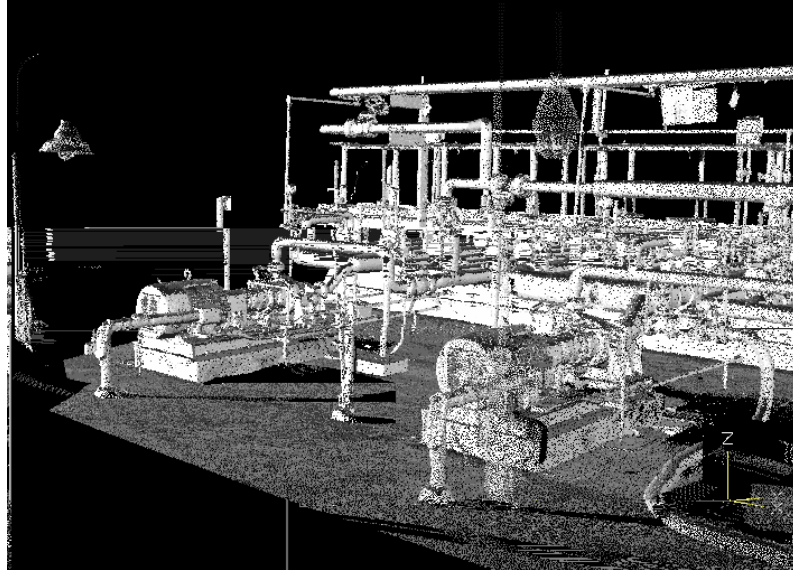


Figura 6.7 – Nuvem de pontos do local do projeto

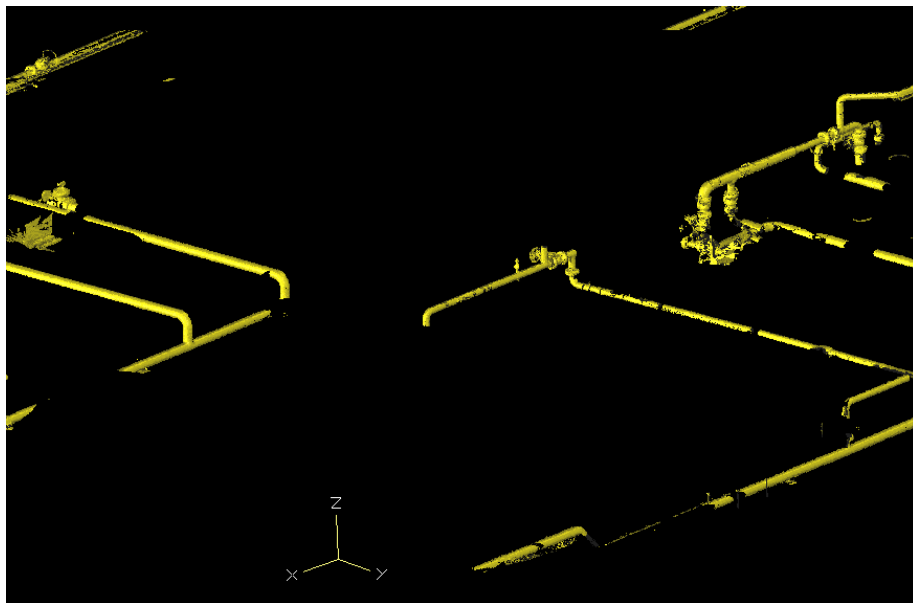


Figura 6.8 – Nuvem de ponto correspondente à tubulação segmentada em partes.

As figuras 6.7 e 6.8 mostram, respectivamente, a nuvem de pontos completa e uma tubulação subdividida em várias partes, com a finalidade de auxiliar no processo de modelagem.

Feita a segmentação, a próxima etapa é modelagem propriamente dita. O programa usa informações simultâneas da nuvem de pontos e da SPEC que está sendo utilizada, como se vê na figura 6.9:

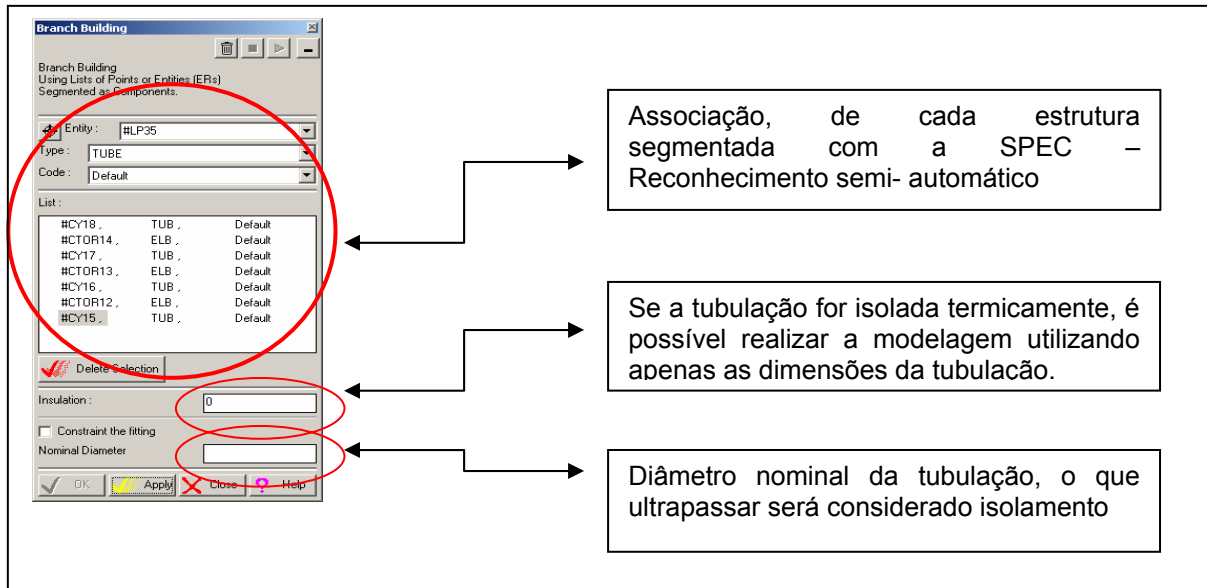


Figura 6.9 – Ferramentas de ligação do modelo geométrico com o banco de dados do sistema CAE

Essa ferramenta, exemplificada na figura 6.9, é capaz de reconhecer a geometria que aquele segmento de nuvem de pontos representa e procurar na tabela de especificação (SPEC) qual entidade ela representa. Isso é possível, pois outros dois campos devem ser preenchidos informando ou o isolamento térmico da linha (se existir) ou o diâmetro nominal (caso haja documentos de referência). Em alguns casos não se tem nenhum tipo de informação para auxiliar a modelagem, nesse caso o programa reconhece a geometria da nuvem de pontos, e através dos métodos dos mínimos quadrados encontra um diâmetro aproximado; com essa informação o programa faz uma busca na SPEC para encontrar o componente que mais se aproxime do diâmetro em questão. Encontrando essa informação, o resultado é considerado como correto, finalizando a modelagem de tal nuvem de pontos.

O ideal é trabalhar sempre com documentos (plantas e fluxogramas), pois podem ser cometidos erros grosseiros no processo de modelagem. Por exemplo, se uma determinada linha tem o diâmetro nominal de 6 polegadas, e o programa encontra um diâmetro nominal que se aproxime mais de 7 polegadas, o programa irá associar erradamente a informação do banco de dados a essa geometria.

Tabela 6.2: Reconhecimento de primitivas e ligação com o banco de dados

Geometria	Diâmetro nominal	Componente	PDMS
Cilindro (CYL)	8.00"	Tubulação	TUBE – 8"
Toro Circular (CTOR)	8.00"	Curva de 90°	ELBO – 8" (STYPE – CUNO)
Snout (SNOU)	8.00" para 4.00"	Redução	REDU – 8" (STYPE – REC)

A tabela acima mostra uma relação simples que o programa é capaz de fazer, utilizando a geometria encontrada (por exemplo: CTOR), com diâmetro nominal de 8 polegadas, associando ao banco de dados o STYPE – CUNO, significando que foi encontrada uma curva de 90° de 8 polegadas de diâmetro.

A figura 6.10 mostra o mesmo componentes (Elbow) no programa PDMS, obtido através da nuvem de pontos e informações da SPEC.

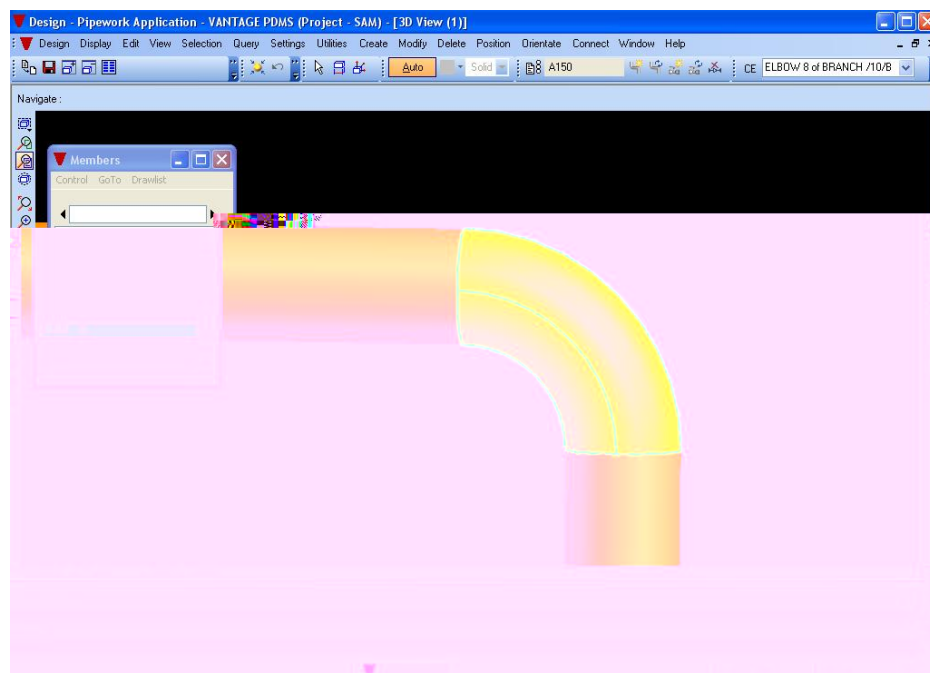


Figura 6.10 – Componente industrial (Elbow)

Toda a modelagem de tubulações é feita dessa maneira, até que se consiga associar toda a geometria da nuvem de pontos a informações do banco de dados do sistema PDMS.



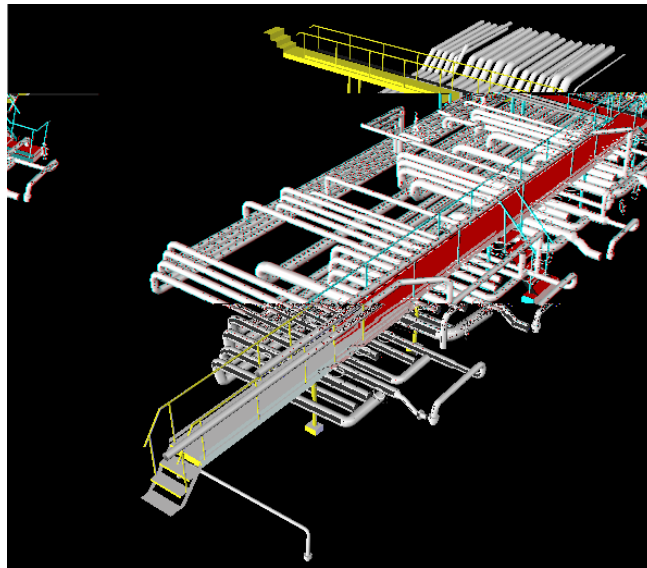


Figura 6.11 – Maquete eletrônica antes da exportação

A figura 6.11 mostra toda a modelagem finalizada no programa 3Dipsos e pronta para ser exportada para o sistema PDMS. Se alguma inconsistência for encontrada durante a exportação, a mesma é interrompida. Esses problemas podem ocorrer quando a hierarquia dos dados não foi montada de forma correta, ou seja, deve-se gerar a modelagem seqüencialmente, sempre respeitando o sentido de fluxo mostrado nos fluxogramas e diagramas de engenharia.

Outro problema pode ocorrer quando há alguma inconsistência nas tubulações modeladas, ou seja, a tubulação modelada fica associada a informações incorretas do banco de dados. Por exemplo: Suponha-se que uma linha de 12 polegadas contém três segmentos de tubulação e duas curvas de 90°. De um modo simplificado, as informações necessárias, para esse caso seriam as mostradas na tabela abaixo:

Tabela 6.3: Hierarquia para exportação para sistemas CAE

GEOMETRIA	STYPE	DIÂMETRO NOMINAL
CYL	TUBE	12"
CTOR	CUNO	12"
CYL	TUBE	12"
CTOR	CUNO	12"
CYL	TUBE	12"

Se, nos dados da tabela acima, uma das curvas apresentassem um valor diferente, por exemplo, 8 polegadas, o programa acusaria uma inconsistência, pois se sabe que nessa linha não há nenhum tipo de redução; portanto a linha não pode apresentar alterações do diâmetro nominal.

Se a exportação for realizada com sucesso, basta importar o arquivo para dentro do PDMS e realizar alguns ajustes como, por exemplo, conectar todos os ramos, inserir as juntas nos flanges e inserir flanges em válvulas modeladas. Essa edição demanda um tempo não superior a 10% de todo o tempo de modelagem.

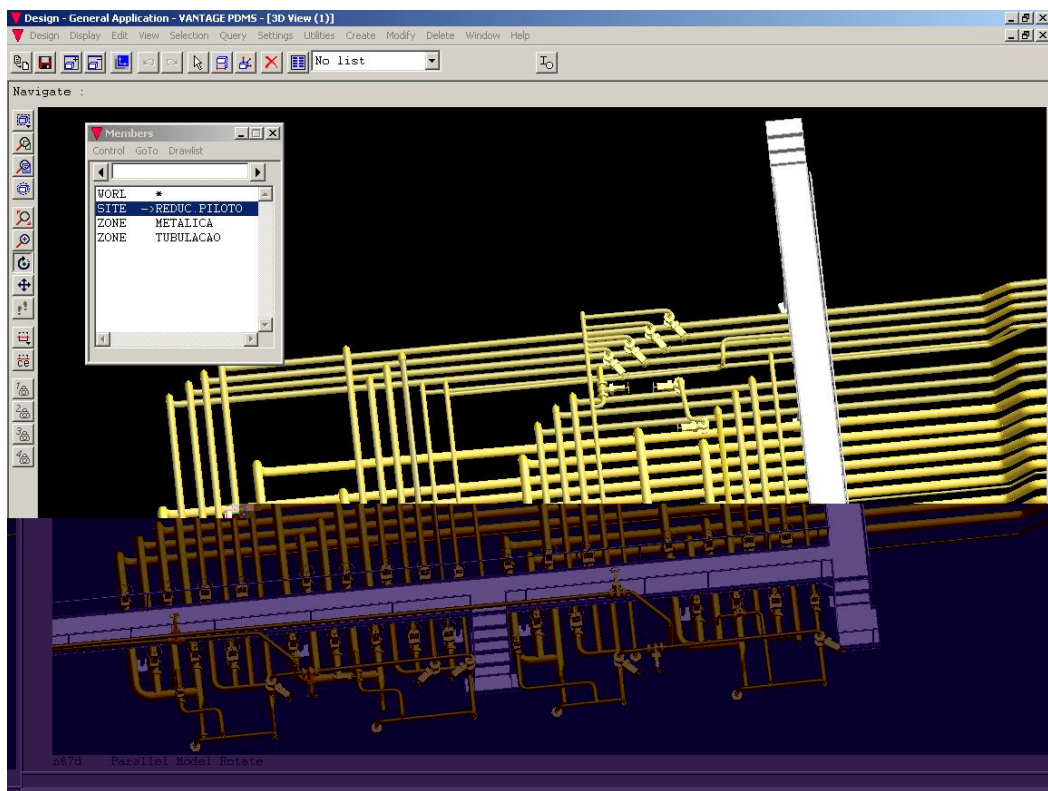


Figura 6.12 – Modelo CAE gerado a partir da nuvem de pontos

Com os dados inseridos corretamente no sistema CAE é possível gerar documentos automaticamente e fazer simulações. Essas ferramentas auxiliam no processo de manutenção da planta industrial, gerando automaticamente os isométricos de construção, relatórios de lista de material para compra e ferramentas de realidade virtual.

O processo de modelagem demorou cerca de 7 dias para ser finalizado, utilizando apenas um operador, trabalhando cerca de 8 horas por dia.

As mesmas ferramentas utilizadas podem ser aplicadas para prover dados para outros sistemas CAE existentes no mercado, como o PDS e o PlantSpace. O procedimento de trabalho é o mesmo descrito acima, incluindo os cuidados a serem tomados. Esses dois programas, concorrentes mercado mundial, apresentam operação e funcionalidades equivalentes.

Utilizando a tecnologia *Laser Scanner* 3D, auxiliada por programas específicos de modelagem, foram necessários 8 dias de trabalho para alimentar o banco de dados do sistema PDMS. Se fosse utilizada outra maneira de gerar essa maquete eletrônica (por exemplo: trena e croqui), a experiência da equipe Petrobrás diz que seriam necessários aproximadamente três vezes mais tempo para gerar o mesmo tipo de produto, com a desvantagem de que todos os dados levantados estariam sujeitos a erros grosseiros.

Para testar e validar os resultados obtidos com a modelagem sobre a nuvem de pontos fez-se a modelagem da mesma área levantada a partir da documentação técnica: plantas, isométricos e fluxogramas de engenharia. Algumas diferenças consideráveis como mostra a figura 6.13. A maior distância encontrada entre as linhas de centro foi de 145 mm. A maioria das diferenças encontradas se deve a flexibilidade da linha.

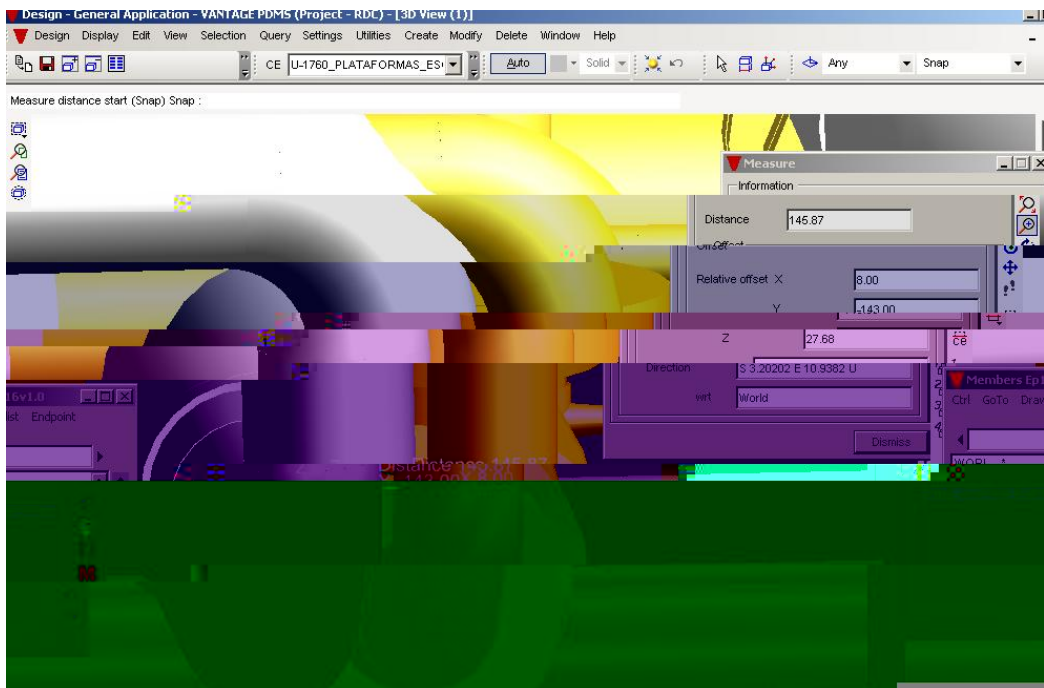


Figura 6.13 – Discrepância entre as linhas modeladas através da nuvem de pontos e pela documentação existente

A figura acima mostra em branco o modelo 3D gerado pela nuvem de pontos e em amarelo a modelagem gerada pelas documentações existentes.

A informação que está sendo utilizada para a modelagem pode gerar modelos 3D incoerentes, pois pode ser que a documentação que está sendo utilizada como referência está desatualizada ou não possui todas as informações necessárias. A nuvem de pontos proporciona dados reais que representam a situação real da área levantada no dia do levantamento, desse modo, todas as informações contidas na área de escaneamento são coletadas e armazenadas, sendo que a modelagem pode ser realizada facilmente com precisão e segurança.

### 6.1.3. Controle Dimensional

O levantamento tridimensional utilizando o *Laser Scanner* 3D também pode auxiliar no processo de montagem, manutenção e controle de componentes em plataformas marítimas de extração de petróleo. Por componente pode-se entender desde pequenas peças até estruturas que exigem o uso de guindastes.

A quantidade de gases, óleos e de outros produtos altamente inflamáveis que correm nas tubulações faz com que as plataformas de extração de petróleo sejam consideradas de alto risco, havendo possibilidade de explosão caso não se tomem cuidados rigorosos. Processos considerados simples como, por exemplo, troca de *spool*<sup>3</sup>, torna-se perigoso e por isso necessita grande atenção. O número de soldas e de cortes durante a manutenção deve ser minimizado, para evitar que ocorram faíscas.

Para a troca de um componente de um *spool* ou mudança de *layout* o procedimento padrão sempre foi o mesmo, só mudando as técnicas de levantamento e de validação. É necessário um primeiro levantamento para obter informações dimensionais que são necessárias para a construção dos novos componentes. Um segundo levantamento deve ser feito após a peça estar pronta para o embarque. O último passo é a instalação do componente na planta industrial.

---

<sup>3</sup> Pequenos sistemas de tubulações com um ou mais componentes, que fazem parte de processo químico da planta industrial e através do qual fluem gases e líquidos.

A etapa de instalação é a mais crítica, pois se a nova tiver sido construída adequadamente poderá não se encaixar, exigindo uma série de cortes e soldas, indesejáveis, para que a peça seja instalada com sucesso.

Outro problema é a interferência que o novo componente, principalmente os de grande porte podem causar durante a instalação. Para a sua instalação é necessário realizar um estudo prévio de toda a área, para saber onde os guindastes serão estacionados. Em alguns casos ouineo umamudança de

too o local; assim é

analisar possíveis interferências. Os pontos coletados com a estação total fornecem informações dos pontos específicos para auxiliar na construção do novo *spool*.

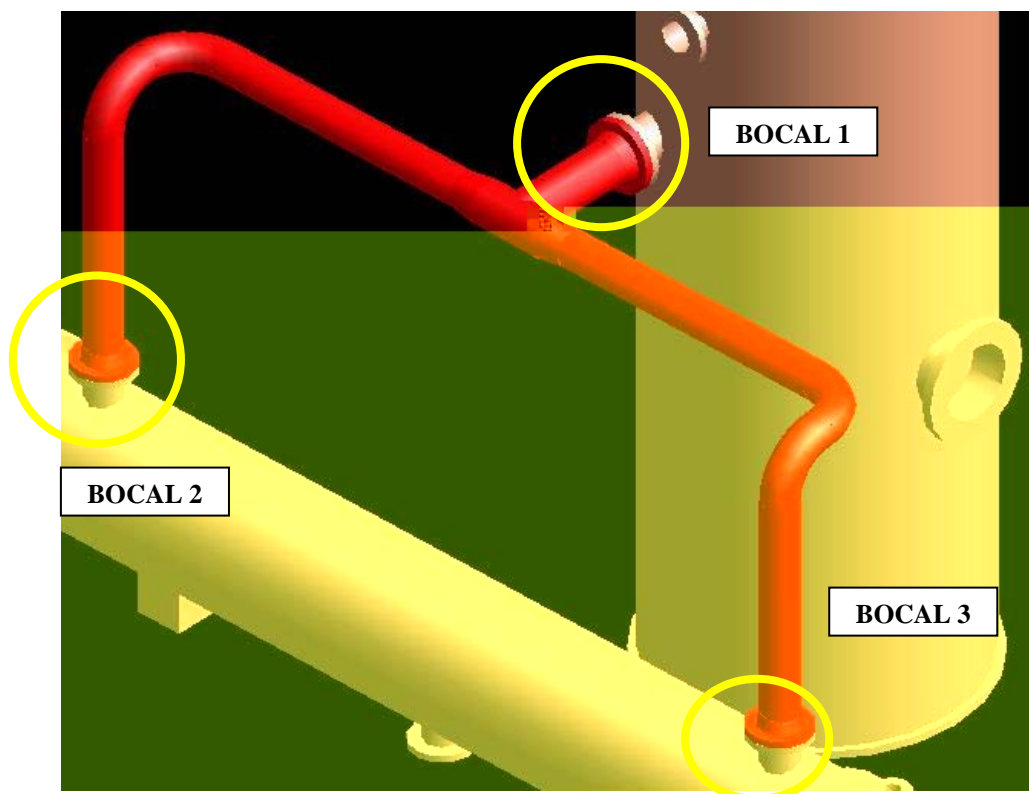


Figura 6.14 – Bocais de conexão de um Spool

A figura 6.14 ilustra um *spool* com três pontos de conexão (bocais) a dois equipamentos.

O levantamento topográfico deve ser feito com grande atenção aos bocais. Esse levantamento é feito utilizando técnicas de intersecção a ré, também conhecida como problema dos três pontos ou estação livre, descritos no capítulo 4. Esse levantamento é utilizado para que não haja propagação de erros em mudança de estação.

São levantados pontos nas faces dos bocais de conexão, no mínimo três em cada bocal; desse modo é possível definir a inclinação dos eixos Z e Y. Devem ser coletados pontos nas faces dos parafusos para definir os parâmetros em torno do eixo X.

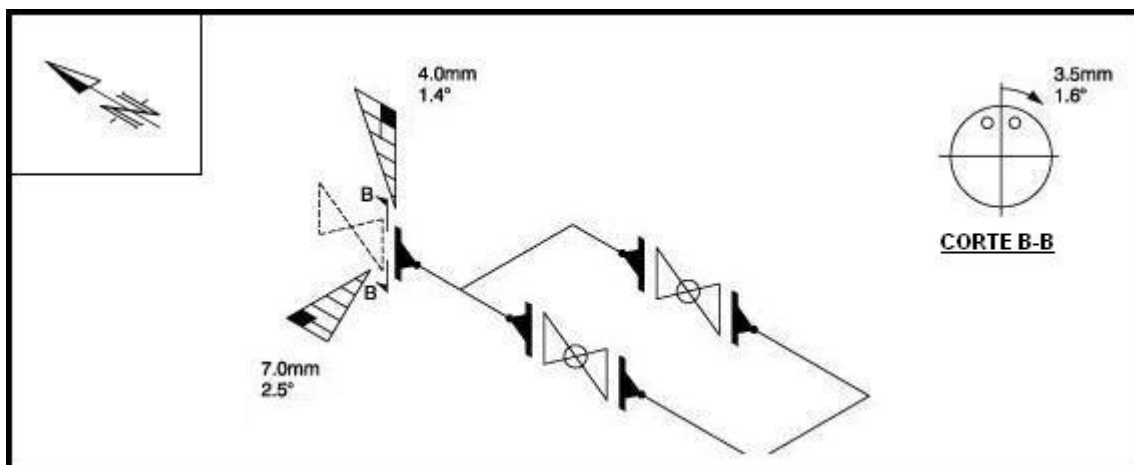


Figura 6.15 – Documento com informações de inclinação e rotação de Tie-ins

Essas informações podem ser apresentadas graficamente de acordo com a figura 6.15, onde estão informadas as inclinações e rotações dos bocais. Essas são enviadas, juntamente com as dimensões do componente que foi modelado a partir da nuvem de pontos, para o processo de construção. A construção do novo *spool* é feita de acordo com a realidade encontrada no levantamento, fazendo com que o processo de montagem seja realizado com rapidez, segurança e economia.

Para validação, um novo levantamento topográfico deve ser realizado após a construção antes do embarque do componente. Desse modo garante-se que a montagem do *spool* será realizada com sucesso e rapidez.

A nuvem de pontos pode ser utilizada nessa etapa, chamada de pré-montagem, pois como se tem informações ao redor do local da montagem, pode ser feito um pré-estudo, verificando em quantas partes o novo *spool* deverá ser cortado, através da análise de interferências, evitando assim possíveis cortes e soldas na plataforma. Pode-se também verificar onde deverão ser colocados os guindastes que irão auxiliar o processo, fazendo com que o tempo de parada seja mínimo.

Esse levantamento deve ser feito com uma estação total, pois a nuvem de pontos gerada pelo equipamento *Laser Scanner 3D* pode conter ruídos, causando dúvidas no processo de coleta de informações a para construção, como será apontado no ANEXO A através de estudos feitos por BOEHLER et al., 2004, GORDON et al., 2004.

Com todo o *spool* construído e validado, a instalação pode ser feita sem que o tempo de parada seja grande, minimizando custos e aumentando a segurança em plataformas.

## PARTE III – TESTES

### 7. TESTES DE PRECISÃO E QUALIDADE

Para verificar a precisão do equipamento GS200 da Trimble, usado no presente trabalho, foram realizados quatro testes, todos realizados nos pilares da raia olímpica localizados na Universidade de São Paulo (Figura 7.1)



Figura 7.1 – 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 abaixo em conformidade com o catálogo do fabricante.



Tabela 7.1: 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 <sup>4</sup> – 99%						

A seguir, na figura 7.2, apresenta-se de forma gráfica os valores da tabela 7.1.

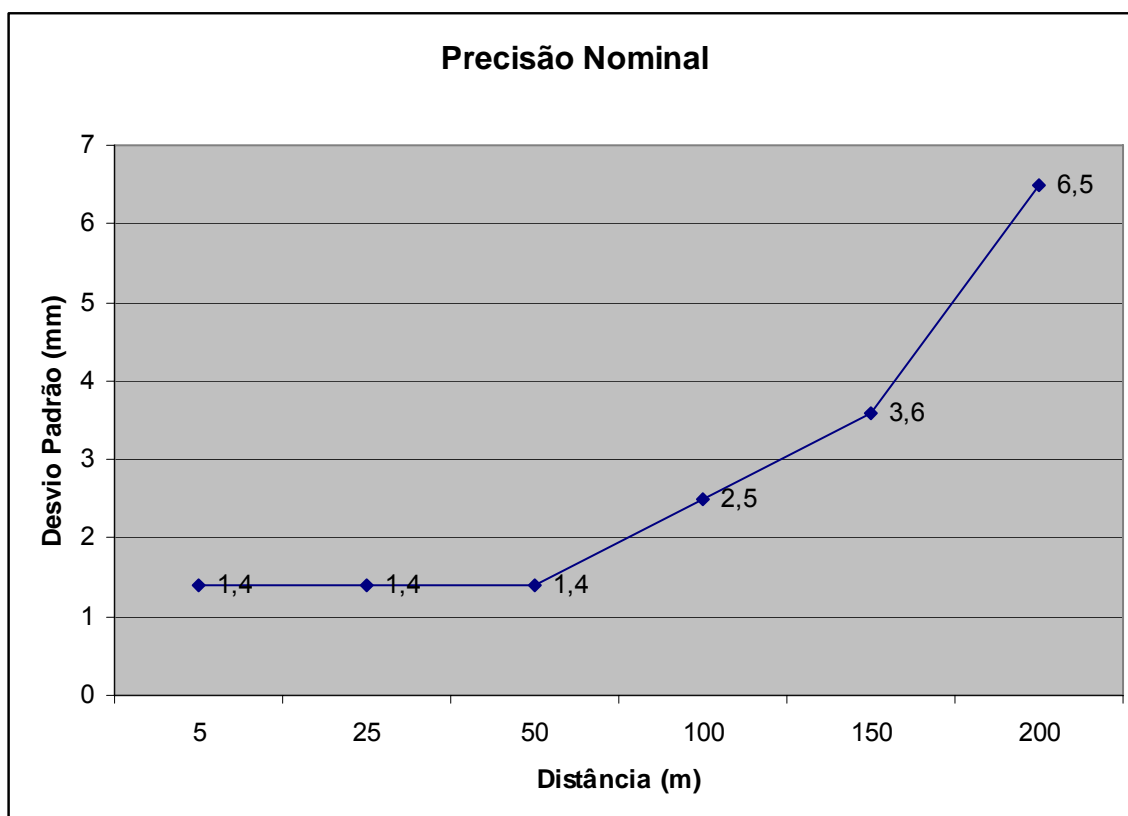


Figura 7.2 – Precisão nominal do equipamento utilizado

### 7.1. 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.

<sup>4</sup> 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 7.3



Figura 7.3 – 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 gerados as distâncias oficiais dessa base, que constam na coluna DI-2002 da tabela 7.2.

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 7.2

Tabela 7.2: 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 7.3: Resultados estatísticos – TESTE 1

<b>ERRO MÉDIO</b>	-0.0009 m
<b>ERRO MÁXIMO</b>	0.0033 m
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0.0026 m

Pode-se concluir das diferenças da tabela 7.2 e do resumo da tabela 7.3 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).

## 7.2. 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 7.4.

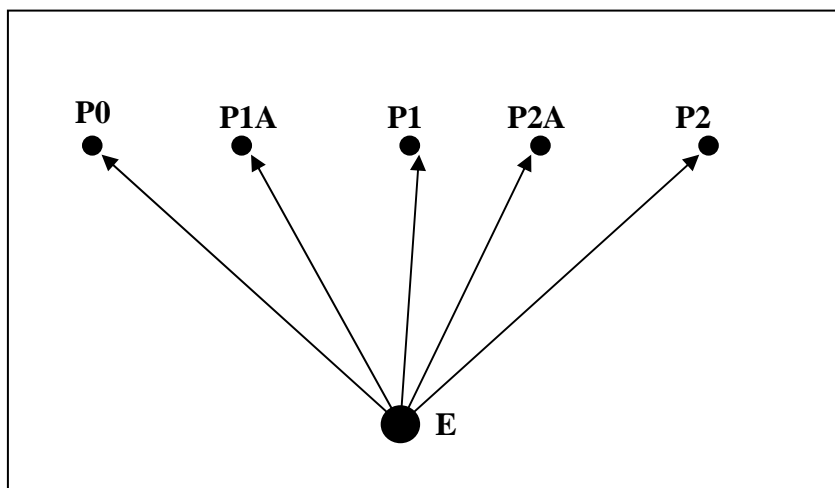


Figura 7.4: Esquema gráfico do levantamento do Teste 2

Para esse teste, o equipamento foi instalado fora do alinhamento dos pilares (posição E), como mostram as figuras 7.4 e 7.5, onde se vê o equipamento e pilares escaneados

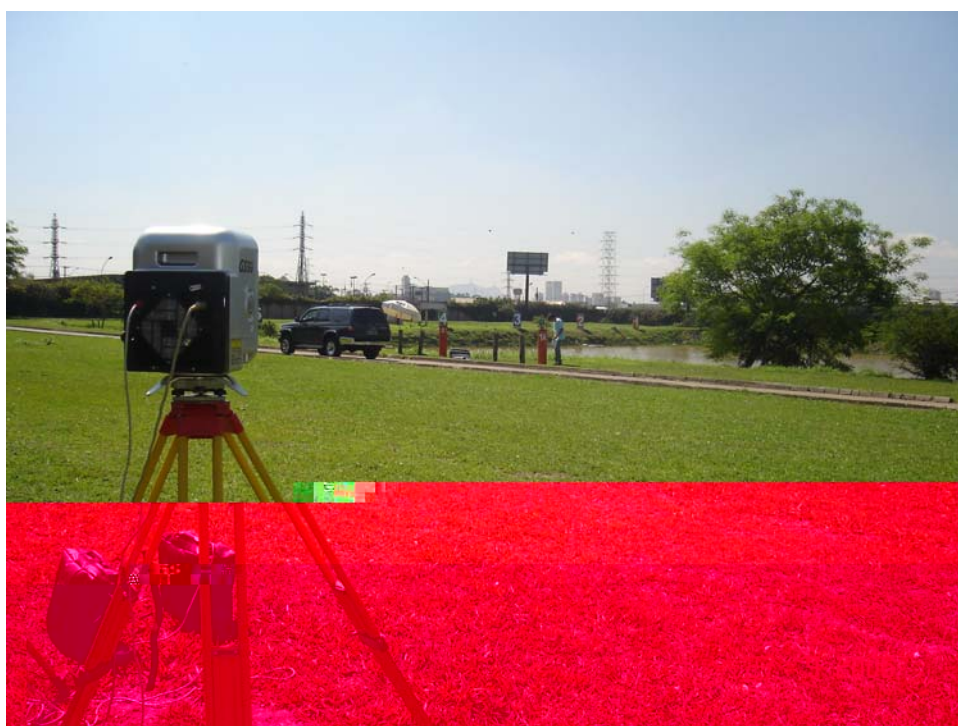


Figura 7.5 – Realização do segundo teste – USP

Dessa forma, foi feito o escaneamento dos alvos planos instalados sobre os mesmos pilares do teste 1, obtendo-se os dados da tabela comparativa 7.4, sendo que as distâncias são fornecidas pelo programa, mediante solicitação do operador, clicando sobre os pontos (alvos) de interesse.

Tabela 7.4: 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.

### **7.3. 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 otimizados 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 7.6. Essa posição E foi variando de E1 a E4, como se faz em caminhamentos.

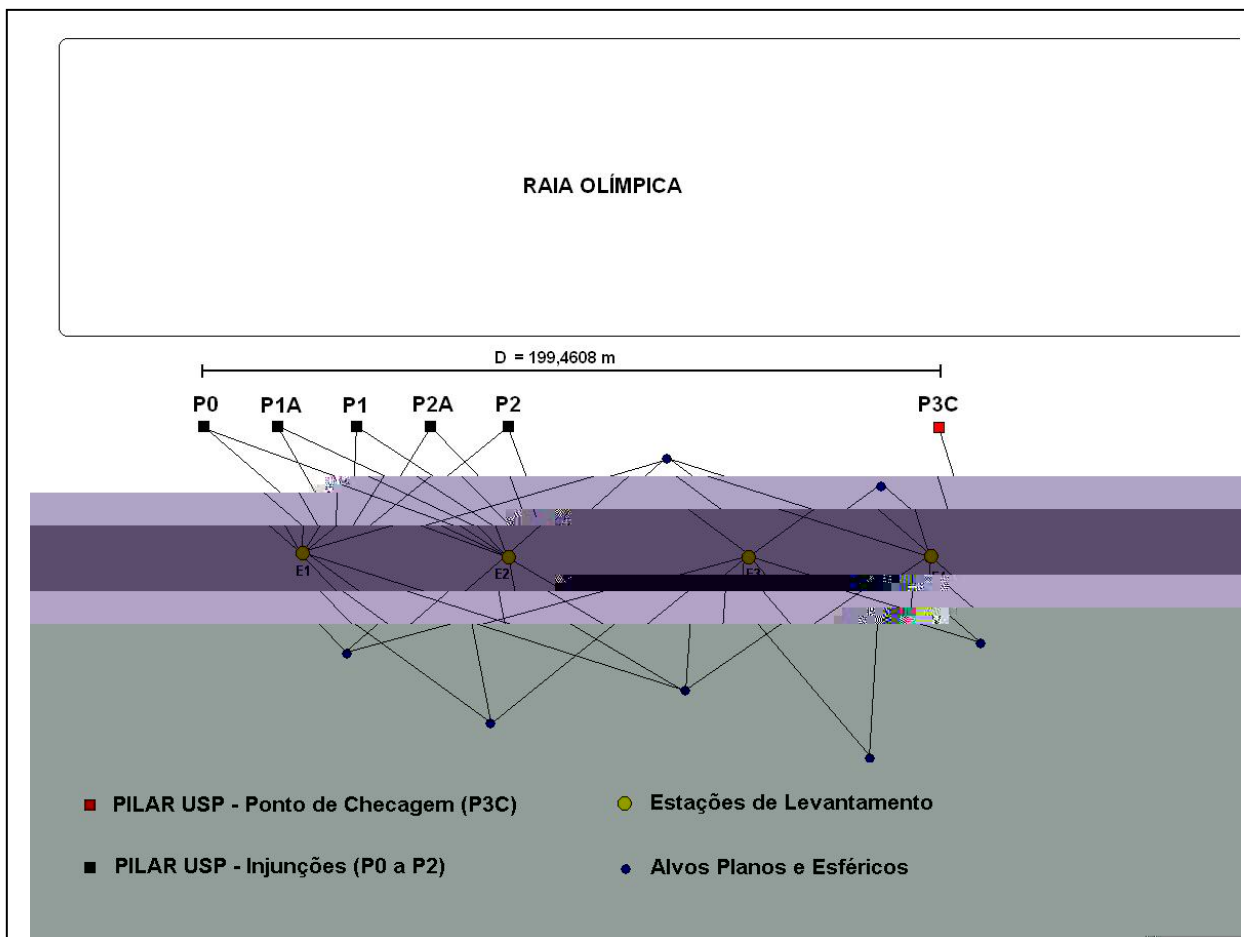


Figura 7.6 – Esquema gráfico do levantamento

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 7.6.

Dessa forma foi possível determinar a precisão alcançada, ao final do trajeto, pois o levantamento foi iniciado visando pontos (pilares) de coordenadas conhecidas e finalizada em outra 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 de 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 7.5: Resultados estatísticos – Alvos Planos

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

Tabela 7.6: Resultados estatísticos – Alvos Esféricos

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

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

- a) Utilizando alvos esféricos obtiveram-se resultados sensivelmente melhores em Y e Z e resultados similares em X;
- b) 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.
- c) 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.

- e) Os novos equipamentos *Laser Scanner* 3D incluem novas funções, incorporando recursos de Estação Total. Alguns testes deverão ser realizados para verificar tais funções.

#### 7.4. 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 7.6, 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 7.4. 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 B. As coordenadas utilizadas figuram na tabela 7.7, o resultado das distâncias encontra-se na tabela 7.8 e as coordenadas resultantes, com suas precisões, são mostradas na tabela 7.9.

Tabela 7.7: 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 7.8: Distâncias dos Pilares à Estação de escaneamento

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

Tabela 7.9: Coordenadas Ajustadas

<b>Estação E (Laser Scanner)</b>		
<b>E</b>	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.

## 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente dissertação apresentou um breve descritivo da evolução dos equipamentos topográficos até o desenvolvimento do *Laser Scanner* 3D, mostrando 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 precisão, alta densidade de pontos levantados, pouco tempo necessário para adquirir essa 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 deve ser utilizada). Dessa forma, essas fases foram descritas no presente trabalho, no qual se inclui também uma metodologia de levantamento de campo que pode ser útil para diversos usuários, sendo que, talvez, alguns passos mostrados devam ser adaptados para outras aplicações não relatadas nesse trabalho.

A metodologia apresentada foi desenvolvida ao longo da presente pesquisa e aplicada a mais de 15 projetos ao longo de 3 anos. 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. Conseguiu-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.

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 para duas finalidades principalmente por dois motivos: segurança e economia.

A metodologia empregada na atualização de dados de sistemas CAE, como exemplificado na presente dissertação, é apenas uma das diversas possibilidades de trabalho.

O método também já está validado e vem sendo muito utilizado dada a grande demanda por projetos dessa natureza.

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.

Para atender à precisão requerida (maior que no caso de túneis, ou seja, na casa do milímetro), o usuário escolher um equipamento que atenda a essas condições, tendo em conta a precisão nominal e o alcance.

Em alguns casos é necessário o auxílio de uma estação total (no caso de controle dimensional), pois apesar de uma boa precisão nominal a nuvem de pontos levantada pode apresentar muitos ruídos, prejudicando o processo de escritório e consequentemente o resultado final.

Além disso, a precisão pode e deve ser controlada pelas dimensões conhecidas dos objetos da planta, como por exemplo, o diâmetro de tubulações e distâncias entre as estruturas de concreto.

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, como por exemplo, aplicações de arqueologia, restauração histórica, arquitetura, modelagem digital de terreno, criminologia e outros.

## 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

Dependendo do tipo de estrutura que se está levantando, o retorno do pulso laser pode se deteriorar, ou seja, o resultado do escaneamento pode ser falho devido ao não retorno do sinal. Isso ocorre devido ao grau de reflectância de cada objeto.

Gordon et al, 2001, utilizaram o Laser scanner HDS 2400, para testes de reflectância de alguns objetos mostrando que para determinados tipos de materiais esse equipamento não conseguia obter informações devido ao comprimento de onda do pulso laser e a resposta espectral de certos materiais.

Para tal teste, foi utilizado, além do equipamento laser scanner, um espectrômetro de mão modelo Ocean Optics ST1000O. Utilizando esse equipamento criou-se uma biblioteca de assinaturas espectrais de quatro materiais:

- Concreto;
- Argamassa;
- Tijolo vermelho;
- Alvo plano verde.

Foi escaneada uma cena que continha esses quatro materiais, e posteriormente fez-se uma avaliação do resultado

A figura 8.3 mostra a cena que foi escaneada especialmente para esses estudos. Percebe-se que houve alguns locais onde o equipamento não conseguiu coletar informações devido à resposta espectral desses componentes.

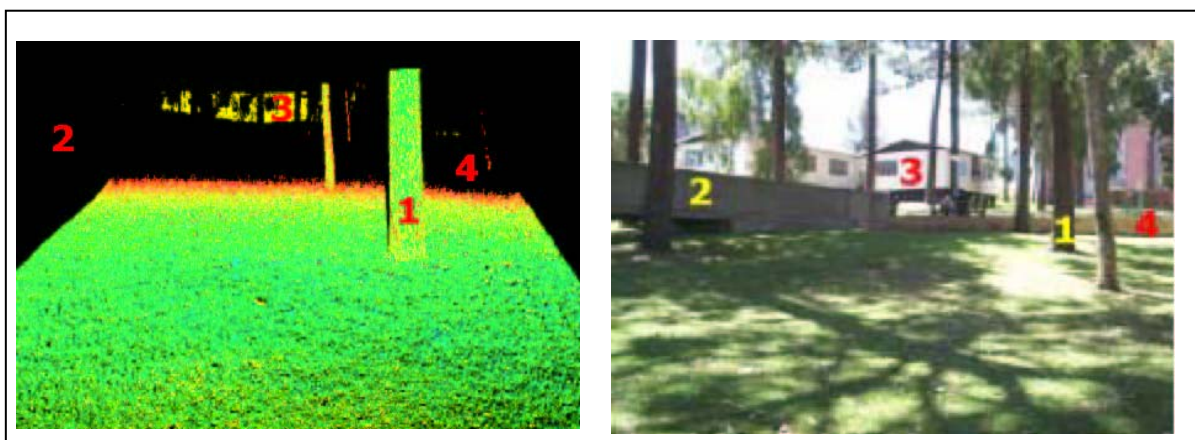


Figura A.1 - Nuvem de pontos e fotografia do mesmo local

Fonte: Gordon et al, 2001.

Verificando e comparando a cena escaneada com uma fotografia do mesmo local, percebe-se visualmente que alguns objetos não foram levantados ou o sinal retornado é deficiente e fraco.

Aprofundando na questão, Gordon et al, 2001 criaram as curvas espectrais dos materiais, como mostrado da figura A.2.

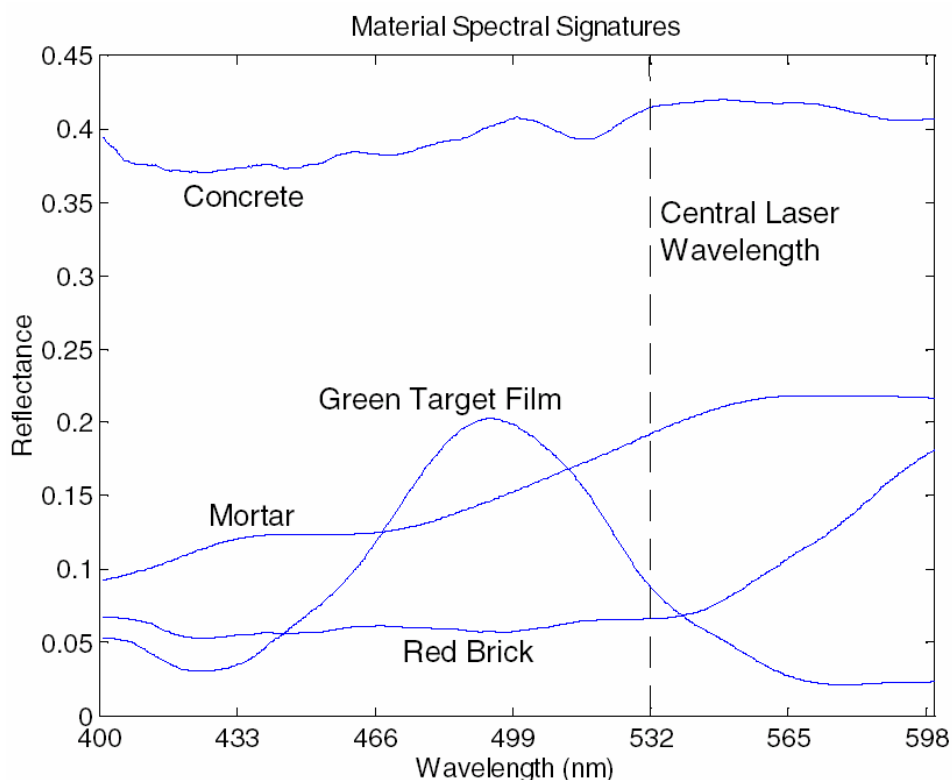


Figura A.2 – Curvas espectrais dos materiais escaneado

Fonte: Fonte: Gordon et al, 2001.

O comprimento de onda desse equipamento é 532 nm, e avaliando o gráfico acima, percebe-se que o material tijolo vermelho possui o menor grau de reflectância para esse comprimento de onda, enquanto que o concreto apresenta um alto grau de reflectância.

O tijolo vermelho apresenta baixa resposta enquanto que a argamassa mostrou uma boa resposta espectral para esse comprimento de onda. A figura A.3 retrata a nuvem de pontos no muro escaneado, destacando-se as cores claras os pontos do rejunte da argamassa.

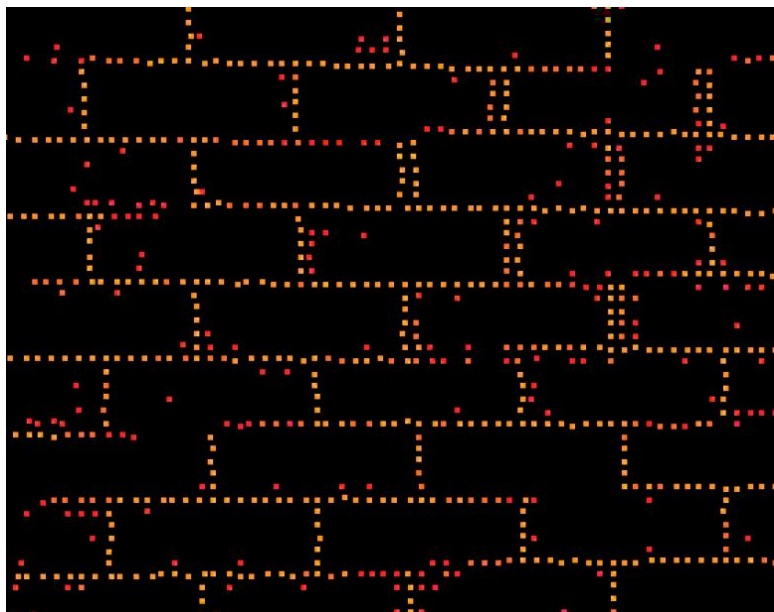


Figura A.3 – Retorno do pulso laser no muro  
Fonte: Gordon et al, 2001.

Outros estudos feitos por Boehler et al, 2004, relatam testes de acurácia utilizando um alvo de aproximadamente 300 mm X 300 mm. O painel frontal tinha pequenas aberturas de 30 mm nas extremidades que iam diminuindo até o centro do alvo (figura A.4).

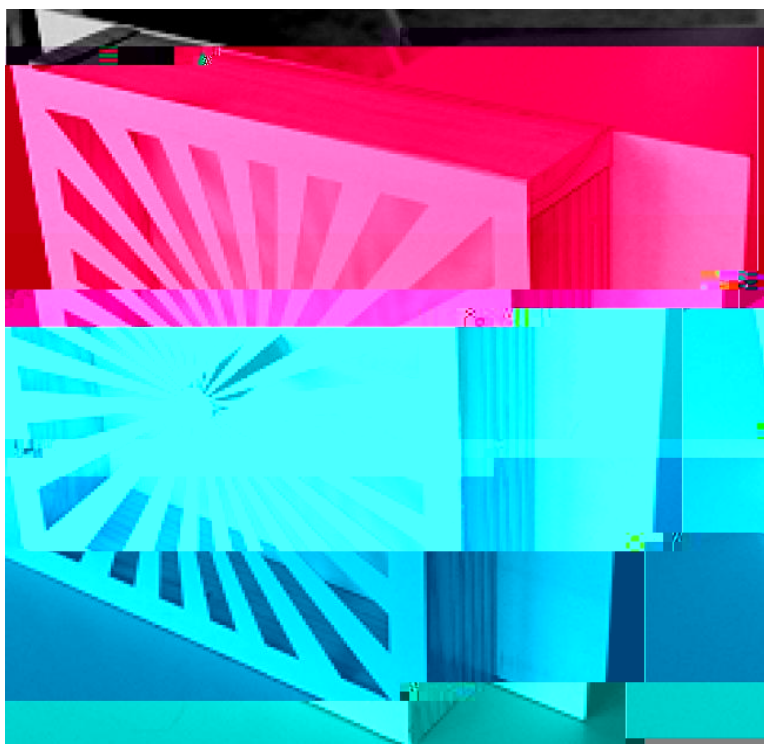


Figura A.4 – Alvos com aberturas variáveis para testes de resolução  
Fonte: Boehler et al, 2004

Esse alvo foi escaneado a 6 metros de distância com diferentes modelos de equipamentos e produziu as nuvem de pontos mostradas na figura A.5. À esquerda a figura mostra a vista em perfil do alvo e à direita a vista da face do alvo, em escala pequena.

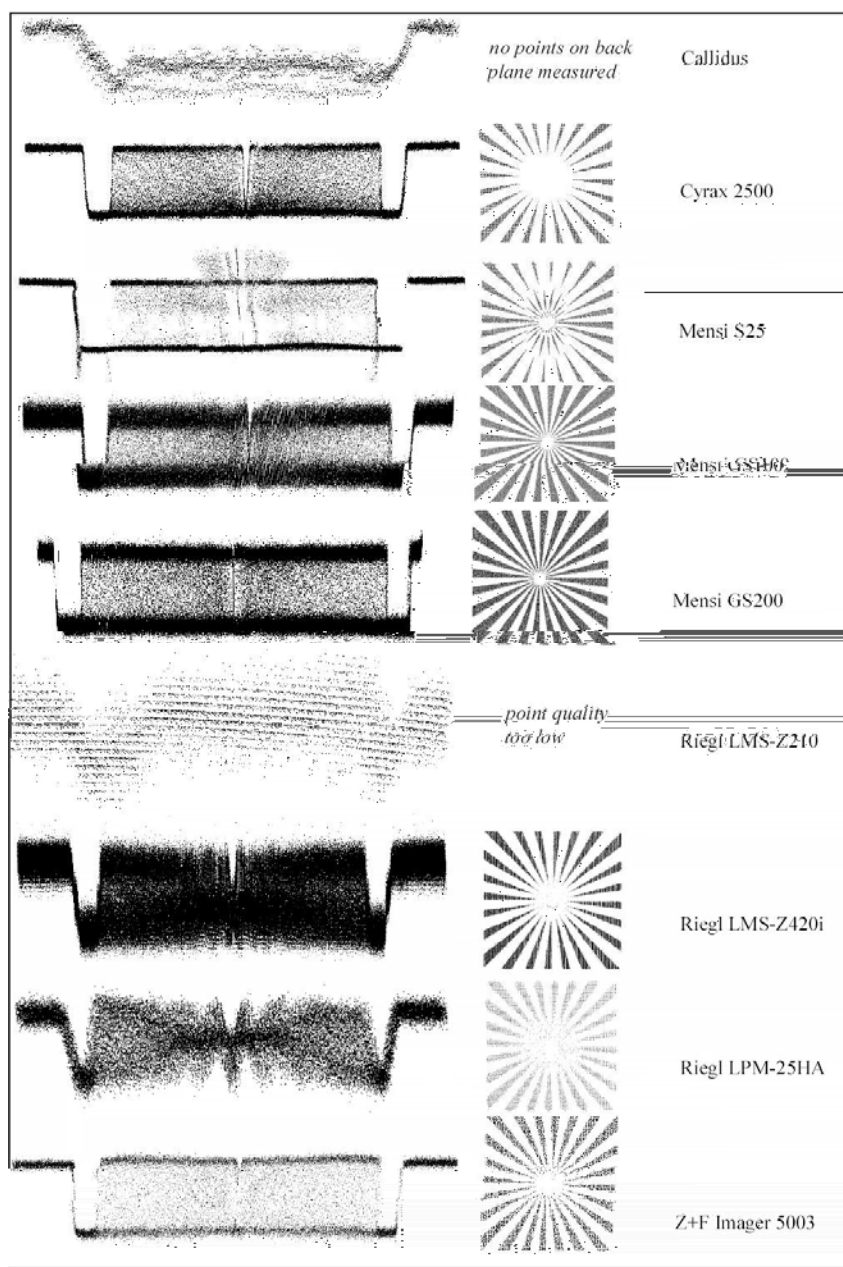


Figura A.5 – Resultado do teste de resolução usando o alvo mostrado na figura 8.6, com diferentes equipamentos.

Fonte: Fonte: Boehler et al, 2004

Logicamente que alguns equipamentos tem diferenças em suas precisões nominais (ver TABELA 3.1 para mais informações) mas vê-se claramente que a qualidade da nuvem de pontos da borda do alvo não é boa em alguns casos, o que pode produzir dados errôneos ou equivocados para o processo de modelagem, controle dimensional e análise da nuvem de pontos.

## ANEXO B

**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**

	<b>X (metros)</b>	<b>Y (metros)</b>
<b>P0</b>	149982,6541	250009,1671
<b>P1A</b>	149987,0479	250006,8428
<b>P1</b>	150000,0000	250000,0000
<b>P2A</b>	150009,0136	249995,2399
<b>P2</b>	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**

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

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

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

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

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

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

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

### 2ª Iteração

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

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

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

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

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

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

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



$$X_2 = \begin{vmatrix} 0,002828014 \\ -0,000232261 \end{vmatrix}$$

$$E_2 = X_2 + E_1 \begin{vmatrix} 149993,526 \\ 249979,256 \end{vmatrix}$$

### 3ª Iteração

$$L_0 = \begin{vmatrix} 31,826 \\ 28,337 \\ 21,731 \\ 22,256 \\ 49,438 \end{vmatrix}$$

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

$$L = \begin{vmatrix} -0,001 \\ -0,003 \\ 0,003 \\ 0,001 \\ -0,005 \end{vmatrix}$$

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

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

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

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

$$X_3 = \begin{vmatrix} 0,001643287 \\ -0,000135323 \end{vmatrix}$$

$$E2 = X3 + E2 \quad \left| \begin{array}{l} 149993,528 \\ 249979,256 \end{array} \right|$$

### Cálculo dos Resíduos

$$V = \left| \begin{array}{l} -0,001 \\ -0,002 \\ 0,002 \\ 0,000 \\ -0,001 \end{array} \right|$$

$$V^T P V = \left| 3,66432E-06 \right|$$

**Sigma a Posteriori = 3,66432E-06**

$$MVC_E = \left| \begin{array}{cc} 2,1206E-06 & -1,31066E-07 \\ -1,31066E-07 & 1,13227E-06 \end{array} \right|$$

### Teste de Precisão – Qui-Quadrado Teste Unilateral

TESTE UNILATERAL	
Qui-quadrado calculado	1,09929 x 10 <sup>-05</sup>
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)		
<b>E</b>	X = 149993,528 m	± 0,00145 m
	Y = 249979,256 m	± 0,00106 m

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)