CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

PAULO ROGÉRIO VIEIRA

A UTILIZAÇÃO DE MÁQUINAS OPTO-ELETRÔNICAS PORTÁTEIS DE LONGO ALCANCE PARA MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL COMO FATOR DE OTIMIZAÇÃO FABRIL

São Bernardo do Campo
2003

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

PAULO ROGÉRIO VIEIRA

A UTILIZAÇÃO DE MÁQUINAS OPTO-ELETRÔNICAS PORTÁTEIS DE LONGO ALCANCE PARA MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL COMO FATOR DE OTIMIZAÇÃO FABRIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário da FEI, como requisito final para conclusão do curso de Pós-graduação em Administração de Empresas para Engenheiros, sob orientação do Prof. Carlos Alberto Valadares.

São Bernardo do Campo
2003

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, à minha esposa e à minha filha que sempre estiveram ao meu lado nos momentos mais importantes da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço às empresas Leica Geosystems Inc., Probe Systems e Tecsis pelo fornecimento de grande parte do material utilizado para conclusão desse trabalho.

Ao professor Carlos Alberto Valadares por me dar o prazer e a honra de ser meu orientador durante a execução desse trabalho.

O melhor uso que podemos fazer de nossas vidas é utilizá-las em algo mais duradouro que a própria vida.

Autor desconhecido

RESUMO

Esse trabalho apresenta a descrição do funcionamento, características e principais aplicações de três tipos de máquinas opto-elêtronicas portáteis de longo alcance para medição tridimensional utilizados como fator de otimização do processo fabril de peças e equipamentos de grande porte: o teodolito, o Laser Tracker e o sistema de fotogrametria. Industrias aeroespaciais, automotivas, ferroviárias, navais, de telecomunicação e de geração de energia, sempre tiveram dificuldades em seus processos de controle dimensional durante e após a fabricação. Empresas aeroespaciais como Boeing, Airbus, Embraer e inclusive NASA, tinham até há pouco tempo atrás métodos de controle dimensionais hoje obsoletos como a utilização de micrômetros tubulares, réguas, níveis e linhas, ou então processos caros, trabalhosos e que ocupam muito espaço, como a fabricação de modelos padrões (“Mock-up”), tudo isso por não ser possível ou viável o transporte do objeto até uma máquina de medição ou por não existirem máquinas com grande capacidade, e ainda pela necessidade de medir o objeto em locais especiais como em túneis de vento. Com o aumento da concorrência, da exigência dos clientes e conseqüente diminuição da variação dimensional dos produtos, essas empresas cada vez mais deixam de lado os sistemas de medição obsoletos, imprecisos, inflexíveis e de capacidade dimensional limitada, e optam por precisas e flexíveis máquinas tridimensionais portáteis de longo alcance.

Palavras Chave: Máquinas Tridimensionais Portáteis; Controle Dimensional; Peças de grande porte.

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Tabela Comparativo da medição com FTs x alvos comuns 63

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ILUSTRAÇÃO 1.1: Visualização gráfica do software do Laser Tracker.....15

ILUSTRAÇÃO 1.2: Medição da seção de um navio durante a fabricação.....16

ILUSTRAÇÃO 1.3: Desenho esquemático de teod. operados por computados.....19

ILUSTRAÇÃO 1.4: Desenho esquemático do funcionamento do Laser Tracker.....19

ILUSTRAÇÃO 2.1: Teodolito - Estação Total.....22

ILUSTRAÇÃO 2.2: Medição de ângulos.....23

ILUSTRAÇÃO 2.3: Triangulação.....23

ILUSTRAÇÃO 2.4: Esquema básico de preparação de Teodolitos.....24

ILUSTRAÇÃO 2.5: Refletores e alvos.....25

ILUSTRAÇÃO 2.6: Medição com Estação Total.....25

ILUSTRAÇÃO 2.7: Medição em coordenada polar.....25

ILUSTRAÇÃO 2.8: Ilustração 2.8: Fabricação de um Modelo Padrão.....28

ILUSTRAÇÃO 2.9: Localização dos pontos de alinhamento da turbina do avião.....30

ILUSTRAÇÃO 2.10: Perfis de controle das asas.....30

ILUSTRAÇÃO 2.11: Foto de um avião durante a montagem final.....30

ILUSTRAÇÃO 2.12: Medição de um modelo em túnel de vento.....31

ILUSTRAÇÃO 2.13: Medição do perfil da porta.....33

ILUSTRAÇÃO 2.14: Montagem de ferramental.....33

ILUSTRAÇÃO 2.15: Medição do “Skid”.....33

ILUSTRAÇÃO 2.16: Medição do produto.....33

ILUSTRAÇÃO 2.17: Medição da estrutura do trem.....34

ILUSTRAÇÃO 2.18: Medição do trem no campo.....34

ILUSTRAÇÃO 2.19: Medição da seção de um navio.....34
ILUSTRAÇÃO 2.20: Monitoramento da torre de resfriamento.....35
ILUSTRAÇÃO 2.21: Antena parabólica montada com Teodolito.....35
ILUSTRAÇÃO 2.22: Verificação geométrica de maquinas de usinagem.....36
ILUSTRAÇÃO 2.23: Posicionamento de peça em uma turbina à gás.....36
ILUSTRAÇÃO 2.24: Figura ilustrando uma aplicação com milhares de pontos.....37
ILUSTRAÇÃO 2.25: “Laser Tracker” – Designer atual.....38
ILUSTRAÇÃO 2.26: Medições polares.....38
ILUSTRAÇÃO 2.27: Medição manual com o IFM.....40
ILUSTRAÇÃO 2.28: Medição automática com o ADM.....40
ILUSTRAÇÃO 2.29: Trajetória do laser.....42
ILUSTRAÇÃO 2.30: Trajetória do laser.....42
ILUSTRAÇÃO 2.31: Trajetória do laser.....42
ILUSTRAÇÃO 2.32: Ilustração da calibração de robôs.....45
ILUSTRAÇÃO 2.33: Calibração de robô.....45
ILUSTRAÇÃO 2.34: Desenho ilustrando a montagem de um dispositivo utilizando o “Build”.....46
ILUSTRAÇÃO 2.35: Aferição de um dispositivo com o Laser Tracker.....47
ILUSTRAÇÃO 2.36: Controle de uma superfície em relação ao modelo de CAD....48
ILUSTRAÇÃO 2.37: Digitalização de uma peça com o Laser Tracker.....48
ILUSTRAÇÃO 2.38: Peça original.....49
ILUSTRAÇÃO 2.39: Desenho originado pela ER.....49
ILUSTRAÇÃO 2.40: Figura ilustrativa da máquina Hexápode.....50
ILUSTRAÇÃO 2.41 Sistema antigo de Fotogrametria.....52
ILUSTRAÇÃO 2.42: Portabilidade do sistema de Fotogrametria.....52

ILUSTRAÇÃO 2.43: Câmera INCA.....53
ILUSTRAÇÃO 2.44: Princípio do Sistema de Fotogrametria.....53
ILUSTRAÇÃO 2.45: Alvos ou Targets.....55
ILUSTRAÇÃO 2.46: Tooling Targets.....55
ILUSTRAÇÃO 2.47: Alvo Codificado.....55
ILUSTRAÇÃO 2.48: : “Feature Target”.....55
ILUSTRAÇÃO 2.49: Projetor de alvos “Pro-spot.....56
ILUSTRAÇÃO 2.50: Medição com o sistema de fotogrametria no modo “off-line”....57
ILUSTRAÇÃO 2.51: Medição com o sistema de fotogrametria no modo “on-line”....58
ILUSTRAÇÃO 2.52: Apalpador vertical, horizontal e pontas.....58
ILUSTRAÇÃO 2.53: Posicionamento das câmeras em uma medição “off-line”.....59
ILUSTRAÇÃO 2.54: Relatório de medição.....60
ILUSTRAÇÃO 2.55: Medição de navios com sistema de Fotogrametria.....61
ILUSTRAÇÃO 2.56: Ponta de asa.....62
ILUSTRAÇÃO 2.57: Análise da ponta de asa.....62
ILUSTRAÇÃO 2.58: Análise de uma antena.....62
ILUSTRAÇÃO 2.59: Análise de um “mock-up” de helicóptero.....62
ILUSTRAÇÃO 2.60: Medição com FT.....63
ILUSTRAÇÃO 2.61: Medição de “Skid” em fábrica de caminhões.....63
ILUSTRAÇÃO 2.62: Medição de um gerador de vapor em usina nuclear.....64
ILUSTRAÇÃO 2.63: ICAN.....64
ILUSTRAÇÃO 2.64: Esquema ilustrando o posicionamento de peças com robô.....65
ILUSTRAÇÃO 2.65: Posicionamento de peça com robô.....65
ILUSTRAÇÃO 2.66 Medição de posicionamento.....65
ILUSTRAÇÃO 2.67: Robô executando uma furação.....66

ILUSTRAÇÃO 2.68: Posicionamento de máquina.....66
ILUSTRAÇÃO 3.1: Posicionamento de uma turbina à gás.....68
ILUSTRAÇÃO 3.2 monitoramento da torre de resfriamento em usina nuclear.....68
ILUSTRAÇÃO 3.3: Esquema funcionamento dos geradores eólicos.....70
ILUSTRAÇÃO 3.4: Instalação de geradores eólicos utilizada como pastagem.....73
ILUSTRAÇÃO 3.5: Gráfico de fluxo de vento vs vazão de água do Rio São Francisco.....74
ILUSTRAÇÃO 3.6: Fabricação de pás e geradores eólicos.....75
ILUSTRAÇÃO 3.7: Desenvolvimento de projetos.....76
ILUSTRAÇÃO 3.8: Fabricação de pás de alta qualidade.....77
ILUSTRAÇÃO 3.9: Hangar de fabricação da Embraer.....77
ILUSTRAÇÃO 3.10: Ventiladores industriais de alto desempenho.....79
ILUSTRAÇÃO 3.11: Posicionamento do gabarito no molde.....81
ILUSTRAÇÃO 3.12: Medição do molde do intradorso – aprox. 5m de altura.....82
ILUSTRAÇÃO 3.13: Medição da pá em ambiente aberto e piso de terra a 34?C.....83
ILUSTRAÇÃO 3.14: Digitalização da superfície do molde extradorso.....84
ILUSTRAÇÃO 3.15: Ilustração mostrando a nuvem de pontos escaneada na tela do computador 84
ILUSTRAÇÃO 3.16: Relatório gráfico da inspeção da pá.....84
ILUSTRAÇÃO 3.17: Visita do cliente durante a inspeção do molde da maior pá do mundo.....87
ILUSTRAÇÃO 3.18: Geradores de energia eólica montados em seqüência.....90

SUMÁRIO

1INTRODUÇÃO.....15
1.1 Justificativa.....16
1.2 Objetivo.....17
1.3 Descrição da pesquisa.....17
1.4 Delimitação da pesquisa.....17
1.4.1 Delimitação ao Nível Cronológico.....18
1.4.2 Delimitação ao Nível Espacial.....20
1.4.3 Delimitação ao Nível de Aspectos.....20

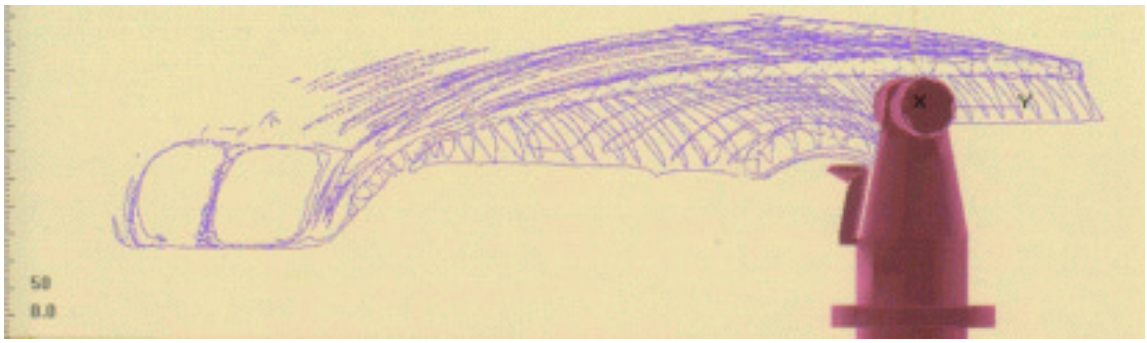
2 DESENVOLVIMENTO BIBLIOGRÁFICO.....22
2.1 Teodolitos.....22
2.1.1 Aplicações aeroespaciais do Teodolito.....26
2.1.1.1 Fabricação de dispositivos através de “Virtual Mock up”.....26
2.1.1.2 Controle dimensional de produtos.....29
2.1.1.3 Utilização em departamentos de pesquisa e desenvolvimento (P&D).....31
2.1.2 Aplicações automotivas do Teodolito.....32
2.1.3 Outras aplicações do Teodolito.....33
2.2 Rastreador Interferométrico Tridimensional.....37
2.2.1 Aplicações do Laser Tracker – Calibração de robôs.....44
2.2.2 Aplicações do Laser Tracker – Fabricação de dispositivos.....45
2.2.3 Aplicações – Inspeção de superfícies em relação ao modelo de CAD.....47
2.2.4 Aplicações do Laser Tracker – Engenharia Reversa (ER).....49
2.2.5 Aplicações do Laser Tracker – Aferição geométrica de máquinas.....49
2.2.6 Aplicações do Laser Tracker – Usinagem virtual de peças.....51
2.3 Sistema de Fotogrametria.....52
2.3.1 Aplicações da Fotogrametria – Medições de objetos de grande porte.....61
2.3.2 Aplicações da Fotogrametria – Verificação de superfícies complexas e ER....62
2.3.3 Aplicações da Fotogrametria – Medição de dispositivos automotivos.....63
2.3.4 Aplicações da Fotogrametria – Medição em condições especiais.....64
2.3.5 Aplicações da Fotogrametria – Posicionamento automático de peças.....65

3 ESTUDO DE CASO.....67
3.1 Tema.....67
3.2 Justificativa.....67
3.3 Considerações gerais.....68
3.4 Panorama da energia eólica.....69
3.4.1 Custo da energia eólica.....72
3.5 Informações sobre a empresa Tecsis.....74
3.5.1 Qualidade reconhecida internacionalmente.....75
3.5.2 Pás para turbinas eólicas.....76
3.5.3 Setor aeroespacial.....77
3.5.4 Ventilação indústrial.....78
3.5.5 Know-how aplicado em outros setores da indústria.....79
3.6 Inspeção de moldes e pás para geradores de energia eólica pelo processo convencional vs fabricação com Laser Tracker.....80
3.6.1 Inspeção de moldes pelo processo convencional.....80
3.6.2 Inspeção de moldes e pás utilizando o Laser Tracker.....82
3.6.3 Vantagens qualitativas na utilização do Laser Tracker para inspeção de pás e moldes para geradores eólicos.....85
3.6.4 Vantagens quantitativas (econômicas) na utilização do Laser Tracker para inspeção de moldes para geradores eólicos.....87
3.6.5 Informações adicionais sobre a utilização do Laser Tracker na inspeção de pás e moldes para geradores de energia eólica.....89
4 CONCLUSÃO.....92
REFERÊNCIAS.....93

1 INTRODUÇÃO

Assim como a eletrônica tem sido limitada pela redução cada vez maior de seus componentes, a mecânica encontra seu limite nas grandes dimensões das peças e equipamentos, principalmente quando aliada às baixas tolerâncias de fabricação, o que torna inviável a utilização de sistemas de medição obsoletos, caros e lentos em seus processos produtivos. Além disso, com o aumento da competitividade, muitas vezes o prazo de lançamento de um produto, como também sua qualidade, passaram a ser itens decisivos para ter sucesso no mercado mundial. Essa tendência contraditória de crescimento dimensional vs diminuição das tolerâncias é um desafio produtivo para várias empresas em todo o mundo, porém empresas especialmente dos EUA e Europa têm solucionado esses problemas por meio da utilização de máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance para medição tridimensional, que aliadas a modernos sistemas de CAD possibilitam a execução de medições extremamente precisas, rápidas e flexíveis (ilust. 1.1), isso tudo, obviamente independe do tamanho do objeto e do local onde o mesmo é medido (ilust. 1.2).

Ilustração 1.1 : Visualização gráfica do software do Laser Tracker



Fonte: Catálogo Leica Axyz – Integrated Indústrial Measuring System – p. 11. Ref. 711090en – VI.99

Ilustração 1.2 : Medição da seção de um navio durante a fabricação

Fonte: Catálogo Leica DCA – TC – Single Sensor 3D Control and Analysis System for Large Scale Assemblies – Ref.UI-288-OEN-X.95

1.1 Justificativa

No mercado nacional a aplicação das máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance é muito menor, apesar de cada vez mais ganharem espaço no mercado de máquinas de medição, isso devido a pouca divulgação e principalmente a falta de informação sobre esses sistemas de medição. Aplicações até hoje impossíveis de serem executadas, ou executadas com precariedade e principalmente sem a certeza do resultado obtido durante a medição, serão cada vez mais otimizadas com a utilização das máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance, porém para isso será necessário um grande trabalho de divulgação e principalmente esclarecimentos sobre esses sistemas, sendo esse um trabalho que deverá cada vez mais ser feito através da parceria entre as empresas e instituições de ensino.

1.2 Objetivo

Frente à falta de informação do mercado, este trabalho tem como objetivo apresentar e esclarecer as principais dúvidas sobre o funcionamento e aplicações das máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance para medição tridimensional, onde serão descritas suas principais vantagens em relação aos sistemas convencionais de medição de longo alcance utilizados nos processos de fabricação e controle de peças e equipamentos.

1.3 Descrição da pesquisa

Essa pesquisa é do tipo descritiva de cunho documental, e como mencionado abordará somente o estudo de três tipos específicos de máquinas, o teodolito, o Laser Tracker e o sistema de fotogrametria, sendo a principal fonte de consulta utilizada para sua execução casos práticos ocorridos em vários países do mundo, em especial países do continente norte americano e Europa.

1.4 Delimitação da pesquisa

Para que o trabalho possa ser executado com um nível de qualidade satisfatório, a pesquisa será delimitada nos seguintes níveis:

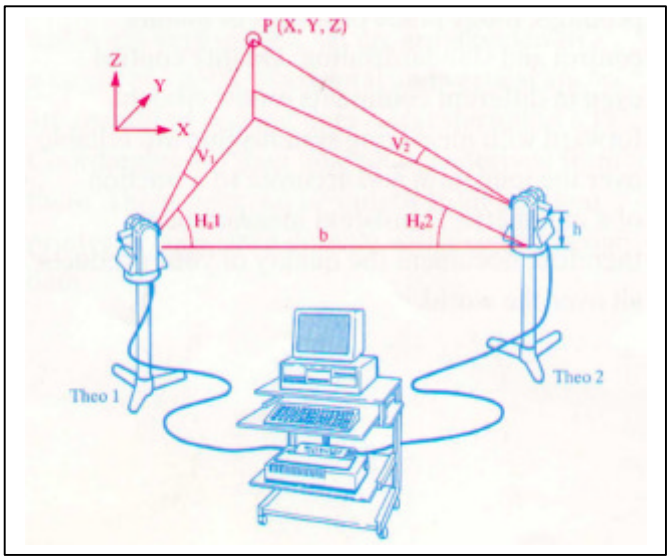
- Delimitação ao Nível Cronológico
- Delimitação ao Nível Espacial
- Delimitação ao Nível de Aspectos

1.4.1 Delimitação ao Nível Cronológico

Algumas máquinas óticas portáteis de longo alcance como os teodolitos e as câmeras fotogrametricas são utilizadas há várias décadas como instrumentos de medição tanto na indústria mecânica como na indústria de construção civil, porém somente no início da década de 80, com o advento da utilização em massa dos computadores portáteis e com o surgimento dos primeiros teodolitos eletrônicos, é que foi possível a utilização dos teodolitos como sistemas de medição tridimensional precisos e flexíveis como são conhecidos na atualidade. Os sistema de fotogrametria, foram e ainda são, sistemas muito utilizados na geração de mapas por meio da fotogrametria aérea, e mesmo na indústria mecânica durante décadas os sistemas de fotogrametria foram utilizadas na medição de peças e equipamentos, porém esse trabalho era feito com máquinas fotográficas que trabalhavam com filmes, onde as fotos eram tiradas e reveladas horas depois. Como os teodolitos, a medição fotogramétrica só foi possível ser aplicada com rapidez e precisão após o surgimento das câmeras eletrônicas digitais no início da década de 90. Essas câmeras digitais permitem que as fotos tiradas sejam enviadas automaticamente para computadores com softwares modernos e potentes que calculam com precisão as coordenadas dos pontos medidos fração de segundos após a execução das fotos.

Na década de 90, algumas empresas e instituições brasileiras como Embraer e INPE já utilizavam teodolitos eletrônicos de alta precisão controladas por softwares em sistema DOS especialmente desenvolvidos para suas aplicações (ilust. 1.3).

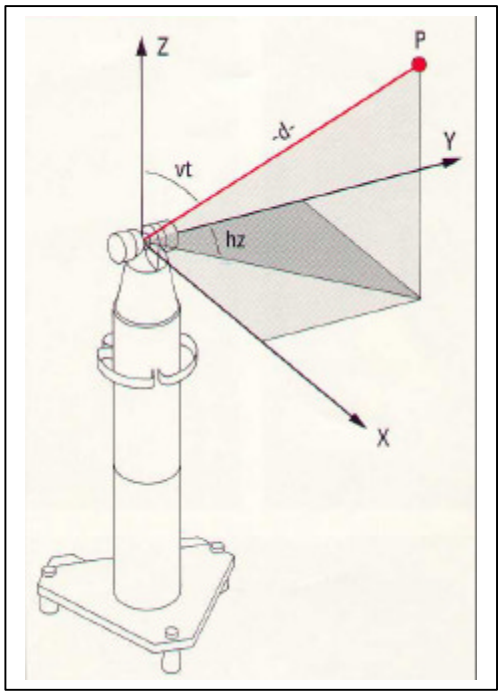
Ilustração 1.3 : Desenho esquemático de teodolitos operados por computados



Fonte: Catálogo Leica Mobile 3D metrology – Measurably Better - p. 4 – Ref.UI-241E – VII.92

Já outra máquina tridimensional de alta precisão chamada Laser Tracker (ilust. 1.4) inventada em meados de 1990, só começou a ser aplicada no Brasil no final de 1997 na fábrica da Embraer, sendo adquiridas mais 6 unidades nos anos seguintes.

Ilustração 1.4 : Desenho esquemático dofuncionamento do Laser Tracker



Fonte: Catálogo Leica Smart 310 - 3D Laser Tracker - p. 6 – Ref. UI-206e – V.93

Apesar dos sistemas de medição ópticos serem aplicados há décadas, esse trabalho abordará somente o período de 1980 até a atualidade pois compreende o período onde se iniciaram e desenvolveram as máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance para medição tridimensional, que são o foco de nosso estudo.

1.4.2 Delimitação ao Nível Espacial

Como mencionado no item anterior algumas máquinas óticas portáteis de longo alcance como os teodolitos e os sistema de fotogrametria são muito utilizadas na construção civil, na geração de mapas e na medição topográfica de terrenos, porém o objeto de nosso estudo será somente a aplicação desses equipamentos na indústria mecânica de grande porte. Entende-se então por indústria mecânica de grande porte as industrias aeroespaciais, automotivas, ferroviárias, de máquinas de usinagem, de geração de energia (eólica, hidroelétrica, nuclear e através da queima de gás), comunicação (fabricação e instalação de antenas parabólicas e fabricação de satélites) e instituições de pesquisa.

1.4.3 Delimitação ao Nível de Aspectos

Os aspectos pertinentes às máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance para medição 3D que serão levados em conta nesse trabalho são*:*

- *Grande capacidade dimensional*: umas das mais importantes características das máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance, é a capacidade dimensional ou o alcance de medição, tendo um destaque especial para o teodolito que pode medir distâncias de até 120 metros com 0,5mm de precisão;

- *Precisão de medição*: além do grande alcance, a alta precisão de medição é outra característica única desse tipo de equipamento, as medições podem ser executadas com precisão de até 0,008 mm por metro, ou seja, um objeto com 10m de comprimento pode ser medido com precisão de até 0,08 mm;

- *Facilidade de utilização*: as máquinas opto-eletrônicas portáteis são máquinas muito simples de serem utilizadas, pois apesar dos seus softwares serem muito potentes, são muito fáceis de serem utilizados (“user friendly”);

- *Alta portabilidade* :devido à sua alta portabilidade, as máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance podem ser utilizadas em locais onde outros sistemas de medição não teriam acesso. O sistema de fotogrametria por exemplo pode ser transportado dentro de uma pequena mala, podendo ser levado como bagagem de mão no avião, e com um revestimento especial, a fotogrametria pode ser utilizada em câmaras de pressão e locais com radioatividade;

- *Velocidade de trabalho*: como resultado de todos os recursos mencionados acima, a velocidade de trabalho das máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance para medição tridimensional é muito alta, isso devido ao pouco tempo gasto com a medição dos objetos e com a fácil automação do processo de medição, independente do local e do tamanho do objeto.

2 DESENVOLVIMENTO BIBLIOGRÁFICO

2.1 Teodolitos

Os teodolitos (ilust. 2.1) são utilizados há muito tempo na engenharia civil sendo empregados na medição de construções, estradas e principalmente para a medição topográfica de terrenos, e nos últimos anos têm sido muito empregados na engenharia mecânica para a medição de equipamentos e peças de grande porte, devido ao seu alcance, precisão e portabilidade. A utilização do teodolito na mecânica só foi sedimentada após a comunicação destes com os computadores, pois nos sistemas antigos só era possível obter os valores dos ângulos, e nos atuais também são fornecidas as coordenadas em “X, Y e Z” de cada ponto em relação ao sistema de coordenada da peça. Isso resultou nos teodolitos eletrônicos acoplados a computadores com software de medição utilizados na atualidade.

Ilustração 2.1: Teodolito - Estação Total

Fonte: Foto gentilmente cedida pela Leica Geosystems Inc.

Basicamente são dois os tipos de teodolitos, e estes apresentam diferentes princípios de funcionamento. São eles:

- Teodolito Standard;

- Teodolito Total ou Estação Total.

O Teodolito Standard é basicamente um instrumento utilizado para medição de ângulos (horizontal e vertical) (ilust. 2.2)e utiliza um telescópio para o foco preciso do centro do alvo. Com os ângulos verticais e horizontais de dois ou mais teodolitos em relação aos alvos e com a posição relativa entre eles, é possível se estabelecer, através de uma triangulação (ilust. 2.3), a posição dos alvos em X,Y e Z no espaço [SANDWITH,1993].

Ilustração 2.2: Medição de ângulos

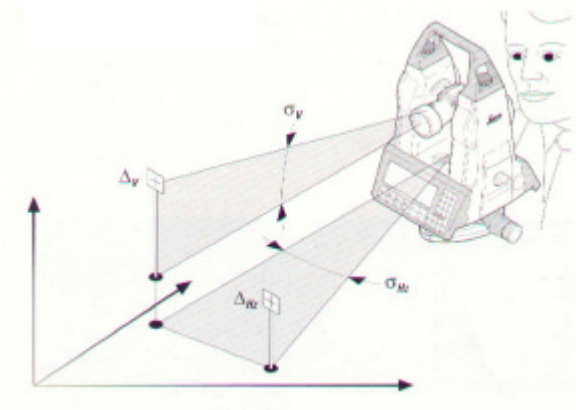
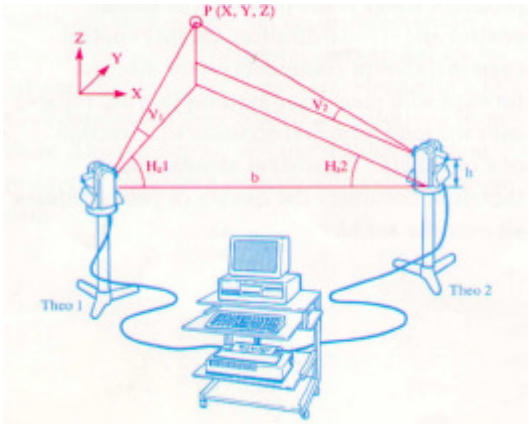


Ilustração 2.3: Triangulação



Fonte: Catálogo Leica TPS 5000 – Electronic Precision Theodolites for Industrial Applications - p. 5
Ref. UI-300-0EN - IV.98

O procedimento de preparação, coleta de dados e análise dos pontos medidos (nas coordenadas do objeto) com o teodolito standard, pode ser resumido da seguinte forma (ilust. 2.4):

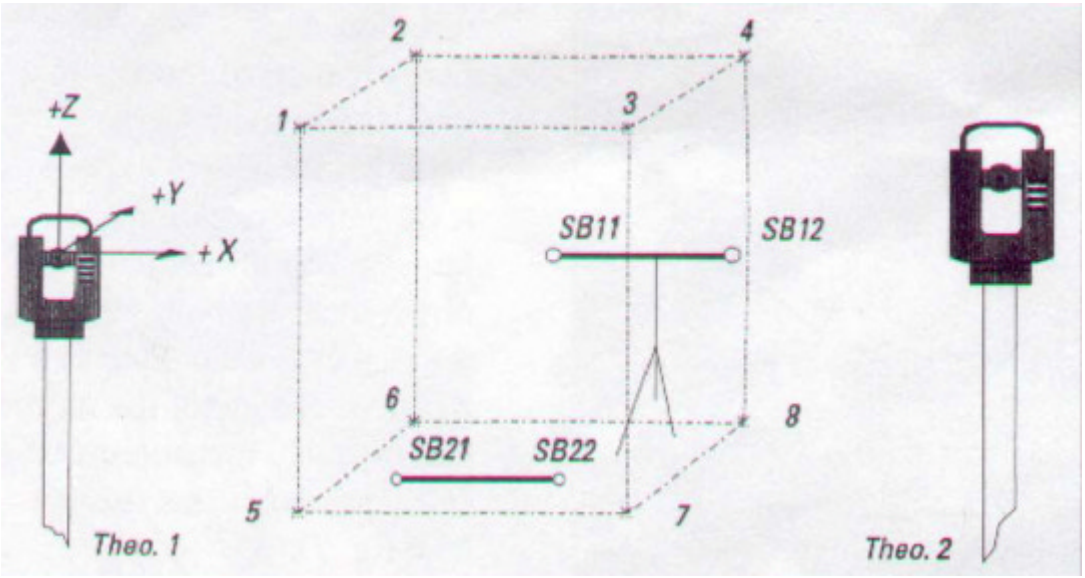
- Orientação mútua dos teodolitos em relação a referências no espaço, que podem ser pontos em comum, incluindo barra de escala ou outras distâncias conhecidas e, através de um balanceamento matemático (Bundle Adjustment), poderão ser definidas as posições dos equipamentos em relação ao sistema de coordenadas local e entre si;

- Transformação do sistema de coordenadas local em um sistema de coordenadas do objeto, utilizando pontos de referência do objeto que possuam coordenadas conhecidas. Tudo isto independente da posição e orientação do objeto;

- Coleta de dados ou de pontos já no sistema de coordenadas do objeto;

- Se necessário, executar análises de funções geométricas como círculos, posições de eixos, direções de vetores, comparações dos valores de coordenadas nominais com reais, análise e posicionamento de elementos (Build) e comparativo de modelos de CAD com peças reais [MÜNCH & BAERTLEIN, 1993].

Ilustração 2.4: Esquema básico de preparação de Teodolitos



Fonte: Pratice Report Leica – Dimensional Measuring Thechniques in the Automotive and Aircraft Industry - p. 3 - Ref. U1-273-0en – III.94

Principais características técnicas do Teodolito Standard:

- Resolução angular = 0.1”, 0.00001? ;

- Desvio Padrão conforme DIN18723, 1? = 0.5” ;

- Pode trabalhar de 2 a 8 teodolitos em conjunto;

- Armazenamento dos dados em cartão PCMCIA, memória interna ou em um PC;

- Temperaturas: - de trabalho = -20 ate 50 ?C;

- de armazenamento = -40 ate 70 ?C.

Fonte: Catálogo Leica TPS 5000 – Electronic Precision Theodolites for Industrial Applications Ref. UI-300-0EN - IV.98

O Teodolito Total ou Estação Total é um equipamento que mede o ângulo vertical e horizontal, como o teodolito standard, e também a distância do alvo. A medição de distância é feita através de um raio infravermelho que sai do centro da luneta e que ao atingir um refletor (ilust. 2.5) retorna para o ponto de partida (ilust. 2.6), e tomando como referência o comprimento de onda do raio infravermelho é possível calcular a distância até o ponto medido, e através do ângulo vertical, ângulo horizontal e da distância (ilust. 2.7), um ponto pode ser especificado em coordenada polar, e o software converte para coordenada retangular, ou seja, X, Y e Z. Os modelos atuais podem rastrear e reconhecer automaticamente o alvo.

Ilustração 2.5: Refletores e alvos

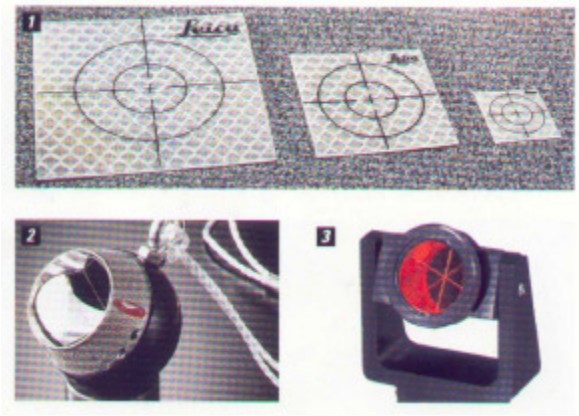
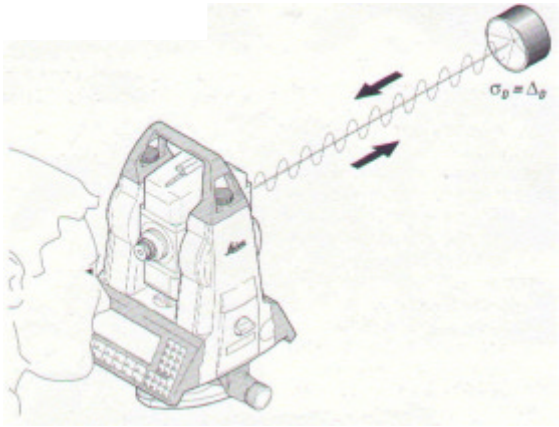
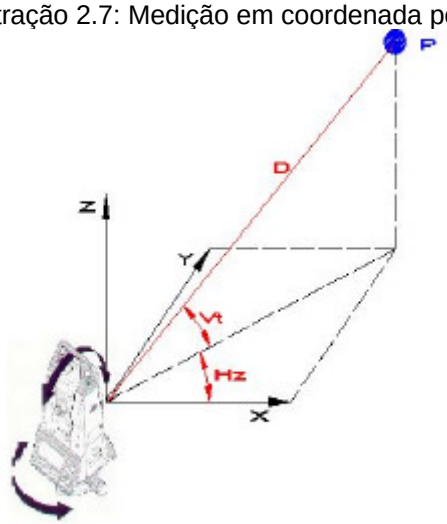


Ilustração 2.6: Medição com Estação Total



Fonte: Catálogo Leica TPS 5000 – Electronic Precision Theodolites for Industrial Applications – p.6
Ref. UI-300-0EN - IV.98

Ilustração 2.7: Medição em coordenada polar



O procedimento de preparação, coleta de dados e análise dos pontos medidos (nas coordenadas do objeto) com uma Estação Total é feita da mesma forma que no Teodolito Standard, exceto o item 1 do procedimento, pois a Estação Total já é orientada automaticamente no sistema de coordenadas local assim que ligada, e também utiliza como referência para a distância o comprimento de onda do raio infravermelho e não uma barra de escala.

Principais características técnicas do Teodolito Total:

- Desvio Padrão (absoluto) de 1? = 1mm;
- Precisão típica na medição de distância = ? 0.5 mm até 120 m;
- Duração da medição = 3 seg.;
- Pode trabalhar com somente um teodolito;
- Tipos de refletores: Prismas, Refletores de canto cubico (? 25 mm) e fitas reflectivas;
- Campo de medição = 200m com fitas e até 5km com prismas;

Fonte: Catálogo Leica TPS 5000 – Electronic Precision Theodolites for Industrial Applications
Ref. UI-300-0EN - IV.98

2.1.1 Aplicações aeroespaciais do Teodolito

2.1.1.1 Fabricação de dispositivos através de “Virtual Mock up”

Por ser uma máquina tridimensional extremamente portátil, versátil e precisa quando aplicado na medição de peças de grande porte, o teodolito tem aplicação em vários setores da indústria.

Na indústria aeroespacial, um dos maiores desafios é o de reduzir ou eliminar o número de Modelos Padrões ou “Mock-up” (ilust. 2.8). O Modelo Padrão como o nome diz, é um modelo em tamanho real que representa com fidelidade as principais dimensões de uma peça a ser produzida, podendo atingir até 30 m de altura e 50 m de comprimento. Do Modelo Padrão são produzidos, o modelo padrão secundário e o ferramental para produção, sendo que a produção e montagem de várias peças simultaneamente só é possível com a fabricação de vários modelos padrões [MÜNCH & BAERTLEIN, 1993].

Os maiores problemas ocasionados pela utilização de modelos padrões, podem ser classificados da seguinte forma:

Tempo : - Longo tempo para fabricação de um ferramental;

- Fabricação sucessiva ao invés de simultânea de fixações e ferramental;

Precisão: - Altas tolerâncias exigidas na fabricação dos Modelos Padrões;

- Propagação de erro durante a fabricação;

Manutenção: - Verificações freqüentes da estabilidade dos Modelos Padrões;

- Alterações físicas em caso de mudança dos Modelos Padrões;

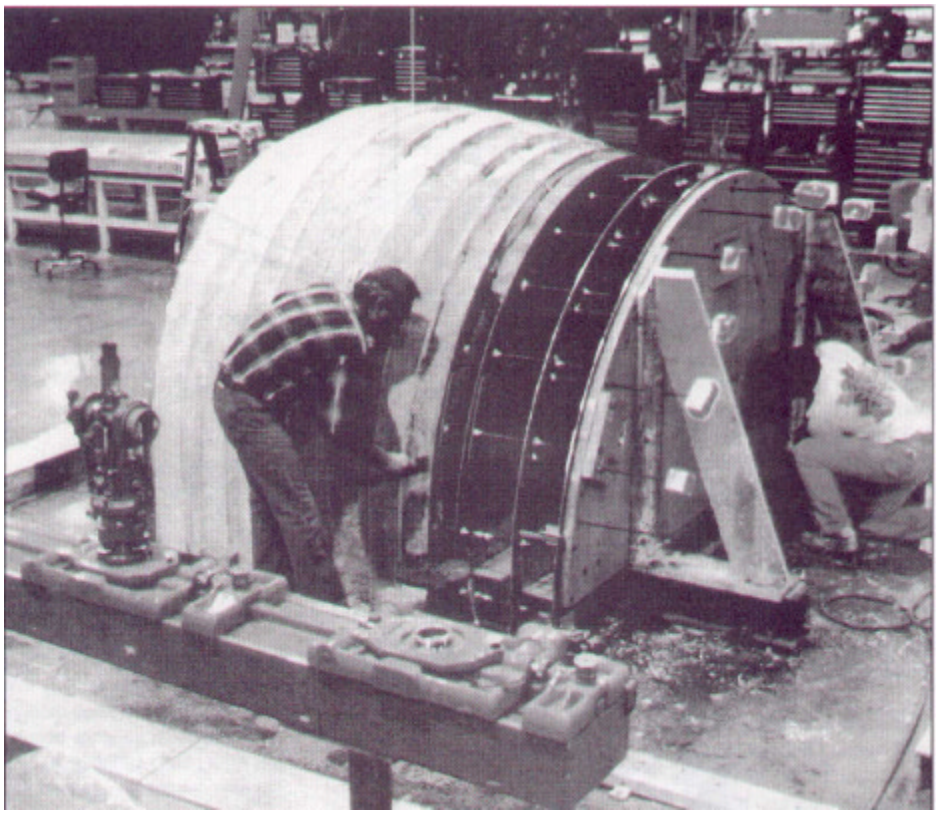
Armazenagem: - Ocupa uma grande área de armazenagem;

- Devem ser armazenados durante 20 ou 30 anos;

- Geração de serviços adicionais que geram despesas;

Estes custos podem chegar a 1/3 (um terço) do custo total empregado em um lançamento de uma nova aeronave ou seja milhões de dólares [MÜNCH & BAERTLEIN, 1993].

Ilustração 2.8: Fabricação de um Modelo Padrão



Fonte: Pratice Report Leica - Gageless Tool Building with Computer-Aided Theodolites - p. 4
Ref. U1 267e – IX.93

Com a utilização de Teodolitos Monitorados por Computador CAT (“Computer-Aided Theodolite”) integrados a sistemas CAD, é possível uma redução significativa do número de Modelos Padrões, pois os ferramentais de produção passam a ser gerados diretamente dos dados retirados do modelo CAD, que passa a ser o modelo padrão na construção do ferramental. Esse processo é denominado “Gageless Tooling ou Virtual Mock up”. A utilização de modelos CAD, garante que o ferramental sempre é gerado de um Modelo Padrão mais atualizado possível. Na utilização de modelos físicos, estes devem ser retirados da produção para eventuais correções, o que causa uma grande perda de produção, ao passo que, modelos CAD podem ser alterados muito mais rapidamente e a um menor custo [MÜNCH & BAERTLEIN, 1993].

2.1.1.2 Controle dimensional de produtos

Além da criação de ferramental através do uso de teodolitos, uma outra aplicação é a medição ou controle de produtos. Uma grande vantagem da utilização de teodolitos para a medição da fuselagem, posicionamento das turbinas (ilust. 2.9) ou ainda da posição e forma da asa (ilust. 2.10) durante a montagem do avião (ilut. 2.11), é o fato que o componente não precisa estar orientado em uma certa posição antes de ser medido.

Durante a medição do produto pode-se encontrar as seguintes aplicações:

1. Determinação do perfil da junção da asa, objetivando análises para posterior montagem;
2. Controle de pontos de referência que definirão de 10 à 15 sistemas de coordenadas no avião;
3. Verificação das principais dimensões para controle geométrico;
4. Medição de perfis;
5. Geração de certificados de inspeção final para produtos ou peças. Devido a itens do avião serem fabricados em vários lugares do mundo (por exemplo, o avião Airbus 321 é construído por 7 empresas em 6 países), a geração de certificados de conformidade passa a ser muito importante na montagem final do conjunto;
6. Localização de um ponto de coordenadas extraídas de um modelo CAD em uma superfície real (“BUILD”);
7. Determinação das posições das dobradiças relativas a estrutura das portas;
8. Verificação da estrutura de montagem dos motores ou turbinas, dentre outras coisas. [MÜNCH & BAERTLEIN, 1993].

Ilustração 2.9: Localização dos pontos de alinhamento da turbina do avião

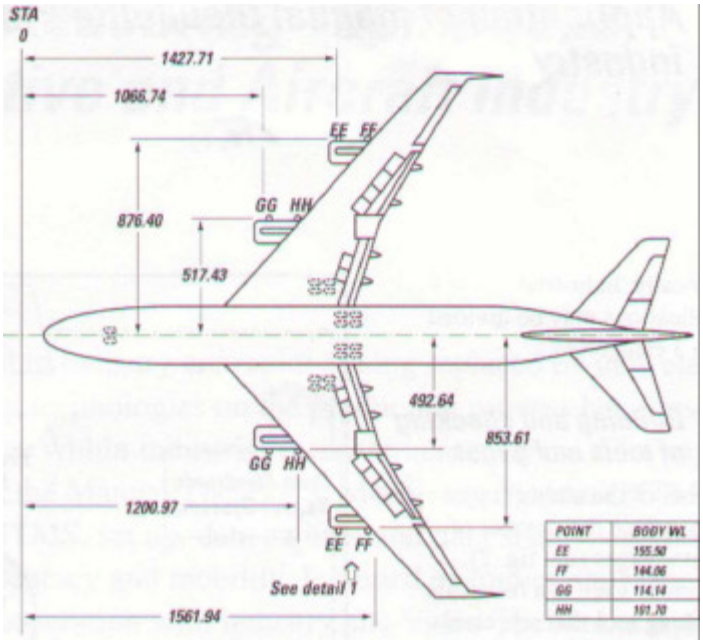


Ilustração 2.10: Perfis de controle das asas

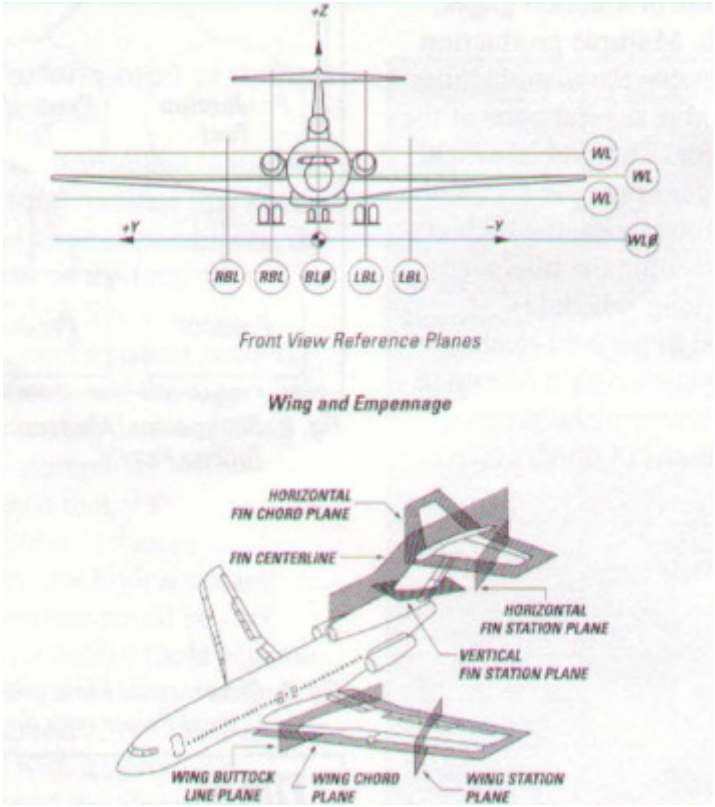


Ilustração 2.11: Foto de um avião durante a montagem final

Fonte: Catálogo Leica Mobile 3D metrology – Measurably Better - p. 2 Ref.UI-241E – VII.92

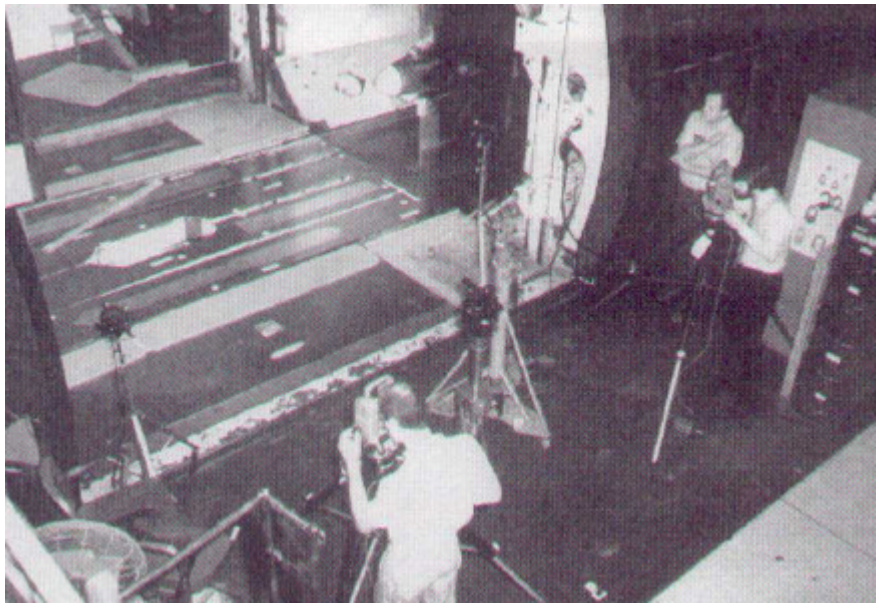
Fonte: Pratice Report Leica – Dimensional Measuring Thechniques in the Automotive and Aircraft Industry - p. 4 - Ref. U1-273-0en – III.94

2.1.1.3 Utilização em departamentos de pesquisa e desenvolvimento (P&D)

Os teodolitos também são utilizados nos departamento de P&D, apesar de cada vez mais estar se tornando obsoleto nessas aplicações. Pode-se classificar o uso do teodolito no departamento de P&D da seguintes forma [MÜNCH & BAERTLEIN, 1993]:

1. Localização dos pontos de pressão de ar no corpo do avião. Os pontos são utilizados para análise de vazão de ar e possíveis turbulências;
2. Análise de modelos em túnel de vento. Como o tempo de teste é oneroso, são preparados equipamentos e alvos em posições estratégicas para medir pontos específicos já no sistema de coordenadas do objeto (ilust. 2.12);
3. Medição de contornos e perfis. Por exemplo, para a análise de perfis de portas é necessário mais de 2000 pontos, o que pode ser medido em um dia de trabalho;
4. Checagem de peças macias e que não podem ser tocadas.

Ilustração 2.12: Medição de um modelo em túnel de vento



Fonte: Pratice Report Leica – Dimensional Measuring Thechniques in the Automotive and Aircraft Industry - p.5 - Ref. U1-273-0en – III.94

2.1.2 Aplicações automotivas do Teodolito

Outra indústria que utiliza o teodolito em várias aplicações, é a indústria automotiva. As aplicações do teodolito na indústria automotiva são similares às da indústria aeroespacial, e com a utilização do teodolito os fabricantes de automóveis reduziram o tempo de produção e os custos, em aplicações como as descritas a seguir [MÜNCH & BAERTLEIN, 1993], [HORCH et al, 1993]:

1. Verificação de peças independente de posições pré estabelecidas, o que torna desnecessário a fabricação de fixações pesadas, caras e que despendem de um longo tempo para a fabricação (ilust. 2.13);
2. Fabricação de ferramental direto de dados de CAD, eliminando assim modelos padrões, evitando acúmulo de erros e desperdício de dinheiro (ilust. 2.14);
3. Posicionamento e alinhamento de vários componentes da linha de produção, como por exemplo unidades de fabricação (também conhecidas como “Geometry-Boxes”, “Jumbo”, “Robo-Gate” ou “Jigs”), mesas e estruturas giratórias, suportes, posicionadores, guias, robôs de solda e montagem;
4. Verificação do posicionamento dos “Skid” (carrinhos utilizados para transportar o veículo durante o processo de fabricação), pois as referências de montagem estão normalmente no “Skid” e não no produto a ser fabricado (ilust. 2.15);
5. Verificação periódica de fixações e “Jigs”, de modo a se diminuir ao máximo o tempo de parada de produção por quebra;
6. Medições em túnel de vento;
7. Análise do veículo após “crash-test”;
8. Medição do produto acabado (ilust. 2.16), garantindo a intercambiabilidade entre as peças a serem montadas na fábrica e fora dela.

Ilustração 2.13: Medição do perfil da porta

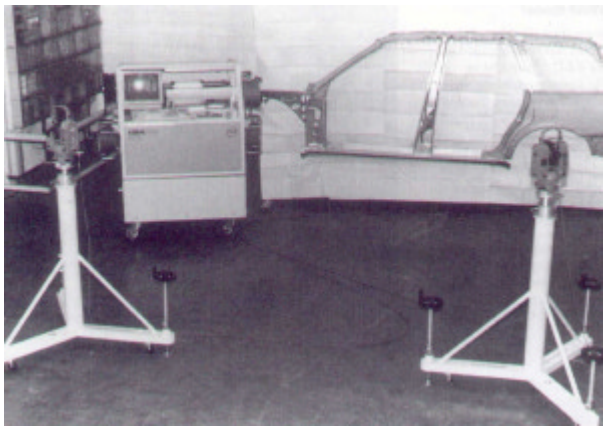


Ilustração 2.14: Montagem de ferramental

Ilustração 2.15: Medição do “Skid”

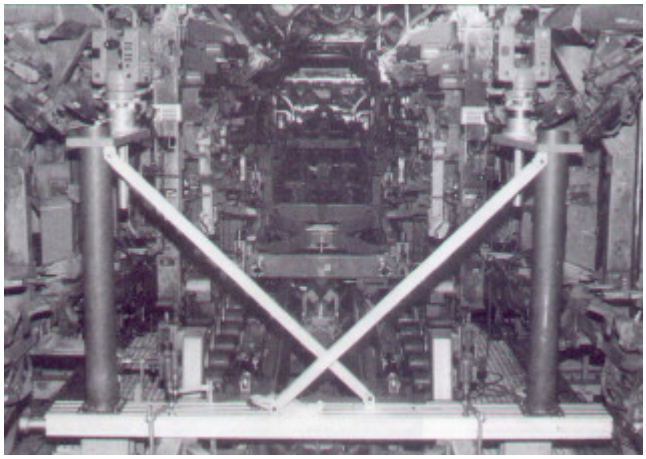
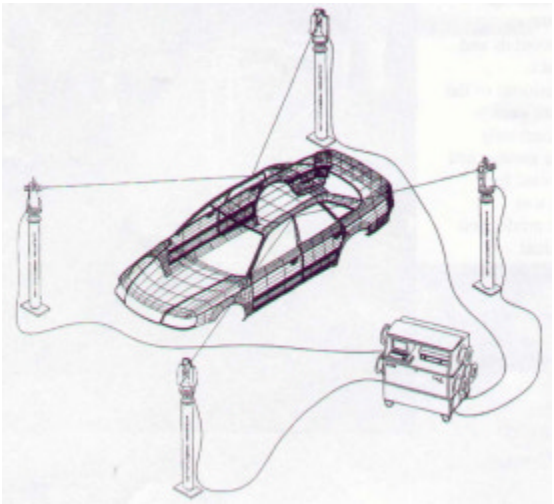


Ilustração 2.16: Medição do produto



Fonte: Pratice Report Leica – A mobile metrology unit for univelsal application
Ref. U1-246-0en – XI.93 - DPB

2.1.3 Outras aplicações do Teodolito

Apesar das maiores aplicações do teodolito se encontrarem nas industrias aeroespaciais e automotivas, aplicações tão complexas e avançadas são encontradas em outras industrias, como segue:

a - Medição de vagões de trem (ilust. 2.17), onde é controlado todo o alinhamento e posicionamento dos componentes e do conjunto montado, isso muitas vezes no campo (ilust. 2.18) [Ahl et al, 1993].

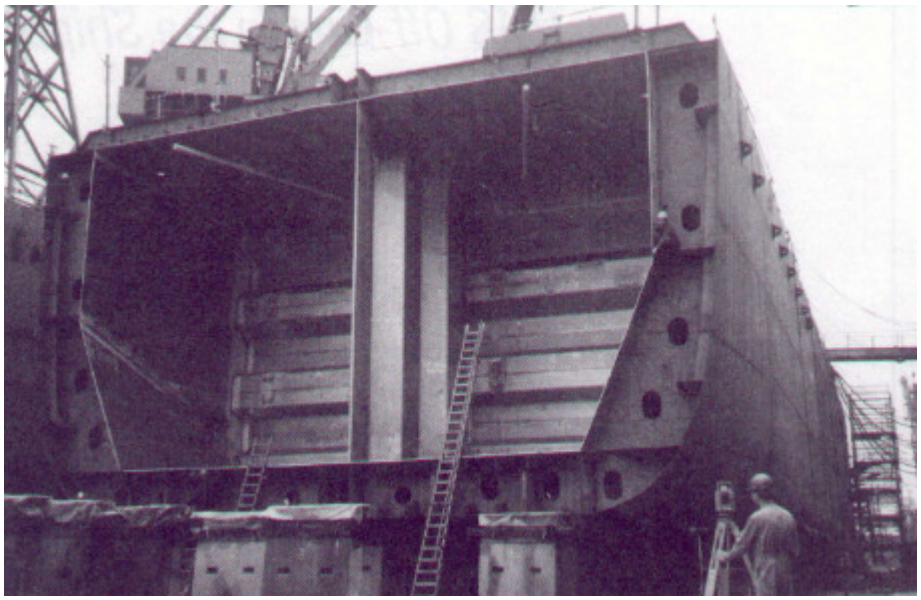
Ilustração 2.17: Medição da estrutura do trem

Ilustração 2.18: Medição do trem no campo

Fonte: Catálogo Leica Mobile PCMSPlus – Polar Coordinate Measurement System with precision total station Wild TC2002 - Ref.UI-250-OEN X.92

b - Medições de navios (ilust. 2.19), como a medição dos pontos de “lay-out” necessários na construção, e a medição de subconjuntos, pode ser executada com rapidez e precisão. Além disso, o controle e a correção de erros antes da montagem final de componentes fornece dados necessários para a fabricação de blocos de ajuste, possibilitando um rápido ajuste final [MANNINEN & KAISTO, 1996], [Ref. 712 635en - VI.99], [Ref. U1-288-OEN-X.95].

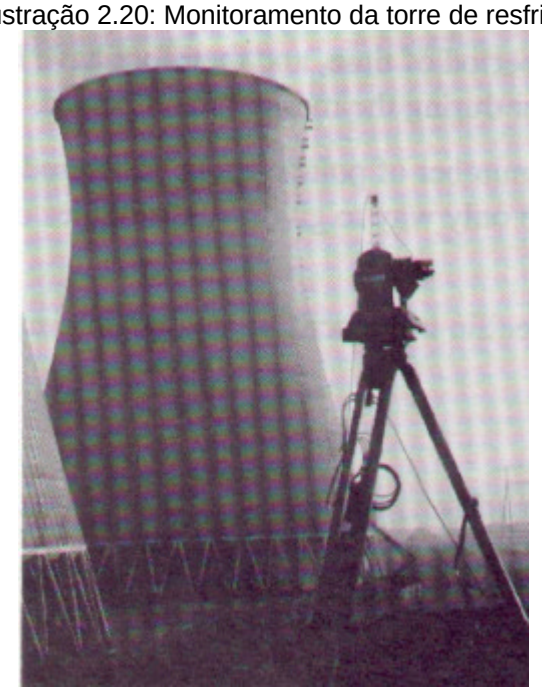
Ilustração 2.19: Medição da seção de um navio



Fonte: Pratice Report Leica – TMS Off-line in the Shipbuilding Industry, Belgium Ref. U1 325 – V.93

c - Monitoramento da deformação de torres de resfriamento (até 180m de altura) utilizadas em usinas nucleares (Ilust. 2.20) [SIGNORET,1991].

Ilustração 2.20: Monitoramento da torre de resfriamento



Fonte: Pratice Report Leica – Monitoring deformation of cooling towers, France Ref. U1 364e – II.92

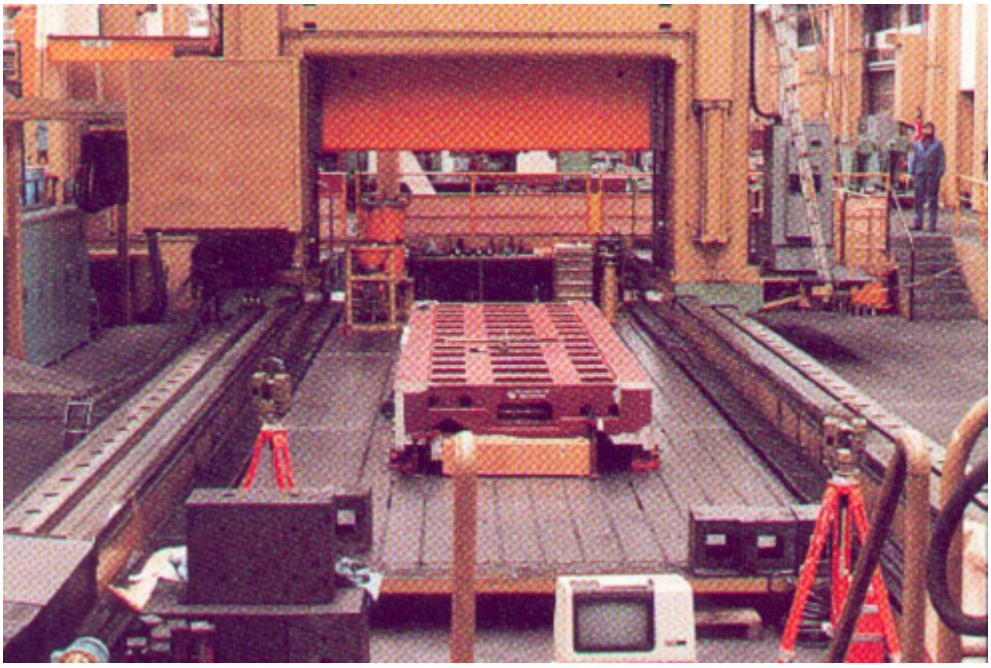
d - Medição de antenas parabólicas durante a fabricação e montagem (ilust. 2.21).

Ilustração 2.21: Antena parabólica montada com Teodolito

Fonte: Aplication Report Leica – World's Largest Telescope assembled using Leica Total Station Ref. U1-382-OEN – III.99

Alinhamento e posicionamento de máquinas (ilust. 2.22).

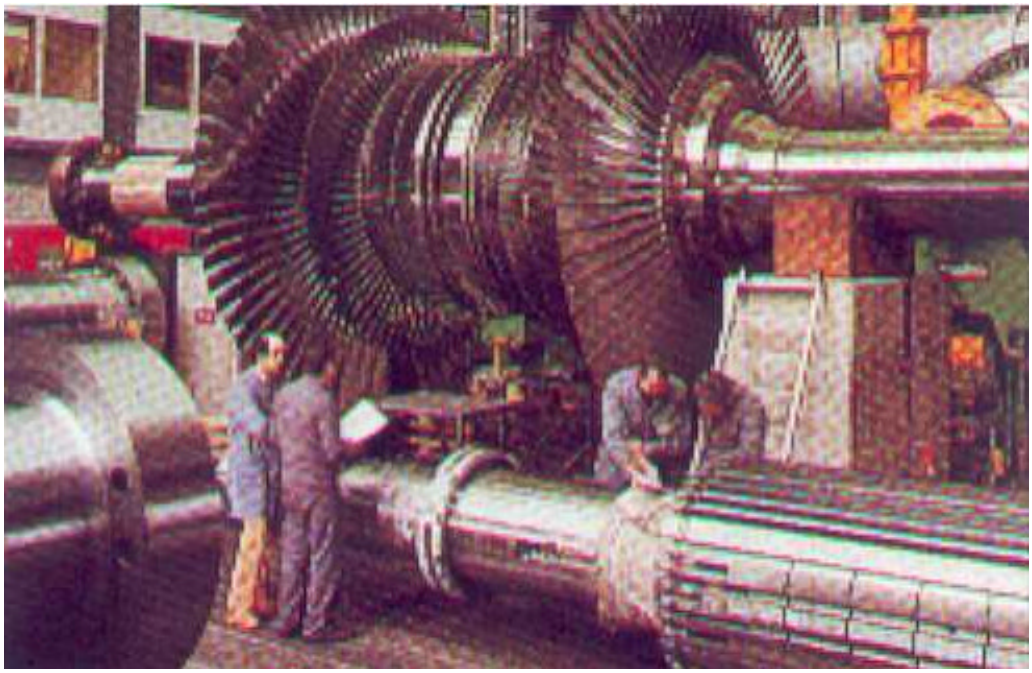
Ilustração 2.22: Verificação geométrica de maquinas de usinagem



Fonte: Catálogo Leica Mobile 3D metrology – Measurably Better - p. 2 Ref.UI-241E – VII.92

e - Alinhamento de peças de grande porte (ilust 2.23).

Ilustração 2.23: Posicionamento de peça em uma turbina à gás

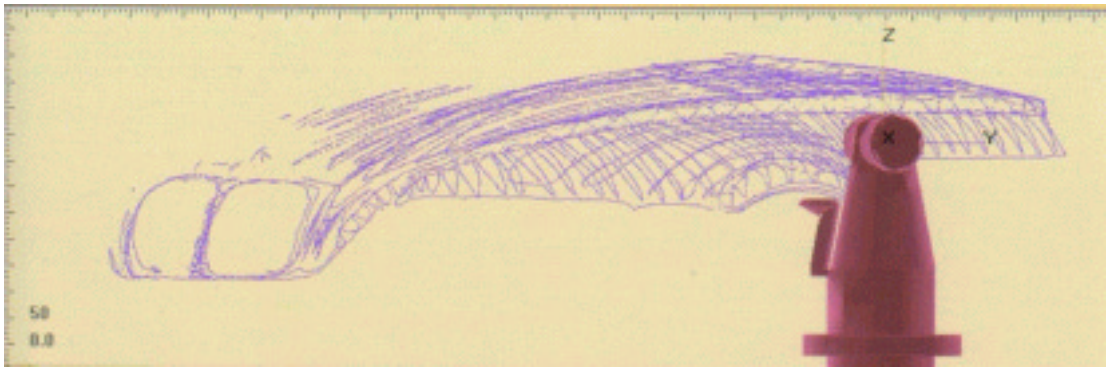


Fonte: Foto gentilmente cedida pela Leica Geosystems Inc.

2.2 Rastreador Interferométrico Tridimensional

Com a utilização do teodolito em aplicações industriais, muitos problemas foram solucionados devido a sua precisão, longo alcance de medição e, principalmente, portabilidade. Por outro lado, em algumas aplicações onde é necessário uma coleta muito grande de pontos (ilust. 2.24) ou a medição dinâmica de objetos, como calibração de robôs, controle de superfícies através de modelos matemáticos (CAD) e em trabalhos de engenharia reversa, verificou-se que o teodolito não é a melhor solução, pois é um sistema muito lento.

Ilustração 2.24: Figura ilustrando uma aplicação com milhares de pontos



Fonte: Catálogo Leica Axyz – Integrated Indústrial Measuring System – p. 11. Ref. 711090en – VI.99

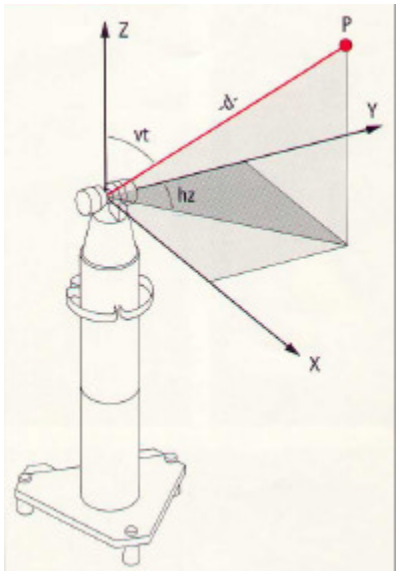
Algumas aplicações como as mencionadas anteriormente e muitas outras, só foram solucionadas após o surgimento de um equipamento denominado ***"Rastreador interferométrico tridimensional" ou "Laser Tracker"***. A tecnologia básica do Laser Tracker foi desenvolvida por um pequeno grupo na *NBS ("National Bureau of Standards"*) nos EUA, sendo patenteado em 1987. Os futuros desenvolvimentos dessa tecnologia foram continuados por uma pequena empresa denominada *API (* "*Automated Precision Inc"),* que em 1988 passou a procurar por uma empresa para uma parceria comercial e produtiva. Em 1989 *"Kern ? Co.Ltda."* (atualmente *Leica Geosystems*) adquiriu essa tecnologia, lançando em 1990 na

Quality Show em Chicago um “Laser Tracker” totalmente redesenhado (ilust. 2.25) [Leica product information, Smart 10].

De um modo geral pode-se descrever o Laser Tracker como sendo uma máquina tridimensional portátil que utiliza um laser interferométrico para medição de distância, dois “encoder” (vertical e horizontal) de alta precisão para medição angular, combinado a um mecanismo direcionador e um sensor de posição (PSD) de alta resolução, permitindo assim rastrear um refletor manual e medir seu posicionamento tridimensional no espaço, enquanto este é movimentado. Além do laser interferométrico, pode ser adicionado um laser para medição de distância absoluta que possibilita a medição automática de pontos [GREENWOOD, 1993]. O “Laser Tracker” executa suas medições em coordenadas polares (ilust. 2.26), ou seja, ângulo vertical, ângulo horizontal e distância do centro de giro do cabeçote até o centro do refletor, medindo até aproximadamente 1000 pontos por segundo. Um computador converte essa medição em coordenadas retangulares, comumente utilizada no campo [Ref. U1-294-OEN-VIII.97].

Ilustração 2.25: “Laser Tracker” – Designer atual

Ilustração 2.26: Medições polares



Fonte: Catálogo Leica Smart 310 - 3D Laser Tracker - p. 6 – Ref. UI-206e – V.93

Como mencionado anteriormente, o “Laser Tracker” pode ter dois tipos de laseres, o interferômetro (IFM) e o laser para medição de distância absoluta (ADM). As principais diferenças entre eles serão descritas a seguir.

O IFM é um sistema a laser de alta precisão utilizado para medição de deslocamento, introduzido como uma ferramenta para medição indústrial pela Hewlett Packard em 1970. Seu princípio de funcionamento baseia-se na geração de uma interferência flutuante (pulsos) gerada pelo retorno do laser e que varia proporcionalmente ao deslocamento do refletor. Cada pulso contado eletronicamente significa o deslocamento de um comprimento de onda, e através dos números de pulsos é possível calcular proporcionalmente o valor do deslocamento total.

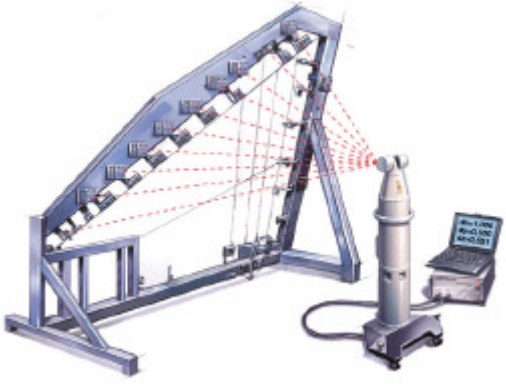
Quando se utiliza o IFM, não é possível medir ou determinar distâncias absolutas de um ponto, mas sim distâncias relativas a um ponto de partida, ou seja, as distâncias medidas serão maiores ou menores que a distância do ponto inicial. Esse ponto de partida é conhecido como *“home point”,* sendo um deles em especial definido durante a fabricação do Laser Tracker e calibrado durante a montagem do equipamento. Esse “*home point”* ou ponto de partida se encontra montado ao cabeçote do Laser Tracker e é conhecido como *“bird bath”* ou “*ninho de passarinho”*. Apesar de existir um ponto de partida agregado ao equipamento, qualquer ponto pode ser especificado como um “*home point”* , desde que tenha sido medido a partir de um ponto inicial de coordenadas conhecidas com precisão. Caso o Laser Tracker possua somente o IFM, sempre que o feixe de laser é interrompido, o Laser Tracker deverá reiniciar sua medição a partir de um “*home point”* . Para medir vários pontos estáticos em um objeto com o IFM, o refletor deverá ser levado manualmente até cada um dos pontos a ser medido, tomando cuidado para não

interromper o laser (ilust. 2.27) [GREENWOOD, 1993].

Quando o Laser Tracker possui além do IFM o ADM e se deseja medir uma grande quantidade de pontos estáticos, essa medição poderá ser feita automaticamente utilizando o ADM. Ao contrário do IFM, o ADM executa medições absolutas e não relativas a um ponto de partida. Portanto, para medir pontos estáticos automaticamente com o ADM, deve-se colocar refletores nos pontos a serem medidos, medir no mínimo os três primeiros pontos do objeto (cinco é ideal) para que o computador referencie o Laser Tracker no sistema de coordenada da peça, em seguida deve-se informar as coordenadas aproximadas dos demais pontos a serem medidos e o Laser Tracker executará a medição automática dos demais pontos. Esta aplicação é muito utilizada na medição periódica de dispositivos ou em testes de R&R (Repetitividade e Reprodutibilidade) (Ilust. 2.28) [STONE et al]. Outra grande vantagem dos Laser Trackers com ADM, é que se o feixe de laser é interrompido durante a medição não é necessário retornar a um ponto de partida conhecido, basta somente colocar o refletor na frente do feixe de laser e mantê-lo estabilizado por alguns segundos que o Laser Tracker calcula a nova posição do refletor utilizando o ADM em seguida o IFM é ativado dando continuidade ao processo de medição.

Ilustração 2.27: Medição manual com o IFM

Ilustração 2.28: Medição automática com o ADM



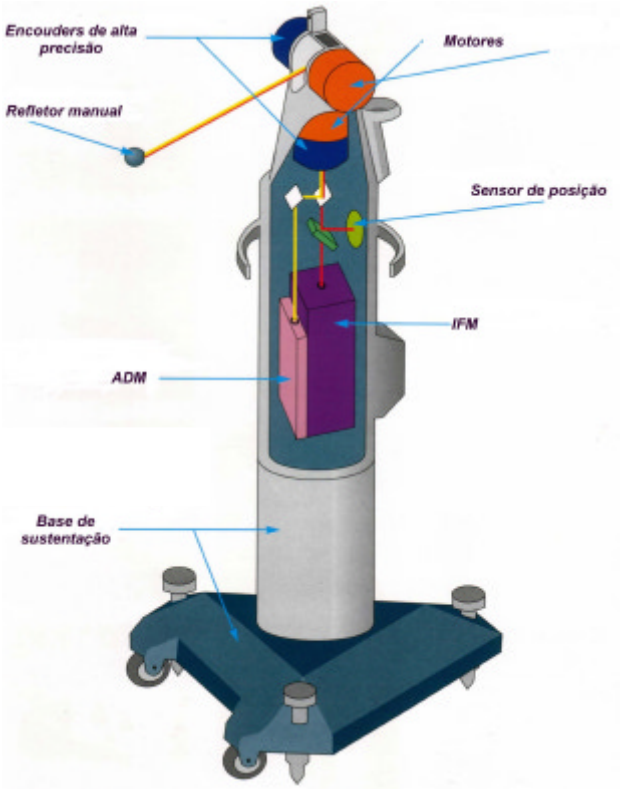
Fonte: Catálogo Leica Laser Tracker - Portable Coordinate Measuring Machine for small and large objects – Ref. 713895en – XI.99

O princípio de funcionamento do “Laser Tracker” será descrito a seguir, sendo detalhado todo a caminho percorrido pelo laser durante a medição, e seus componentes (ilust. 2.29).

O feixe sai do laser interferométrico e passa por um divisor de raio unidirecional (“beam splitter”), em seguida atinge um espelho montado em um mecanismo direcionador que reflete o feixe no centro do refletor. Ao atingir o centro do refletor , o feixe de laser retorna em sentido contrário sobrepondo-se ao feixe ida (desde que o refletor não se mova), e ao passar pelo divisor de raio parte do laser retorna ao interferômetro e parte é desviada em direção ao PSD atingindo sua origem (ilust. 2.30). Quando o refletor é movido, o feixe de laser não atinge mais o seu centro, fazendo com que o laser retorne paralelamente ao feixe de ida porém deslocado do centro, em seguida atinge novamente o espelho montado no mecanismo direcionador passando em seguida pelo divisor de raio (ilust. 2.31). No momento em que o laser passa novamente pelo divisor de raio, parte dele segue direto retornando ao interferômetro, e outra parte é direcionada a 90 graus atingindo novamente o PSD, porém com um deslocamento do centro . O PSD determina o deslocamento do centro do refletor e em seguida converte esse deslocamento em sinal analógico que é enviado aos motores (moto-amplificadores DC), que por sua vez orientam o espelho montado no mecanismo direcionador, fazendo com que o feixe de laser retorne ao centro do refletor. O deslocamento do centro é calculado aproximadamente 3000 vezes por segundo, permitindo que o Laser Tracker persiga o refletor a uma velocidade altíssima (> 6 m/s) garantindo assim que o ponto medido seja o centro do refletor [GREENWOOD, 1993].

Ao contrário da IFM, o ADM só é ativado no momento da medição e sua trajetória é diferente do IFM como mostra a ilustração.

Ilustração 2.29: Trajetória do laser



Fonte: Catálogo Leica Laser Tracker - Portable Coordinate Measuring Machine for small and large objects – Ref. 713895en – XI.99

Ilustração 2.30: Trajetória do laser

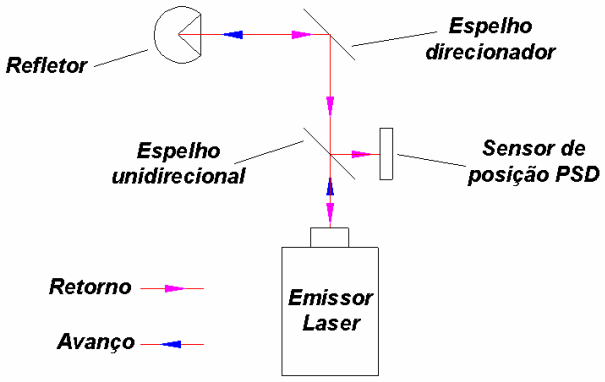
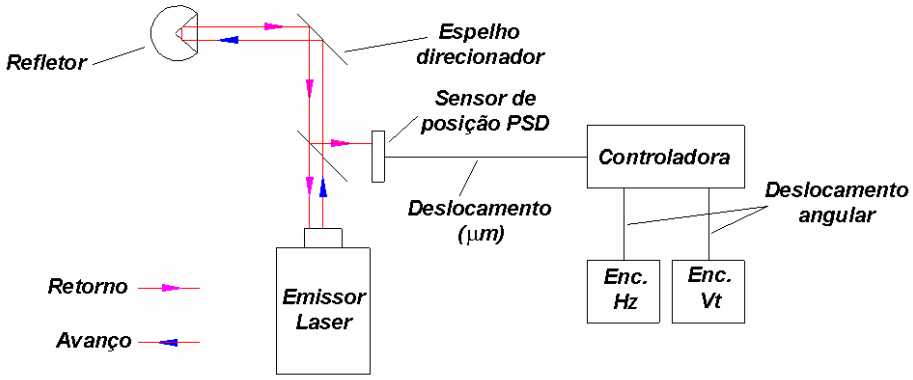


Ilustração 2.31: Trajetória do laser



Características técnicas do Laser Tracker:

Laser Interferométrico *(IFM)*:

- Princípio de funcionamento	interferômetro de raio único
- Produto a laser classe 2	<0.3 mW/CW
- Comprimento de onda	633 nm (visível)
- Diâmetro do laser (1/e2)	ca. 4.5 mm

Máxima velocidade de rastreamento:

- Angular	> 4.0 m/s
- Na direção do laser	> 6 m/s

Aceleração máxima:

- Em todas as direções	> 2 g

Campo de medição:

- Horizontal	± 235°
- Vertical	± 45°
- Distância	0 - 40 m

Precisão:

- Resolução angular	0.14”
- Resolução linear (distância)	1.26?m
- Repetitividade de uma coordenada	± 5 ppm (µm/m)
- Precisão absoluta de uma coord.:	
.alvo estático	± 10 ppm (µm/m)
.alvo dinâmico	± 20 - 40 ppm (µm/m)

Capacidade máxima de medição	1000 pontos/seg.

Laser para medição de distância absoluta *(ADM)*:

- Principio de funcionamento	luz polarizada modulada
- Produto a laser classe 1	<0.5 mW/2sec.
- Comprimento de onda	780 nm (infravermelho)
- Diâmetro do laser	ca. 10 mm
- Resolução	1 µm
- Precisão	± 0.025 mm
- Alcance	1.5 - 40 m

Condições ambientais:

- Temperatura de trabalho	+5 à +40 ?C
- Temperatura de armazenagem	-10 à +60 ?C
- Umidade relativa	10 à 90 ? (sem condensação)
- Pressão atmosférica / elevação	
.operação	0 à 3000 m
.armazenagem	0 à 7000 m

Fonte: Catálogo Leica Laser Tracker - Portable Coordinate Measuring Machine for small and large objects – Ref. 713895en – XI.99

2.2.1 Aplicações do Laser Tracker – Calibração de robôs

As aplicações do Laser Tracker na indústria de grande porte são basicamente as mesmas aplicações do teodolito, porém executadas com maior rapidez e precisão. Em algumas aplicações como as descritas a seguir, o Laser Tracker se destaca quando comparado ao teodolito ou a outros equipamentos.

Uma aplicação que faz do Laser Tracker algo único é a calibração de robôs, pois o monitoramento da performance, calibração e inspeção de robôs, assim como a qualidade da instalação e manutenção, são tarefas difíceis e decisivas para manter a qualidade e conseqüentemente garantir o retorno de um investimento que normalmente é alto. Durante a calibração de um robô é possível controlar a precisão de posicionamento, a repetititividade, a precisão de movimentação, a velocidade, a aceleração e os erros inerentes à variação térmica. Essa verificação poderá ser feita durante a montagem ou periodicamente através da manutenção preventiva, garantindo a qualidade do processo por um longo tempo. O teste consiste basicamente em fixar um refletor na ponta do robô (“end-efector” ou “finger”) e medir seu movimento, repetindo esse procedimento várias vezes (ilust. 2.32 e 2.33). Os valores encontrados poderão ser comparados aos valores especificados pelo fabricante.

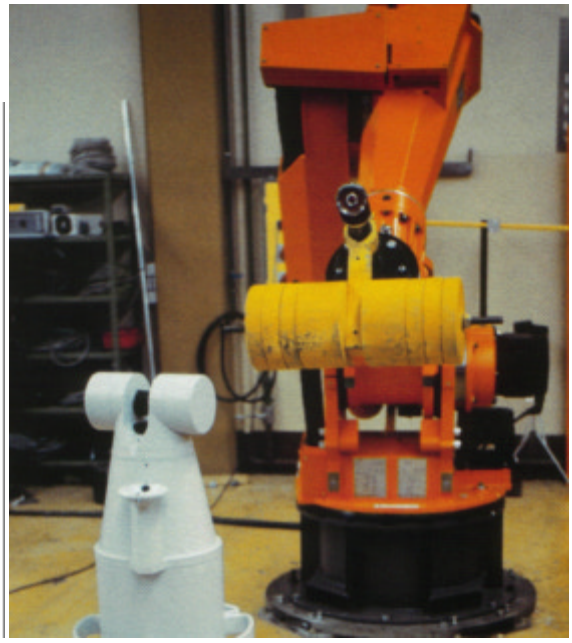
As vantagens na utilização do Laser Tracker para a calibração de robôs são:

- Precisão típica de 0,05mm à 0,1mm num campo de 2m à 6m;
- Os testes de calibração são feitos conforme norma internacional ISO-9283;
- Os testes podem ser executados antes e depois de uma manutenção, facilitando a visualização do resultado obtido com o serviço de reparo;

- Os resultados numéricos e gráficos dos testes podem ser armazenados em disquetes ou impressos de forma clara facilitando sua interpretação;
- O teste pode ser executado no local onde o robô esta instalado garantindo assim, a mínima perda de produção e resultados mais próximos da realidade.

Ilustração 2.32: Ilustração da calibração de robôs

Ilustração 2.33: Calibração de robô



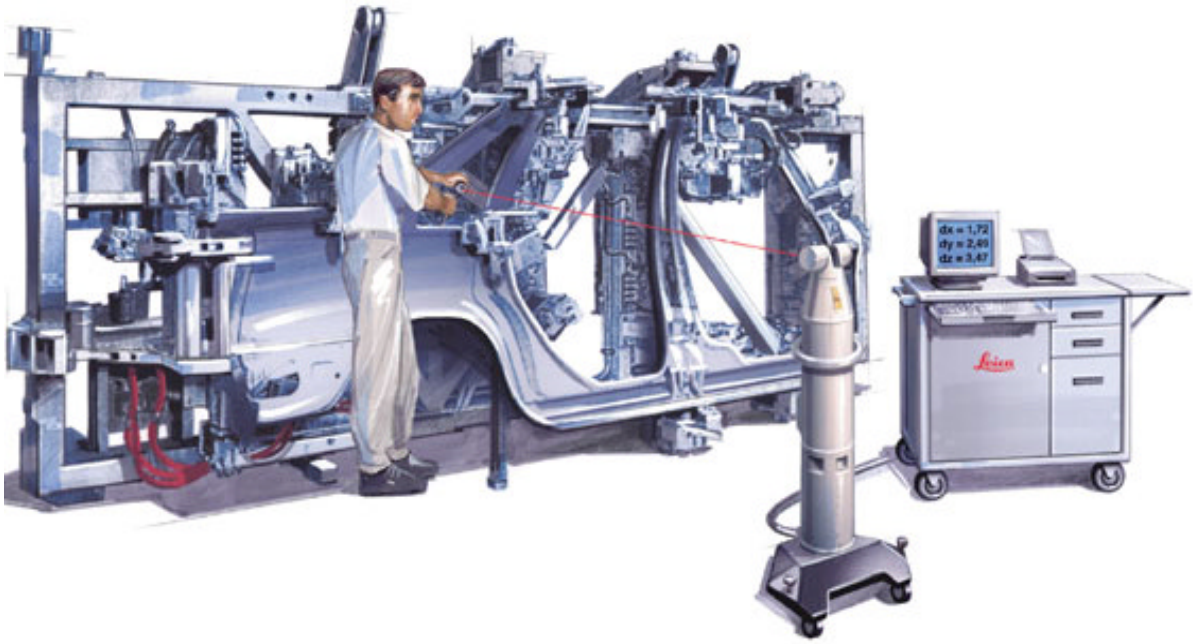
Fonte: Catálogo Leica Laser Tracker - Portable Coordinate Measuring Machine for small and large objects – Ref. 713895en – XI.99

2.2.2 Aplicações do Laser Tracker – Fabricação de dispositivos

A fabricação de dispositivos pode ser executada por vários equipamentos como teodolitos e braços de medição, mas é uma das mais importantes aplicações do Laser Tracker (ilust. 2.34 e 2.35). Nenhum equipamento supera o Laser Tracker nessa aplicação, pois ele é mais confiável e preciso, especialmente na medição de grandes dispositivos ou quando utilizado para o alinhamento de vários dispositivos entre si.

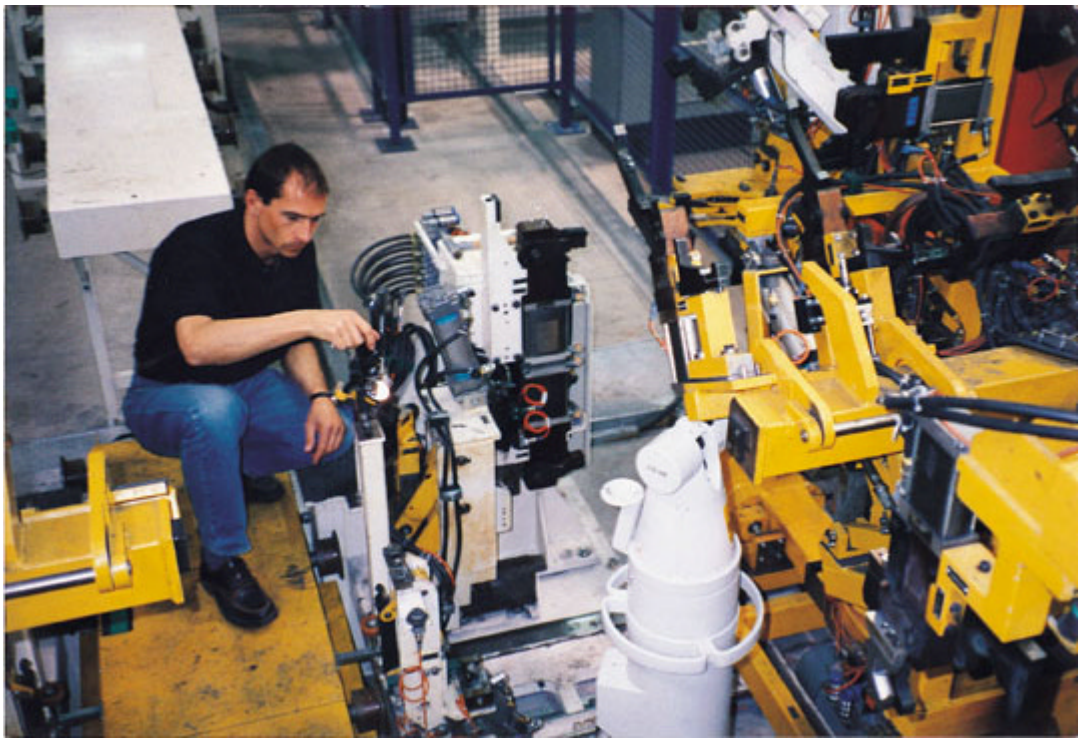
O software que opera o Laser Tracker assim como o teodolito, possui ferramentas especialmente desenvolvidas para a fabricação (“*Build*”) e o controle *(Inspect)* de dispositivos, permitindo que isso seja feito direto do modelo CAD e não de modelos físicos (“Mock-up”). Com o “*Build*” (construção) é possível posicionar suportes, pinos localizadores, fixadores, superfícies complexas e outros itens que compõem um dispositivo. O “*Inspect*” (inspeção) *ou “Auto-Inspect”* possibilita uma medição automática, rápida e precisa de um dispositivo, sendo necessário somente posicionar o Laser Tracker no sistema de coordenadas da peça, colocar refletores e indicar as coordenadas aproximadas dos pontos a serem medidos. Em seguida o Laser Tracker irá localizar e medir todos os pontos, fornecendo as coordenadas reais e os desvios em relação as coordenadas teóricas de cada ponto. O *“Auto-Inspect”* é muito utilizado na verificação periódica de dispositivos, e utiliza o *ADM* durante a medição e não o *IFM* .

Ilustração 2.34: Desenho ilustrando a montagem de um dispositivo utilizando o “Build”



Fonte: Catálogo Leica Laser Tracker - Portable Coordinate Measuring Machine for small and large objects – Ref. 713895en – XI.99

Ilustração 2.35: Aferição de um dispositivo com o Laser Tracker

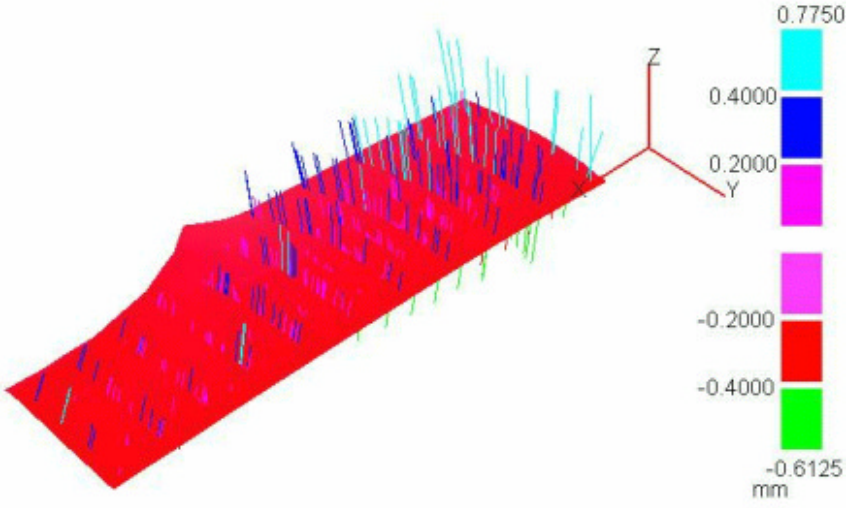


Fonte: Foto gentilmente cedida pela Leica Geosystems Inc.

2.2.3 Aplicações – Inspeção de superfícies em relação ao modelo de CAD

Com a fabricação dos dispositivos, protótipos e produtos através de modelos matemáticos (CAD), surgiu também a necessidade de sistemas mais rápidos para o controle dimensional, principalmente quando é necessário uma grande quantidade de pontos para a execução do trabalho. Muitos equipamentos normalmente utilizados para a aquisição dos pontos como CMM's, teodolitos e braços de medição são muito lentos, porém com o surgimento do Laser Tracker houve também um dos maiores avanços nesse tipo controle dimensional, que é a verificação de superfícies inteiras de peças através de modelos de CAD e não mais o controle de pontos específicos da superfície da peça (ilust. 2.36).

Ilustração 2.36: Controle de uma superfície em relação ao modelo de CAD



Fonte: Software Axyz CAD da Leica

Um exemplo é o controle da superfície de uma ferramenta de estampar peças utilizando como referência o modelo matemático que o originou. Esse recurso torna possível verificar e corrigir uma falha ainda na fabricação da ferramenta e não no produto acabado, evitando assim qualquer desperdício de tempo e produção ou ainda, evitando erros inerentes à fatores externos como a manipulação, pois quando se utiliza o Laser Tracker ou o teodolito, a máquina vai ao produto e não o produto à máquina (ilust. 2.37).

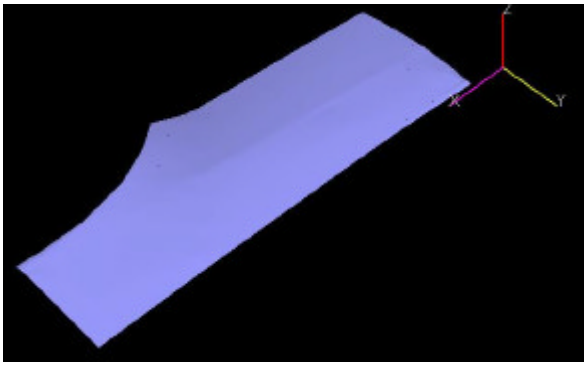
Fig. 2.37: Digitalização de uma peça com o Laser Tracker

2.2.4 Aplicações do Laser Tracker – Engenharia Reversa (ER)

Os milhares de pontos digitalizados com o Laser Tracker são utilizados também para a geração de desenhos de peças (CAD) através da Engenharia Reversa (ER). Isso é feito enviando-se a nuvem de pontos coletada com o Laser Tracker a um software especifico para a geração de superfície (Ex. Unigraphics, CATIA, Surfacer, etc) onde um especialista irá criar através da nuvem de pontos um desenho o mais fiel possível da peça real (ilust. 2.38 e fig. 2.39).

Ilustração 2.38: Peça original

Ilustração 2.39: Desenho originado pela ER



2.2.5 Aplicações do Laser Tracker – Aferição geométrica de máquinas

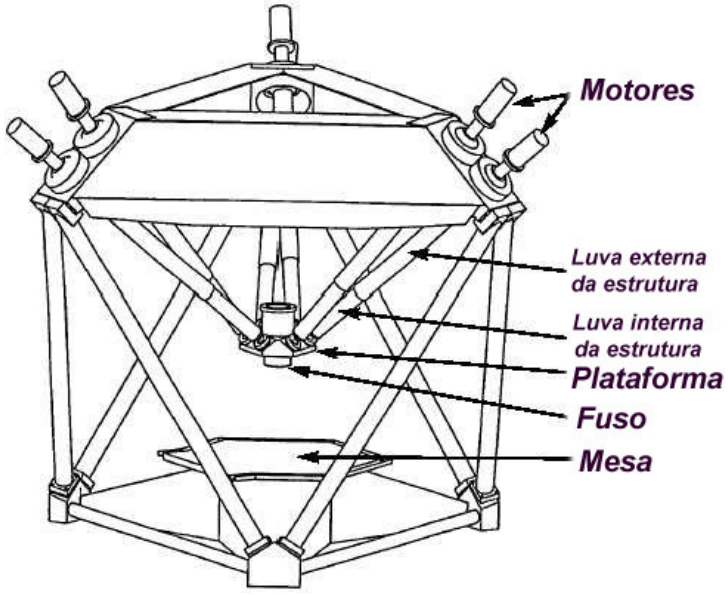
Outra aplicação de destaque que podemos mencionar é a aferição geométrica de máquinas de usinagem com o Laser Tracker.

> A garantia de um produto conforme é obtida de maneira eficaz, através do controle do processo de fabricação. As máquinas utilizadas devem ser confiáveis, estáveis e ter suas características conhecidas" [COSTA & BARCA, 2000].

Máquinas de usinagem CNC podem sofrer variações devido ao desgaste, fundação indevida ou ainda por variação térmica (causa de 50% dos erros geométricos das máquinas [Popa, 1999]) . Essa checagem consiste em fixar o refletor no fuso da máquina e executar movimentos de canto a canto, igual a um cubo (verificação volumétrica) [THEILER, 1997], ou simplesmente movimentar o refletor em posições pré definidas, e em seguida comparar os valores com os valores especificados pelo fabricante do equipamento. Tudo isto numa preparação única e rápida.

A utilização do Laser Tracker na verificação geométrica de equipamentos tem aumentado de tal forma que um dos maiores institutos de calibração dos EUA, o NIST (“National Institute of Standards and Tecnology” – laboratório de medições de grande porte ou “large scale metrology laboratory”) em Gaithersburg Maryland, vem utilizando o Laser Tracker em aplicações práticas de calibração de máquinas CNC e inclusive em testes numa máquina denominada “Octahedral Hexapod Machining Tool” (ilust. 2.40) [Pratice Report Leica, 1999].

Ilustração. 2.40: Figura ilustrativa da máquina Hexápode Fonte: Aplication



Report Leica – NIST Uses LTD500 to verify standards - Ref. U1-381-OEN – III.99

2.2.6 Aplicações do Laser Tracker – Usinagem virtual de peças

Durante a fabricação de peças e especialmente na fabricação de protótipos é necessário usinar vários modelos até obter o resultado desejado. Isto gera um custo muito alto, pois além dos materiais utilizados para a fabricação dos protótipos serem caros, alguns protótipos exigem uma grande quantidade de material para sua fabricação.

O Laser Tracker pode ser utilizado na usinagem de modelos *virtuais,* possibilitando assim comparar as coordenadas determinadas durante o teste com modelo CAD, isso faz com que os possíveis erros do programa CNC possam ser encontrados e corrigidos, tudo isso, sem perder tempo e sem a necessidade de usinar modelos normalmente feitos de materiais caros.

2.3 Sistema de Fotogrametria

Um outro sistema de altíssima tecnologia como o Laser Tracker, porém não muito recente como o teodolito é o Sistema de Fotogrametria (ilust. 2.41). A Fotogrametria vem sendo utilizada há muito tempo e sempre foi um sistema de alta precisão, porém a análise complicada das imagens aliada a softwares muito complexos, tornava a fotogrametria um sistema muito trabalhoso e demorado. Com o desenvolvimento das câmeras digitais atuais, softwares mais potentes e simples, aliados a computadores mais rápidos, a fotogrametria passou a ser um sistema extremamente prático, simples e muito preciso, além de ser uma das mais portáteis máquinas tridimensionais de longo alcance (ilust. 2.42) [LAUCK et al, 1999]. De um modo geral, podemos descrever a Fotogrametria como uma tecnologia que usa fotografias para gerar medições em 3-D.

Iluatração 2.41: Sistema antigo de Fotogrametria

Ilustração 2.42: Portabilidade do sistema de Fotogrametria

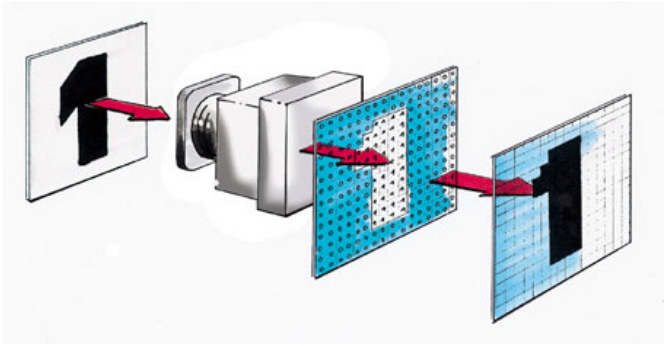
Fonte: Catálogo Leica V-STARS – Digital Photogrammetry for industry – Ref. 722307en – VI.2000

Alguns detalhes das câmeras, alvos e de alguns outros acessórios especialmente desenvolvidos para o sistema de fotogrametria serão apresentados a seguir.

Como foi mencionado, a Fotogrametria só foi empregada com maior freqüência em medições industriais com o surgimento das câmeras digitais, pois o processo de análise das medições feitas com filmes era extremamente trabalhoso. Basicamente são dois os tipos de câmeras utilizados nos Sistemas de Fotogrametria atuais (sistema de Fotogrametria GSI), a Kodak DCS (DCS 420 e DCS 460) que compõem o sistema V-STAR/E que é uma câmera digital profissional adaptada para medir, e a INCA (“INteligent Câmera” - INCA 4.2 e INCA 4.6 - ilust. 2.43) utilizada no sistema V-STARS/S e V-STARS/M, sendo essa desenvolvida especificamente para os sistema de Fotogrametria. Essas câmeras digitais utilizadas no sistema V-STARS possuem além de lentes intercambiáveis, um “chip” CCD (“Charge Couple Device”). Esse “chip” CCD está localizado no plano de imagem e consiste de uma matriz de “pixels”, e cada “pixel” transforma luz em sinal elétrico que aparecem no computador como um dígito, sendo “0” para escuro e “255” para luz e as imagens aparecem como uma matriz de números (ilust. 2.44) [Ref. U1-341-ODE-VII.97], [723 606en-X.2000].

Ilustração 2.43: Câmera INCA

Ilustração 2.44: Princípio do Sistema de Fotogrametria



Fonte: Catálogo Leica Axyz – Integrated Indústrial Measuring System – p. 14. Ref. 711090en – VI.99

Os alvos ou “targets” utilizados na fotogrametria, são elementos refletivos que devolvem para a câmera a luz emitida pelo flash, sendo essa luz convertida em sinal elétrico que será analisada pelo computador. Normalmente estes alvos retroreflectivos refletem a luz com muito mais intensidade que outros elementos refletivos, fazendo com que luzes externas ou o brilho da própria peça não interfiram na medição. São vários os tipos de alvos retrorefletivos, sendo os mais comuns os alvos adesivos que são colados nos pontos a serem medidos ou também em tiras para medição de superfícies (ilust. 2.45).

Outros tipos de alvos foram desenvolvidos para facilitar a medição de peças e também possibilitar a automação de processos de medição, como é o caso dos “tooling targets” (ilust. 2.46) que são alvos acoplados a suportes que são colocados em furos de referência do dispositivo. Os “tooling targets” do sistema de fotogrametria funciona com o mesmo principio dos “tooling targets” do teodolito e do Laser Tracker, permitindo que a fotogrametria trabalhe em conjunto com os dois outros sistemas. Além dos “tooling targets”, outro tipo de alvo muito importante principalmente em medições automatizadas é o “Selfidentifying targets” também conhecido como “coded targets” (alvos codificados – ilust. 2.47). Os “coded targets” possuem uma característica particular em relação aos outros alvos, pois são pequenas placas (ex.: 25mm x 25mm) que possuem um alvo circular no centro e outros pequenos alvos quadrados distribuídos de forma a identificar cada um individualmente, podendo ter até a 132 alvos diferentes. Durante a medição os “coded targets” são distribuídos ao redor do objeto a ser medido, referenciando o posicionamento da câmera e possibilitando que o software calcule todas as posições da mesma durante o processo de medição [BROWN & DOLD, 1995].

Através da colocação de “coded targets” em suportes especiais para cantos, superfícies, dentre outros, se originou um outro alvo muito importante para medições automatizadas, que é o “Feature Target” (ilust. 2.48). Como os “coded targets” são auto identificáveis, os “feature targets” podem também ser identificados e suas características de calibração compensadas durante a medição. [GANCI & CLEMENT, 2000].

Ilustração 2.45: Alvos ou Targets

Ilustração 2.46: Tooling Targets

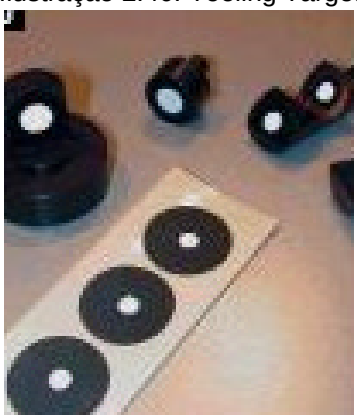


Ilustração 2.47: Alvo Codificado

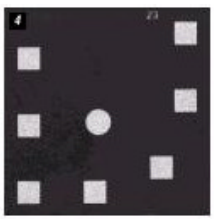
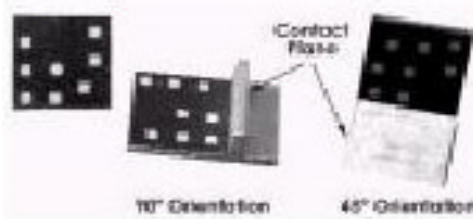


Ilustração 2.48: “Feature Target”



Fonte: Catálogo Leica V-STARS – Digital Photogrammetry for industry – Ref. 722307en – VI.2000

Além dos alvos mencionados acima, há um tipo de alvo utilizado para medição de grandes superfícies como antenas parabólicas e grandes peças de automóveis. Esse não se trata de um alvo físico como os outros, mas sim de um alvo de luz que é projetado na peça fração de segundos antes da foto ser capturada, isso através de um emissor de luz denominado de “Pro-spot” (ilust. 2.49).

O “Pro-spot” pode projetar milhares de pontos a cada medida. [GANCI & BROWN, 2000].

Ilustração 2.49: Projetor de alvos “Pro-spot”

Fonte: Catálogo Leica V-STARS – Digital Photogrammetry for industry – Ref. 722307en – VI.2000

O sistema de fotogrametria assim como o teodolito e o Laser Tracker, são sistemas avançados de medição mas que não necessitam de computadores muito potentes para seu funcionamento podendo trabalhar com um PC comum ou um Notebook, não necessitando de estações de trabalhos específicas e principalmente de alto custo.

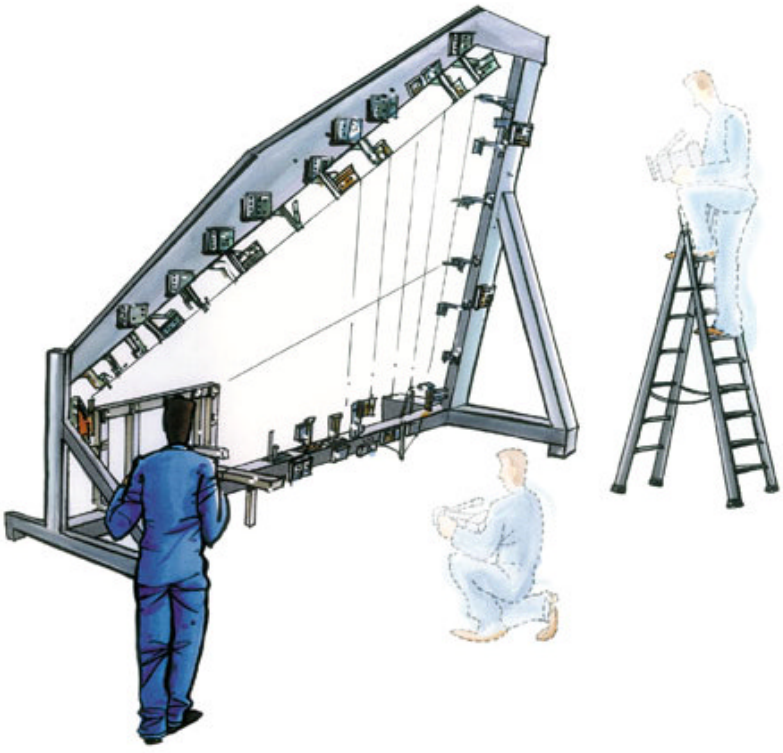
Os sistemas de fotogrametria podem trabalhar juntamente com os seguintes softwares:

- CAM II automotive (FARO Europe, antigo CATS);
- Power inspect (DELCAM);
- HOLOS NT (Zeiss);
- Metrosoft CM3 (Metromec);
- Metrolog II (Metrologic);

Além disto, o sistema de fotogrametria pode comunicar com outros softwares através da importação e exportação de arquivos em formato IGES e VDA dentre outros.

O sistema de Fotogrametria pode executar medições em dois modos, “off-line” e “on-line”. No modo de medição “off-line”, os alvos são colocados nos pontos a serem medidos, então uma única câmera é usada para fotografar o objeto em diversas posições (ilust. 2.50). A câmera pode enviar as fotos para o computador via cabo ou nos sistemas mais novos via rádio, ou as imagens podem ser armazenadas em um cartão “PCMCIA” para serem analisadas posteriormente.

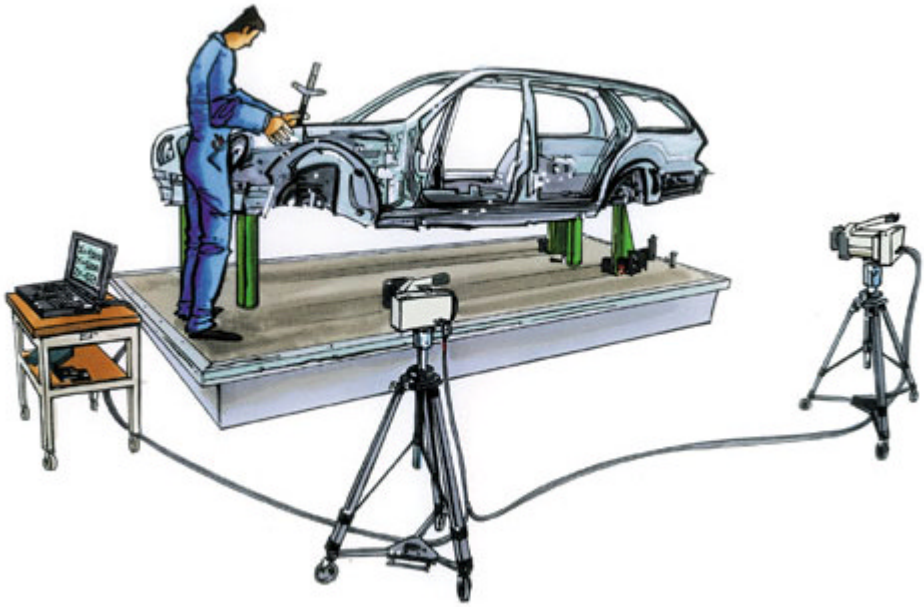
Ilustração 2.50: Medição com o sistema de fotogrametria no modo “off-line”



Fonte: Catálogo Leica V-STARS – Digital Photogrammetry for industry – Ref. 722307en – VI.2000

No modo “on-line”, o objeto é fotografado simultaneamente por duas ou mais câmeras de diferentes posições (ilust. 2.51), e a imagem é processada imediatamente. Nesse sistema o resultado da medição é fornecido em segundos.

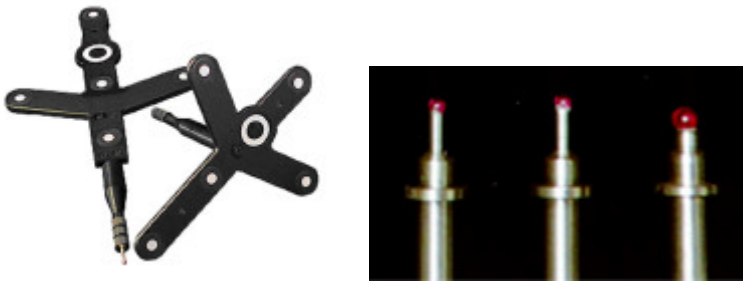
Ilustração 2.51: Medição com o sistema de fotogrametria no modo “on-line”



Fonte: Catálogo Leica V-STARS – Digital Photogrammetry for industry – Ref. 722307en – VI.2000

No sistema “on-line”, é possível executar medições utilizando além dos alvos convencionais, outro dispositivo denominado “Probe”. Os “Probes” ou apalpadores, são dispositivos que possuem alvos retroreflectivos montados em seu corpo em posições previamente calibradas. Durante a medição, os alvos montados no corpo do apalpador são capturados e o software reconhece automaticamente o diâmetro e a posição da ponta de rubi montada no apalpador, incluindo seus parâmetros de calibração [BROWN & DOLD, 1995] (fig. 2.52).

Ilustração 2.52: Apalpador vertical, horizontal e pontas



Fonte: Catálogo Leica V-STARS – Digital Photogrammetry for industry – Ref. 722307en – VI.2000

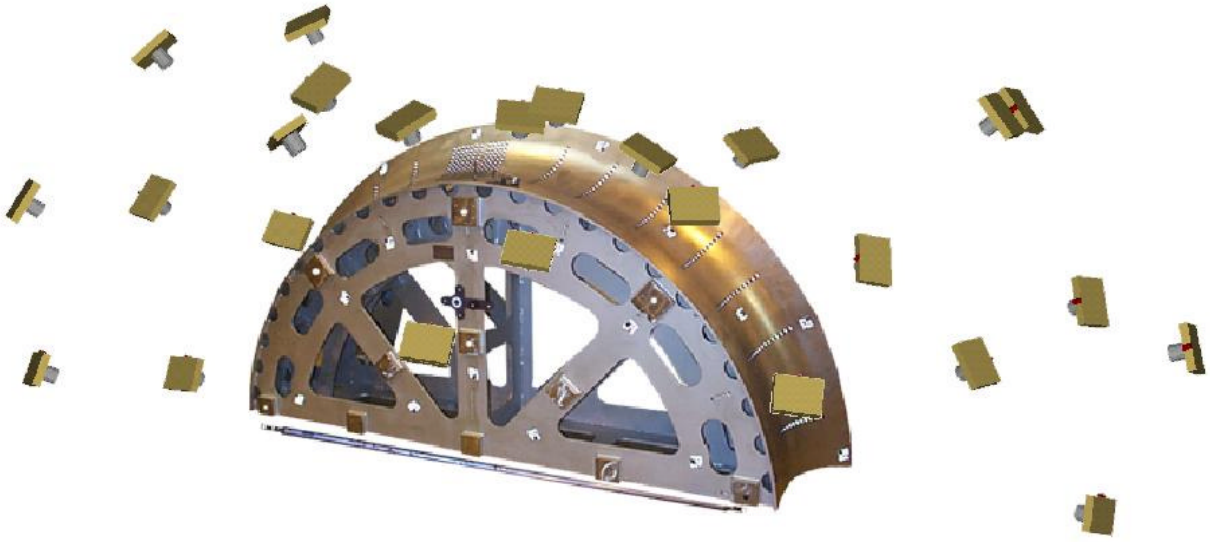
Independente do modo de medição, “on-line” ou off-line”, a medição de um objeto através da Fotogrametria pode ser descrita por cinco fases distintas.

- *O planejamento*: onde deve ser analisado dentre outras coisas as posições e o número de fotos e dos alvos além da utilização de cartão PCMCIA ou computador para armazenamento dos dados.

- *Colocação dos alvos:* onde deve ser feita de forma a abranger o máximo de informação. Caso algum alvo não seja fotografado ou não tenha sido colocado no objeto a ser medido, o mesmo poderá ser medido posteriormente e o ponto adicionado ao restante trabalho.

- *Captura das fotos:* no modo “off-line”, deverá ser tirado o maior número de fotos possível (ilust. 2.53), porém tanto no modo medição “on-line” quanto no “off-line”, as câmeras deverão estar dispostas uniformemente, de forma a gerar o melhor ângulo possível entre elas.

Ilustração 2.53: Posicionamento das câmeras em uma medição “off-line”

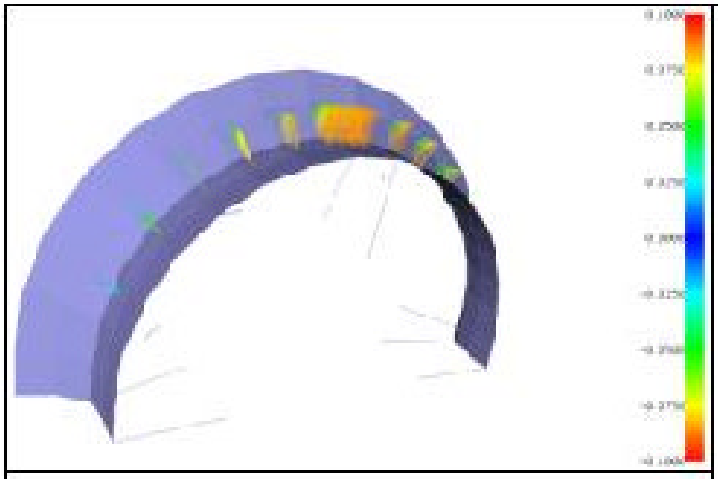


Fonte: Foto gentilmente cedida pela Leica Geosystems Inc.

- *O processamento das imagens:* que pode ser feito em alguns segundos, após as fotos serem tiradas no modo “off-line” ou imediatamente após no modo “on-line”. O tempo de processamento das imagens é diretamente proporcional à capacidade do computador utilizado, e principalmente ao número de alvos e de fotos tiradas.

- *Análise dos dados:* que incluem toda as análise dos elementos medidos em relação a um padrão que pode ser matemático (CAD) ou simplesmente dimensões especificadas por um processo de fabricação. O software permite também executar análises de elementos geométricos comuns, como cilindros, cones, planos, círculos, esferas e parábolas, ou ainda análises de superfícies complexas de peças comparando com um modelo CAD, gerando em seguida relatórios gráficos e numéricos da medição (fig. 2.54) [BROWN & DOLD, 1995].

Ilustração 2.54: Relatório de medição



Point Label	Delta X	Delta Y	Delta Z	Tota
TARGET1	-0.0497	-0.0284	0.0026	-0.0573
TARGET2	-0.0491	-0.0282	0.003	-0.0567
TARGET3	-0.0487	-0.0285	0.0036	-0.0565
TARGET4	-0.0481	-0.0281	0.004	-0.0562
TARGET6	0.0483	0.0283	0.0052	0.0559
TARGET6	-0.0485	-0.0283	0.0057	-0.0507
TARGET7	-0.0401	-0.0253	0.000	-0.0332
TARGET8	-0.0465	-0.0253	0.0068	-0.0525
TARGET9	-0.0475	-0.0313	0.0022	-0.0573

Fonte: Foto gentilmente cedida pela Leica Geosystems Inc.

2.3.1 Aplicações da Fotogrametria – Medições de objetos de grande porte

O sistema de Fotogrametria tem como uma das principais características a portabilidade, sendo mais portátil que o teodolito, o Laser Tracker e os braços de medição. Devido a essa característica, a Fotogrametria é um sistema indicado para controle dimensional de peças, especialmente de grandes dimensões (ilust. 2.55), pois permite que o objeto seja medido em qualquer fase do processo de fabricação mesmo em ambientes não controlados, e que eventuais erros possam ser identificados e corrigidos, evitando-se gastos com retrabalho. A grande portabilidade da fotogrametria permite também ao produto ser aferido e certificado no seu local de fabricação e principalmente no local onde será instalado, evitando eventuais problemas ocasionados pelo transporte ou má instalação.

Fig. 2.55: Medição de navios com sistema de Fotogrametria

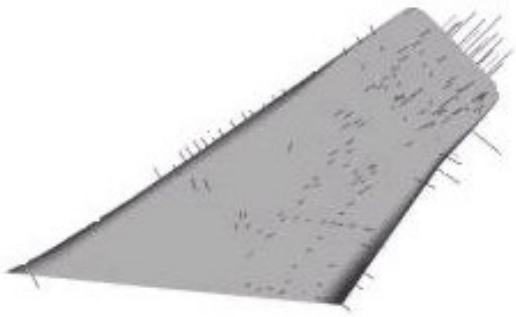
Fonte: Aplication Report – V-STARS in shipbuilding and nuclear industry - Ref. U1-346-OEN – III.98

2.3.2 Aplicações da Fotogrametria – Verificação de superfícies complexas e ER

A aferição de superfícies complexas com a fotogrametria é feita tomando como referência um modelo matemático (CAD). Através desse método de verificação de superfícies, é possível identificar dentre outras coisas, eventuais problemas geométricos decorrentes de colisões (ilust. 2.56 e 2.57), desgaste ou falha no processo de fabricação (ilust. 2.58.), ou ainda a fidelidade de um “mock-up” em relação ao modelo matemático que o originou (ilust. 2.59). Essa mesma nuvem de pontos pode ser utilizada na geração de modelos matemáticos através de ER (Engenharia Reversa).

Ilustração 2.56: Ponta de asa

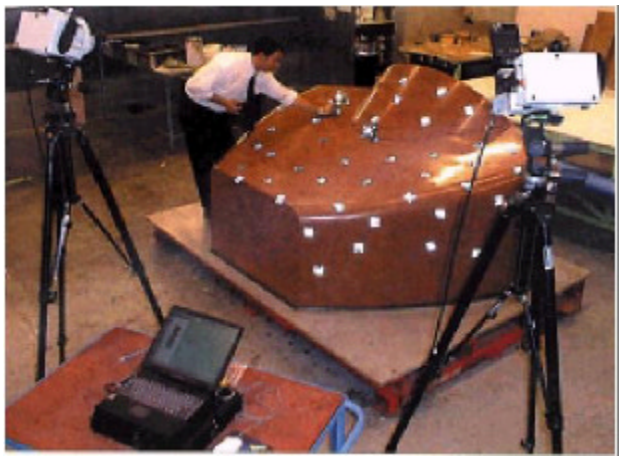
Ilustração 2.57: Análise da ponta de asa



Fonte: Aplication Report Leica – V-STARS in Aerospace Manufacturing - Ref. U1-345-OEN – III.98

Ilustração2.58: Análise de uma antena

Ilustração 2.59: Análise de um “mock-up” de helicóptero



Fonte: Aplication Report – GKN Westland goes for productivity boost - Ref. U1-398-OEN – VI.2000

2.3.3 Aplicações da Fotogrametria – Medição de dispositivos automotivos

Após o desenvolvimento de alvos codificados e alto identificáveis, a Fotogrametria passou a ser também um sistema muito viável na medição de dispositivos de montagem e solda (ilust 2.60 e 2.61). A medição de um dispositivo com a utilização desses alvos, chega a um sétimo do tempo da medição com a utilização de alvos retro refletivos comuns, conforme mostra a tabela 2.1 [GANCI & CLEMENT, 2000].

Tabela 2.1: Comparativo da medição com FTs x alvos comuns

Descrição	Medição com FTs	Medição com alvos comuns
Número de alvos	40 FTs	320
Colocação dos alvos	5 minutos	25 minutos
Medição com apalpador	---	15 minutos
Remoção dos alvos	3 minutos	20 minutos
Fotografias	2 minutos	2 minutos
Processamento dos dados	2 minutos	3 minutos
Analise dos dados	3 minutos	30 minutos
Tempo total	15 minutos	95 minutos

Fonte: Aplication Report Leica – MAN trucks - Ref. 723674en - XI.2000

Ilustração 2.60: Medição com FT

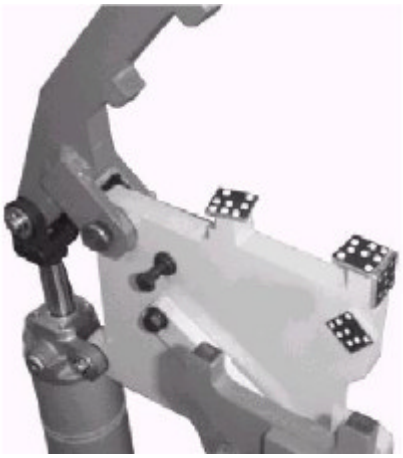


Ilustração 2.61: Medição de “Skid” em fábrica de caminhões

Fonte: Aplication Report Leica – MAN trucks - Ref. 723674en - XI.2000

2.3.4 Aplicações da Fotogrametria – Medição em condições especiais

Quando é necessário medir um objeto em um determinado ambiente que possua características especiais como em túneis de vento, áreas com radioatividade (ilust. 2.62), altas temperaturas, pressão ou vácuo, descarta-se a utilização de equipamentos convencionais, devido às condições do local ou às dimensões do objeto. Para esse tipo de aplicação o sistema de medição mais indicado é o sistema de fotogrametria, devido principalmente à possibilidade de trabalhar sem a presença de pessoas. Para esse tipo de aplicação são necessárias duas ou mais câmeras INCA (V-Stars M), onde o objeto é fotografado e as imagens são enviadas automaticamente para um computador que processa as imagens e fornece as dimensões da peça em tempo real. Para que isso possa ser feito as câmeras são preparadas especialmente para trabalhar nesse tipo de ambiente, utilizando um invólucro especial chamado ICAN (ilust. 2.63) [BROWN, 1999].

Ilustração 2.62: Medição de um gerador de vapor em usina nuclear

Ilustração 2.63: ICAN

Fonte: Aplication Report – V-STARS in shipbuilding and nuclear industry - Ref. U1-346-OEN – III.98

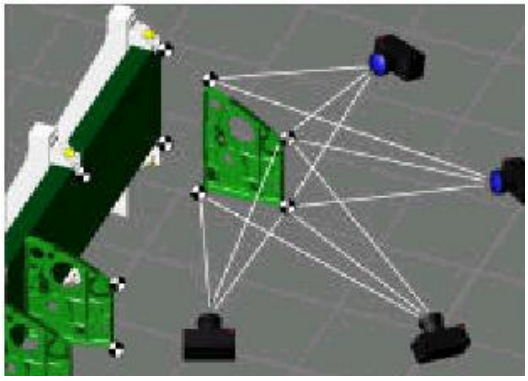
2.3.5 Aplicações da Fotogrametria – Posicionamento automático de peças

Uma aplicação relativamente nova que vem sendo utilizada com muito sucesso, é o posicionamento automático de peças com robôs (ilust. 2.64 e 2.65) ou em máquinas de usinagem CNC com a utilização de sistema de fotogrametria. Durante o posicionamento automático de peças através de robôs, são colocados alguns alvos codificados na peça e outros no dispositivo ou elemento onde este será montado. Em seguida as imagens são capturadas e o posicionamento relativo entre os alvos é calculado pelo computador, que compara os dados fornecidos pelo sistema de fotogrametria com o posicionamento de referência. Após o cálculo dos desvios de posicionamento, o computador envia as informações necessárias para o controlador do robô que corrige o posicionamento automaticamente. Durante o posicionamento do objeto, o cálculo é executado várias vezes e a trajetória é corrigida até o posicionamento preciso do objeto (ilust. 2.66).

Ilustração 2.64: Esquema ilustrando o posicionamento de peças com robô.

Ilust. 2.65: Posicionamento de peça com robô

Ilustração 2.66: Medição de posicionamento

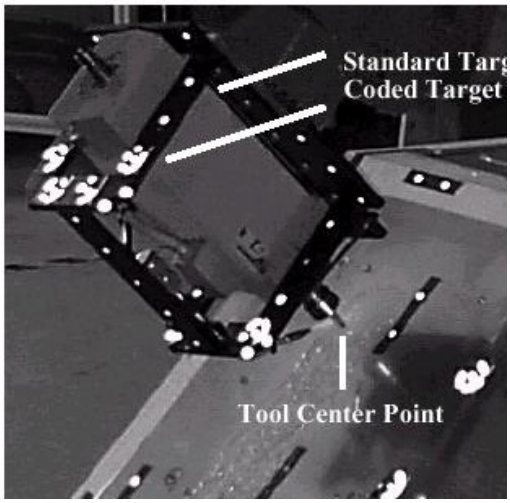


Fonte: Paper – An embedded metrology system for aerospace application – Dr Clarke and Dr Wang

Em máquinas usinagem CNC o processo de posicionamento é praticamente o mesmo, são colocados alguns alvos codificados na mesa da máquina que são previamente referenciados em relação à sua origem, e em seguida coloca-se alvos na peça a ser medida. Em seguida as imagens são capturadas e o posicionamento relativo entre os alvos é calculado pelo computador, que compara os dados fornecidos pelo sistema de fotogrametria com a origem de referência da máquina. Após o cálculo dos desvios de posicionamento, o computador envia as informações necessárias para o comando CNC da máquina, que corrige o posicionamento automaticamente. Durante o posicionamento do objeto, o cálculo é executado várias vezes e a trajetória é corrigida até o posicionamento preciso do objeto, nesse caso é calculado o posicionamento relativo entre a peça e a aresta de corte da ferramenta, ao invés do posicionamento entre peças. Esse tipo de aplicação é muito comum em máquinas-ferramenta com mais de cinco eixos ou robôs especialmente preparados para executar serviços de usinagem (ilust. 2.67 e 2.68) [CLARKE & WANG] e [BEYER, 1999].

Ilustração 2.67: Robô executando uma furação

Ilustração 2.68: Posicionamento de máquina



Fonte: Paper – 3D Image Metrology and Machine Control – Horst A.Beyer – Imetric SA

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Tema

A otimização do processo de inspeção de moldes e pás para geradores de energia eólica através da utilização do Laser Tracker.

(...)

DEVIDO AO TRABALHO CONTER INFORMAÇÕES DE PROPRIEDADE DA EMPRESA ESTUDADA, DESTE PONTO EM DIANTE O TRABALHO É DE CARÁTER RESERVADO.

AS INFORMAÇÕES DE INTERESSE DEVEM SER SOLICITADAS DIRETAMENTE AO AUTOR.

4 CONCLUSÃO

Com base nos dados apresentados neste trabalho de pesquisa, pode-se concluir que as máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance para medição tridimensional podem ser utilizadas como fator de otimização fabril em diversos setores das indústrias mecânicas de grande porte, trazendo muitos benefícios, dos quais podemos citar a rapidez, a versatilidade e a confiabilidade, dentre outras coisas.

Apesar da clara vantagem na utilização desses equipamentos quando comparado aos processos convencionais de medição, ainda existe muito a se explorar nessa área de pesquisa, pois a grande falta de informação sobre esse tema, tanto nas indústrias quanto nas universidades, traz muitas dúvidas e incertezas ao usuário, o que provoca uma consequente restrição ao uso desses equipamentos. É importante salientar que esse trabalho é um pequeno, mais importante passo, que foi dado no sentido de esclarecer as principais dúvidas sobre esse tema, principalmente por que trata não somente de informações teóricas, mas também porque aborda vários casos práticos ocorridos em vários países, principalmente do continente europeu e norte americano, onde a utilização desses equipamentos e muito mais difundida.

Vale a pena salientar que esse trabalho aborda somente três tipos de equipamentos, como mencionado, porém outros equipamentos lançados recentemente que trabalham com diferentes princípios de funcionamento, poderão ser abordados no futuro em outros trabalhos de pesquisa, porém a principal idéia que se quis apresentar aqui, é a de que independente do princípio de funcionamento do equipamento utilizado e do ramo de atuação do industria em que se está

aplicando essa tecnologia, as máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance para medição tridimensional podem trazer muitos benefícios para o processo de fabricação, e que muitos esforços serão necessários para que cheguemos num nível de excelência dos países de primeiro mundo.

REFERÊNCIAS

Toledo Jr, Fides Bueno de. Estudo da viabilidade econômica – ITYS. Editora ITYS, 1988.

Marcovitch, Jacques. Estratégia tecnológica na empresa brasileira. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo –1999.

Sandwith, Scott C., “Gageless Tool Building with Computer-Aided Theodolites”. Practice Report Leica, Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, Washington 1993.

Münch, K. H. e Baertlein, H., “Dimensional Measuring Techniques in the Automotive and Aircraft Industry”, Practice Report Leica, Leica AG CH-5035 Unterentfelden, Switzerland - 1994, 8p.

Catálogo Leica, “Electronic Precision Theodolites for Industrial Applications”, Ref. U1-300-OEN-IV.98, 1998, 12p.

Catálogo Wild Autocat, “Automatic Theodolite Measurement System”, Ref. G1 385-1e – III.90, 1990, 2p.

Horch, Günter; Haas, Harald e Bauer, Gerhard - “A mobile metrology unit for universal application”, Practice Report Leica, Audi Neckarsulm Germany, 1993, 8p.

Ahl, Wolfgang; Head of Quality Control, Schindler Waggon AG, Pratteln, Switzerland – Cadario Alfons; Head of Quality Control, SIG, Neuhausen am Rheinfall, Switzerland – Reitze, Thomas; Systems Engineer, Leica AG, Unterentfelden, Switzerland - “Quality assurance in the manufacture of rolling stock”, Practice Report, Leica, 1993, 8p.

Manninen, Markku e Kaisto, Ilkka A.M.S. Ltd, Oulu/Finland - “3D Positioning of a Ship Block at Hull Erection”, Practice Report, Leica, 1996, 4p.

Catálogo Leica, “Dimensional Control and Analysis of large scale assemblies with DCA system”, Ref. 712 635en - VI.99, 1999, 8p.

Catálogo Leica, “Single Sensor 3-Dimensional Control and Analysis System for large scale assemblies”, Ref. U1-288-OEN-X.95, 1995, 6p.

“TMS Off-Line in the Shipbuilding Industry”, Practice Report Leica, Boelwerf NV, Belgium, 1993,4p.

Signoret, Patrick, Dipl. Ing., Product Manager, PMU Civil Engineering, Leica Heerbrugg AG, France - “Monitoring deformation of cooling towers”, Practice Report Leica, 1991, 6p.

“Leica total station align large antennas”, Practice Report, Leica, Disponível em: <http://www.leicageosystems.com, 3p.

“World’s Largest Telescope assembled using Leica Total Stations”, National Radio Astronomy Observatory (NRAO), Green Bank, West Virginia (WV), Application Report, Leica, 1999, 2p.

Katowski, Olaf, Dipl. Ing., Head of Civil Engineering, Leica Heerbrugg AG - “Motorized Theodolite Systems for Automatic Guidance of Slow Moving Tunnel Construction Machines”, Practice Report Leica, 1993, 6p.

“Leica’s Approach to High-Precision Dynamic 3D Coordinate Determination”, Leica Product Information, Smart 310, 1991, 8p.

Greenwood , Thomas A., MR&D Optics Engineer, Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, Washington - “Rapid Contour Measurement of Composite Structures Utilizing a 3D Tracking Interferometer”, Practice Report, Leica, 1993, 8p.

“3D-Laser Tracking Systems – The Hardware”, Ref. U1-294-OEN-VIII.97, 1997, 6p.

Catálogo Leica, “Portable Coordinate Measuring Machine for small and large objects”, Ref. 713 895en – XI.99, 1999, 12p.

“Integrated Industrial Measuring System”, Ref. 711 090en – VI.99, 1999, 16p.

Stone, Jack A.; Howard, Lowell; National Institute of Standards and Technology MD, USA 20899 e Stejskal, Alois; Institute Of Scientific Instruments, AVCR, Brno, Czech Republic - “Sources of Error In Absolute Distance Interferometry”- Tese apresentada no Simpósio Internacional sobre Metrologia a Laser, na UFSC, 1999, 8p

Costa, Sebastião Carlos e Barca, Luiz Fernando; Escola Federal de Engenharia de Itajubá, IEM/DPR - “Qualificação de sistemas de fabricação: o uso de sistema laser em ensaios de robôs industriais”, Internet, 4p.

Wing, Stephanie e Robertson; University of Washington -“Industrial Robots Gain a Finer ‘Touch’ ”, Practice Report, Leica, 2000, 2p.

Catálogo Leica, “Krypton/Leica system for robot metrology”, Ref. U1 – 270 – OEN XI.94, 1994, 4p.

Catálogo Leica, “3D Laser Tracker”, Ref. U1 206e– V.93, 1993, 8p.

Prof. Dr. Eng. Popa, Marcel S.; Faculty of Machine Building, Technical University of Cluj-Napoca, Romania, Europe - “Analysis of the components errors in machine tools and robots linked with the thermal behaviour”- Tese apres. no Simpósio Internacional sobre Metrologia a Laser, na UFSC , 1999, 4p .

“Laser Tracker for production of automotive Tooling”, Pico Europe, Practice Report, Leica, 2000, 8p.

“Assembly of Aircraft Body”, Airbus, Practice Report, Leica, 2000, 1p.

Theiler, Robert, “Laser Tracker Applications at Boeing”, Practice Report, Leica, 1997, 1p.

“Laser Tracker replaces yard stick”, Daimler-Benz Aerospace, Practice Report, Leica, 1998, 1p.

“Laser Trackers for Brookhouse”, Brookhouse, Practice Report, Leica, 2000, 1p.

“Leica Laser Tracker”, DaimlerChrysler Arospace Airbus, Practice Report, Leica, 1999, 1p.

“Einmessung von Percetron-Sensoren mit dem Leica Laser Tracker”, Practice Report, Leica, 2000, 4p.

“Nist uses LTD-500 to verify standards”, Practice Report, Leica, 1999, 2p.

Lauck, Lothar Dr. Ing.; Schenk, Steffen, Dipl. Ing. e Steindorf, Wolfgang, Dipl. Ing.; Ingenieurburo Dr. Lauck & Partner GbR - “Use of the Leica V-STARS/E Videogrammtry System in Railway Coach Building”, Dresden, Practice Report, Leica, 1999, 6p .

Catálogo Leica, “Videogrammetry systems for industry”, Ref. U1-341-ODE-VII.97, 1997,8p.

“Digital Photogrammetry Systems for Industry”, Ref. 722307en – VI.2000, 6p.

Brown, John e Dold, Jürgen - “V-STARS – a System for digital industrial Photogrammetry”, Presented to Optical 3D Measurement Techniques Congress, Viena 2-4, Outubro 1995, Practice Report, Leica, 1995, 8p.

Brown, John; Geodetic Services, Inc. Melbourne, Florida - “V-STARS Target Acceptance Test Document”, Pactice Report, Leica, 1999, 4p.

Ganci, Giuseppe; Geodetic Services, Inc., Melbourne, Florida e Clement, Robert; BMW Manufacturing Corporation, South Greer, South Carolina USA - “The use of Self-identifying Targeting for Feature Based Measurement”, Pactice Report, Leica, 2000, 8p.

Ganci, Giuseppe e Brown, John; GSI, Melbourne, Florida - “Developments in Non-contact Measurement Using Videogrametry”, Pactice Report, Leica, 11p.

“Target Projector for non-tactile measurements”, Practice Report, Leica, 1999, 2p.

Dold, Jürgen; Leica Geosystems AG - “The hole of a digital intelligent camera in automating industrial Photogrametry”, Practice Report, Leica, 1998, 8p.

“V-STARS in shipbuilding and nuclear industry”, Practice Report, Leica, 1998, 1p.

“V-STARS in Aerospace Manufacturing”, Practice Report, Leica, 1998, 1p.

“GKN Westland goes for productivity boost”, Practice Report, Leica, 2000, 2p.

“V-STARS brings increased productivity in truck building”, Practice Report, Leica, 2000, 2p.

Brown, John; Geodetic Services, Inc. Melbourne, Florida - “Photogrametric Measurement in Thermal Vacuum Chambers”, Pactice Report, Leica, 1998, 8p.

Clarke, Tim Dr. e Wang, Xinchi Dr.; Optical Metrology Centre, Dept. Electronic, and Information Engineering, City Univresity, Northampton Square, London - “An embedded metrology system for aerospace applications”, Pactice Report, Leica, 10p.

Beyer, Horst A. ; Imetric SA, Technolpole, CH-2900 Porrentruy, Switzerland - “3D Image Metrology and Machine Control”, Pactice Report, Leica, 1999, 6p.

Fraser, Clive S. e Morrison, Russel; Department of Geomatics, University of Melbourne, Victoria 3052, Australia e Kinzel, Roland; GDV Ingenieurgesellschaft Holst GmbH, D23566 Lübeck, Germany - “Deformation measurement of the world’s largest electric ring motor”, Pactice Report, Leica, 8p.

“The V-STARS/E3 entry level system offers versatility, portability and accuracy”, Practice Report, Leica – 723 606en-X. 2000, 2p.

Brown, John; Geodetic Services, Inc. Melbourne, Florida - “V-STARS/S Acceptance Test Results”, Pactice Report, Leica, 13p.