

8.9 (octo e nove)
HAM

MARCIO SHIGUERU HAMANO

KIT DIDÁTICO DE METROLOGIA ÓPTICA

Trabalho de Graduação apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientador: Prof^o Oswaldo Horikawa

São Paulo
2000

Dedico este trabalho aos meus pais e minhas irmãs, que foram meus maiores incentivadores, companheiros e amigos antes e durante todo o meu curso de Graduação. Foram as pessoas que me deram toda força e apoio necessários para que eu conseguisse vencer este importante desafio na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Professor Orientador Oswaldo Horikawa pela atenção e tempo a mim dedicados para que eu pudesse concluir este trabalho.

Ao técnico Adílson pela valiosa colaboração para a construção do protótipo.

À minha família pelo apoio.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente os meus amigos e colegas de classe que sempre me ajudaram e me incentivaram.

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600005965

RESUMO

Este trabalho apresenta a elaboração de um projeto que visa criar um Kit Didático de Metrologia Óptica que tem como objetivo introduzir os conceitos básicos a respeito de determinação de forma de superfícies utilizando triangulação a laser e luz estruturada. Fazem parte do projeto a construção de um protótipo e a implementação de um software, além da apresentação teórica do assunto.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. DESCRIÇÃO DO PROJETO	2
2.1. Equipamento de triangulação	2
2.2. Equipamento de luz estruturada	4
3. CONCEITOS TEÓRICOS	5
3.1. Métodos de Medição	5
3.2. Utilização	6
3.3. Triangulação	7
3.4. Outras considerações	11
4. ESTUDO DE VIABILIDADE	12
4.1. Necessidades	12
4.2. Formulação do projeto	12
4.3. Síntese de Soluções	13
4.4.1. Análise da Exequibilidade Física	14
4.4.2. Valor Econômico	14
4.4.3. Viabilidade Financeira	14
5. PROJETO BÁSICO	16
5.1. Seleção da melhor Alternativa	16
5.1.1. Soluções	16
5.1.2. Critérios de Avaliação	17
5.1.3. Matriz de Decisão	18
5.2. Modelos	19
5.3. Análise de Sensibilidade	20
5.4. Análise de Compatibilidade	26
5.5. Análise de Estabilidade	27
5.6. Otimização Formal	27
6. CALIBRAÇÃO E TESTES	29
6.1. Calibração	29
6.2. Testes	32
6.2.1. Triangulação	32
6.2.2. Luz Estruturada	34
7. PROCEDIMENTOS	37
7.1. Triangulação	37

7.2. Luz Estruturada	38
8. CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS	39
9. SOFTWARE	40
10. MANUAL DO USUÁRIO	41
10.1. Dispositivo de Triangulação à Laser	41
10.2. Software	43
11. GUIA DE LABORATÓRIO	46
12. COMENTÁRIOS FINAIS	51
ANEXO 1 – Desenhos de Projeto	52
ANEXO 2 – Software	58
ANEXO 3 – Testes	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1. INTRODUÇÃO

Este projeto foi desenvolvido como trabalho de graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo no ano de 2000. Seu objetivo foi desenvolver um kit didático de laboratório de metrologia óptica. O relatório descreve o projeto, construção, conceitos teóricos, testes e procedimentos de utilização de um equipamento que permite determinar a forma de superfícies ou objetos, à distância e sem contato com os mesmos, utilizando conceitos de triangulação à laser e luz estruturada.

O projeto e construção do equipamento de laboratório refere-se à utilização de triangulação. A triangulação consiste em determinar a distância de um ponto a partir de outros dois pontos de medição. Conhecendo a distância entre esses dois pontos de medição e os ângulos que estes formam com o ponto que está sendo medido, obtêm-se um triângulo com dados suficientes para determinar todas suas dimensões.

Além disso, está especificado um procedimento de determinação de forma das superfícies utilizando um projetor de luz estruturada e uma câmera fotográfica digital. O procedimento consiste em projetar uma matriz quadriculada no objeto de medição. Em seguida, fotografa-se o objeto e a partir das deformações do quadriculado, determina-se a forma do mesmo utilizando os mesmos conceitos de triangulação. Por fim, foi implementado um software que permite a comparação de dados teóricos com os dados reais.

2. DESCRIÇÃO DO PROJETO

O projeto abrange os seguintes aspectos:

- ❑ Estudo dos conceitos de triangulação e luz estruturada,
- ❑ Projeto mecânico do equipamento,
- ❑ Construção do equipamento,
- ❑ Simulações e testes,
- ❑ Implementação do software,
- ❑ Elaboração de material teórico e procedimentos para utilização em laboratório didático.

Nos capítulos a seguir serão descritos os conceitos teóricos utilizados e necessários ao entendimento do experimento e construção de seus equipamentos. As etapas de Estudo de Viabilidade e Projeto Básico descrevem todo o procedimento de projeto dos dispositivos a serem utilizados. Nas seções de Testes e Software, estão descritas os procedimentos de testes e a implementação do software que será utilizado pelo usuário do kit para comparar resultados teóricos esperados com os dados empíricos. O material teórico e de procedimento servirão de guia para a realização do experimento.

As seções a seguir descrevem as duas partes do projeto.

2.1. Equipamento de triangulação

O equipamento (Figura 1) consiste em dois dispositivos: ambos com um emissor de feixe de laser. Ambos estão dispostos de forma a ser conhecida a distância entre eles. Estes dispositivos possuem movimentação em dois graus de liberdade (rotação em dois eixos perpendiculares x e z), de forma que possam movimentar-se e suas projeções

possam percorrer um plano. A utilização do equipamento consiste em posicionar uma peça à sua frente ou direcioná-lo a uma superfície e fazer medições no próprio equipamento. Observa-se que não há necessidade de contato no corpo de medição.

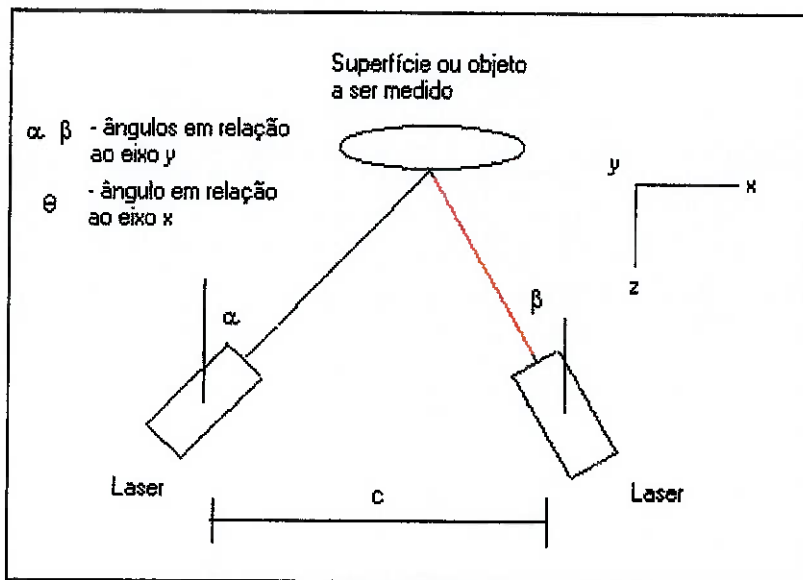


Figura 1 – Equipamento (Triangulação)

As medições são feitas da seguinte forma: fixa-se o feixe de laser em um ponto da superfície e mira-se este ponto com o outro dispositivo de laser. A seguir, mede-se os ângulos movimentados dos dispositivos de laser (α , β , e θ) em relação a um referencial. Obtendo-se os dados dos ângulos e da distância entre os pontos de projeções (c), a técnica de triangulação permite obter a distância deste ponto em relação à linha de projeção (d). Repete-se este procedimento até obter pontos suficientes para traçar e determinar a superfície.

2.2. Equipamento de luz estruturada

Os equipamentos de medição utilizando luz estruturada não serão projetados e construídos. Esta parte do projeto resume-se a descrição dos procedimentos de utilização de um projetor de luz estruturada e uma câmera digital para determinar a forma de uma superfície. Para isso, projeta-se uma matriz quadriculada no objeto ou superfície e fotografa-se o mesmo. Devido à forma do corpo, as linhas projetadas serão deformadas. Imprimindo-se a imagem captada e comparando as deformações com uma matriz quadriculada idêntica sem deformação, é possível determinar sua forma utilizando os conceitos de triangulação.

3. CONCEITOS TEÓRICOS

3.1. Métodos de Medição

O reconhecimento de formas em três dimensões ou medição de distância pode ser feito de inúmeras formas. Para o escopo deste trabalho foram considerados apenas os métodos que não tenham contato com os objetos ou superfícies a serem medidos. Algumas formas de medição são:

Triangulação – é uma técnica simples onde foca-se um ponto a ser medido de duas posições conhecidas, obtendo-se três pontos e conseqüentemente um triângulo. Neste triângulo são conhecidos a medida de um de seus lados (conhece-se a distância entre os dois pontos de medição) e seus ângulos adjacentes (também é possível de se medir a partir dos pontos de medição). Com esses dados é possível determinar a distância do ponto desejado. Repetindo-se este processo inúmeras vezes, é possível determinar a forma do objeto ou superfície [3].

Técnicas de tempo de percurso – neste método, são enviadas energias (ultrasônicas ou eletromagnéticas) ao objeto a ser medido. Mede-se o tempo que se leva para que esta energia vá até o objeto e volte até o ponto inicial. Conhecendo-se a velocidade da energia, é possível determinar a distância do ponto medido [2].

Luz estruturada – projeta-se uma luz estruturada no objeto ou superfície, e pela sua deformação é possível determinar suas formas. Nesta técnica também podem ser utilizados conceitos de triangulação, quando a luz é projetada por dois pontos distintos [2].

Técnicas de sombra – a forma pode ser obtida quando se conhece-se o tipo de iluminação projetada ao objeto e as propriedades de superfície do mesmo. Se são obtidas

inúmeras imagens em diferentes condições de iluminação, a orientação da superfície em qualquer ponto pode ser obtida [1].

Telemetria de pulsos – este método é derivado do processo mais conhecido como Radar. Neste caso, um pulso curto de luz laser é enviado para alvo. A luz refletida pelo alvo é captada, registrando-se o tempo decorrido de ida e volta. Este processo também é conhecido pelo nome de “LIDAR”, do termo “light direction and ranging” [4].

Comparação de Fase – Este método consiste em enviar um feixe Laser contínuo, modulado senoidalmente, e comparar a fase da onda emitida, com a fase da onda correspondente de retorno, proveniente do alvo [4].

Interferometria – utilizando conceitos de interferometria, este método é capaz de detectar apenas deslocamentos, e não distâncias absolutas [4].

Outros – uso de luz polarizada, uso de dados geométricos [1].

O escopo inicial do trabalho já visava a utilização de triangulação e luz estruturada, visto sua simplicidade técnica e da facilidade de projeto de equipamentos básicos de medição utilizando estes métodos.

3.2. Utilização

Os medidores de triangulação a laser possui diversas aplicações. Algumas delas resultam da necessidade de separação física, ou seja medição sem contato, outras pela rapidez ou precisão desejada. Estes tipos de medidores podem ser utilizados em diversas áreas, tais como, siderurgia e fundição, indústrias madeireiras, automotiva, transportes, embalamento e outras. A seguir estão listadas algumas aplicações:

- ❑ Controle de espessura de placas ou chapas metálicas;
- ❑ Controle de espessura de pós bimetálicos;

- ❑ Seleção de chapas por espessura;
- ❑ Controle de nível de purga em fornos de fundição;
- ❑ Determinação da centralização de toras de madeira;
- ❑ Controle de espessura de lâminas de madeira;
- ❑ Controle de espessura de mantas de borracha;
- ❑ Medição e controle de espessura de plásticos;
- ❑ Verificações de super-alimentação de prensas automáticas;
- ❑ Verificação de posicionamento de peças em máquinas automáticas;
- ❑ Verificação de montagem de peças;
- ❑ Medição de variação da posição ou dimensão de uma peça em ambiente agressivo;
- ❑ Controle de dimensões durante a usinagem da peça;
- ❑ Medição e controle em moinhos;
- ❑ Medição de espessura de mantas fibrocimento;
- ❑ Medição de papel ondulado;
- ❑ Outros.

3.3. Triangulação

A determinação de distâncias utilizando triangulação é relativamente simples. De acordo com a Figura 2, L1 e L2 são os dispositivos de medição com uma distância c entre eles, P é o ponto de medição a uma distância d da linha formada por L1 e L2.

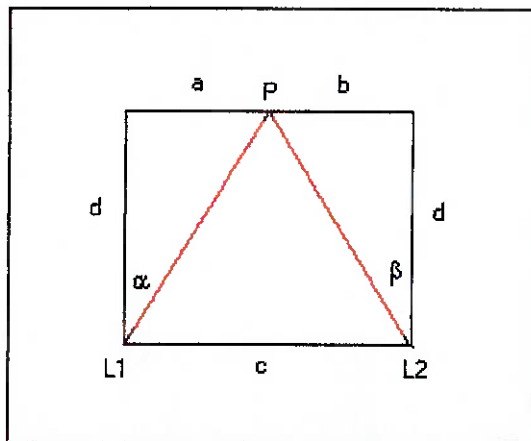


Figura 2 – Triangulação (Vista superior)

Utilizando trigonometria:

$$(1) \quad \operatorname{tg} \alpha = a / d$$

$$(2) \quad \operatorname{tg} \beta = b / d$$

Igualando as equações (1) e (2):

$$(3) \quad a / b = \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta$$

Temos também que:

$$(4) \quad a + b = c$$

Resolvendo o sistema de equações (3) e (4):

$$(5) \quad a = c \cdot \operatorname{tg} \alpha / (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$$

$$(6) \quad b = c \operatorname{tg} \beta / (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$$

Substituindo (5) e (6) em (1) e (2), obtém-se finalmente:

$$(7) \quad d = c / (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$$

Considerando uma rotação ' θ ' no outro eixo (figura 3):

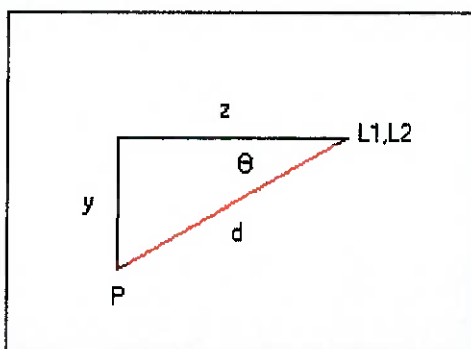


Figura 3 – Triangulação (Vista Lateral)

$$(8) \quad z = d \cdot \cos \theta$$

$$(9) \quad y = d \cdot \sin \theta$$

Substituindo (7) em (8) e (9):

$$(10) \quad z = c \cdot \cos \theta / (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$$

$$(11) \quad y = c \cdot \sin \theta / (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$$

Considerando o ponto L1 como origem as coordenadas do ponto 'P' é:

$$x_p = c \cdot \operatorname{tg} \alpha / (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$$

$$y_p = c \cdot \sin \theta / (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$$

$$z_p = c \cdot \cos \theta / (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$$

Para luz estruturada, o princípio é o mesmo, porém com algumas diferenças.

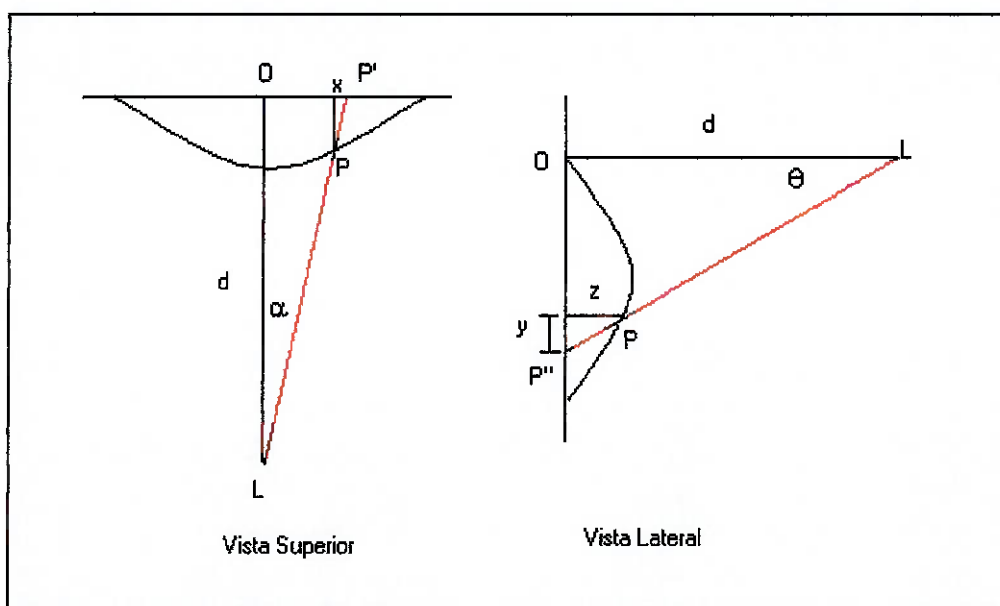


Figura 4 – Luz estruturada

O ponto L é o ponto de onde a imagem é captada, P é o ponto a ser medido, P' é o ponto equivalente de P sem deformação, a distância OP' é medida na própria imagem, e d é uma distância estimada. Observa-se que por este método não é possível obter as dimensões reais do corpo de medição, suas dimensões são proporcionais a d. No entanto, sua forma é possível de ser determinada.

Por trigonometria:

$$(12) \quad \alpha = \arctg (OP' / d)$$

$$(13) \quad \theta = \arctg (OP'' / d)$$

As coordenadas x e y relativas de cada ponto em relação ao ponto sem deformação podem ser medidas diretamente na imagem. E a coordenada z é definida:

$$z = y \cdot \cos \alpha / \operatorname{tg} \theta$$

3.4. Outras considerações

Observa-se que mantendo os dispositivos de medição fixos não é possível realizar algumas medidas, pois existem pontos que não podem ser mirados simultaneamente pela mira. Para resolução destes casos existem duas alternativas: rotação do objeto ou movimentação dos dispositivos. E, posteriormente, união de dados obtidos de acordo com a rotação do objeto ou movimentação dos dispositivos.

Visando simplicidade e maior didática, este experimento não incluirá tais tipos de procedimento. As medidas serão feitas com os dispositivos e o corpo de medição fixos e apenas nos pontos possíveis. Estes pontos serão suficientes para comparação com dados teóricos.

4. ESTUDO DE VIABILIDADE

4.1. Necessidades

As necessidades do projeto são projetar, construir e descrever procedimentos de um kit didático de laboratório de metrologia óptica. O equipamento a ser construído tem alguns requisitos fundamentais: deve apresentar de forma clara e objetiva os conceitos teóricos; fácil manuseio e utilização visto que será utilizado por estudantes; seguro quanto a sua utilização; baixo custo; robustez visando longa durabilidade; fácil manutenção e fácil construção.

4.2. Formulação do projeto

Visando sua utilização didática por estudantes e sua construção para fins não comerciais, estabelece-se as seguintes características do equipamento:

- ☐ Ajustes e medições manuais;
 - ☐ Porte médio (dimensões da ordem de grandeza de 700 mm);
 - ☐ Peso máximo de 5 Kg;
 - ☐ Intervalo mínimo de 6 meses entre as manutenções;
 - ☐ Custo de manutenção não superior a 5% do valor do equipamento;
 - ☐ Utilização de peças padronizadas e de fácil reposição;
 - ☐ Durabilidade de 5 anos;
 - ☐ Índice de segurança de risco mínimo;
-

4.3. Síntese de Soluções

A seguir são apresentadas soluções para as diversas funções do equipamento:

- **Foco** – para focar um ponto do corpo de medição pode ser utilizado um feixe de laser ou uma mira. O laser possui a vantagem de ser mais preciso em relação à mira, no entanto possui custo de aquisição e manutenção maior, visto que precisa de uma fonte de energia para mantê-lo em funcionamento.
 - **Base** – A base do equipamento pode ser completa, sendo que o corpo de medição seja apoiado nela, ou uma base simples apenas para fixar os dispositivos. Ressalta-se que a primeira tem maior garantia de que o objeto não seja movimentado durante a medição, mas limita o tamanho do corpo a ser medido. A outra permite medição de corpos maiores.
 - **Posicionamento** – O equipamento pode ser apoiado no chão ou ser um dispositivo de apoio em balcão. Aquele que usa o chão como apoio permite maior versatilidade nas medições visto que pode ser posicionado em qualquer lugar. No entanto seu tamanho dificulta a movimentação e armazenamento. O equipamento de apoio em balcão pode ser fixado no mesmo e tem um manuseio facilitado, mas sua versatilidade é menor pois depende da existência de um apoio.
 - **Fixação dos dispositivos** – Os dispositivos (mira e laser) podem ter ajuste de distância ou serem fixos e sem ajustes. A existência de ajuste confere-lhes maior versatilidade nas medições, mas dificulta seu projeto e construção e aumenta as imprecisões de medida.
-

4.4.1. Análise da Exeqüibilidade Física

Alguns pontos destacam-se no que se refere a exeqüibilidade física. O feixe de laser utilizado será o mesmo utilizado como apontadores em palestras e aulas. Seu custo é baixo e suas características adequam-se aos fins propostos. Outras questões relevantes são as considerações teóricas que fisicamente podem não ser correspondidas. Tais, como eixos de rotação que cortantes e coplanares, paralelismos e ângulos retos. Tais erros podem ser minimizados em construções precisas e possivelmente em modelos de correções dos dados obtidos experimentalmente.

4.4.2. Valor Econômico

O projeto é economicamente compensador pois seu custo é muito inferior em relação aos atuais dispositivos comerciais de medição. Além disso sua construção simples visa demonstrar tópicos teóricos, o que não é possível de ser observado nos similares comerciais, cuja utilização é automática e de construção com alto nível tecnológico. Ressalta-se ainda que a construção será feita utilizando ferramentas e máquinas da própria Universidade, reduzindo ainda mais os custos.

4.4.3. Viabilidade Financeira

Esta questão não será avaliada neste projeto, focando basicamente os aspectos técnicos. Um futuro estudo poderá avaliar a viabilidade financeira deste projeto caso ele seja implantado em alguma disciplina da Universidade.

5. PROJETO BÁSICO

5.1. Seleção da melhor Alternativa

5.1.1. Soluções

- ❑ Solução 1 – dois dispositivos laser, base completa, apoio de chão e dispositivos fixos;
 - ❑ Solução 2 – dois dispositivos laser, base completa, apoio de chão e dispositivos ajustáveis;
 - ❑ Solução 3 – dois dispositivos laser, base completa, apoio de balcão e dispositivos fixos;
 - ❑ Solução 4 – dois dispositivos laser, base completa, apoio de balcão e dispositivos ajustáveis;
 - ❑ Solução 5 – dois dispositivos laser, base simples, apoio de chão e dispositivos fixos;
 - ❑ Solução 6 – dois dispositivos laser, base simples, apoio de chão e dispositivos ajustáveis;
 - ❑ Solução 7 – dois dispositivos laser, base simples, apoio de balcão e dispositivos fixos;
 - ❑ Solução 8 – dois dispositivos laser, base simples, apoio de balcão e dispositivos ajustáveis;
 - ❑ Solução 9 – um dispositivo laser e uma mira, base completa, apoio de chão e dispositivos fixos;
-

- ❑ Solução 10 – um dispositivo laser e uma mira, base completa, apoio de chão e dispositivos ajustáveis;
- ❑ Solução 11 – um dispositivo laser e uma mira, base completa, apoio de balcão e dispositivos fixos;
- ❑ Solução 12 – um dispositivo laser e uma mira, base completa, apoio de balcão e dispositivos ajustáveis;
- ❑ Solução 13 – um dispositivo laser e uma mira, base simples, apoio de chão e dispositivos fixos;
- ❑ Solução 14 – um dispositivo laser e uma mira, base simples, apoio de chão e dispositivos ajustáveis;
- ❑ Solução 15 – um dispositivo laser e uma mira, base simples, apoio de balcão e dispositivos fixos;
- ❑ Solução 16 – um dispositivo laser e uma mira, base simples, apoio de balcão e dispositivos ajustáveis;

5.1.2. Critérios de Avaliação

Compatibilidade teórica – este quesito avalia as soluções quanto a facilidade, simplicidade e objetividade de se relacionar o equipamento com os conceitos teóricos. Entre as soluções, ressalta-se que as que contém dispositivos ajustáveis aumentam a complexidade da apuração dos dados experimentais quando há variação de distância entre os dispositivos. Visando simplicidade e atendo-se a apenas conceitos teóricos básicos, estas soluções não são recomendadas. Os dispositivos laser são mais precisos que os de mira.

Custo – O custo do equipamento deve ser o menor possível. As soluções que utilizam dois dispositivos laser, base completa, apoio de chão e dispositivos ajustáveis

possuem custo de fabricação devido a maior preço e quantidade dos materiais e fabricação mais complexa. Apesar do dispositivo laser possuir custo superior ao de uma mira, é mais vantajosa sua utilização pois é mais facilmente encontrado no mercado.

Fabricação – Este quesito avalia a facilidade de fabricação e construção do equipamento. As soluções de base simples, apoio de balcão e dispositivos fixos possuem maior facilidade de fabricação.

Manutenção – A manutenção deve ser fácil e de baixo custo. Os equipamentos de porte maior possuem maior dificuldade de manutenção visto as questões de movimentação e armazenagem. O laser possui custo de manutenção para repor suas fontes de energia, no entanto o valor de reposição de suas baterias pode ser quase desprezado.

5.1.3. Matriz de Decisão

	Teoria		Custo		Fabricação		Manutenção		Soma
	Peso 0,3		Peso 0,3		Peso 0,2		Peso 0,2		
	nota	N x p	nota	N x p	nota	N x p	nota	N x p	
Solução 1	10	3,0	7	2,1	10	2,0	8	1,6	8,7
Solução 2	5	1,5	6	1,8	7	1,4	8	1,6	6,3
Solução 3	10	3,0	8	2,4	10	2,0	9	1,8	9,2
Solução 4	5	1,5	7	2,1	7	1,4	9	1,8	6,8
Solução 5	10	3,0	8	2,4	10	2,0	8	1,6	9,0
Solução 6	5	1,5	7	2,1	7	1,4	8	1,6	6,6
Solução 7	10	3,0	9	2,7	10	2,0	9	1,8	9,5
Solução 8	5	1,5	8	2,4	7	1,4	9	1,8	7,1

Solução 9	8	2,4	8	2,4	10	2,0	9	1,8	8,6
Solução 10	3	0,9	7	2,1	7	1,4	9	1,8	6,2
Solução 11	8	2,4	9	2,7	10	2,0	10	2,0	9,1
Solução 12	3	0,9	8	2,4	7	1,4	10	2,0	6,7
Solução 13	8	2,4	9	2,7	10	2,0	9	1,8	8,9
Solução 14	3	0,9	8	2,4	7	1,4	9	1,8	6,5
Solução 15	8	2,4	10	3,0	10	2,0	10	2,0	9,4
Solução 16	3	0,9	9	3,7	7	1,4	10	2,0	8,0

Tabela 1 – Matriz de Decisão

De acordo com a matriz de decisão, a melhor alternativa é a solução 7 que utiliza dois dispositivos laser, base simples, apoio de balcão e dispositivos fixos.

5.2. Modelos

A Figura 5 apresenta o esquema do dispositivo a ser construído, indicando seus principais componentes. Este modelo não apresenta as proporções e construção física reais. Ele apenas possui um caráter ilustrativo.

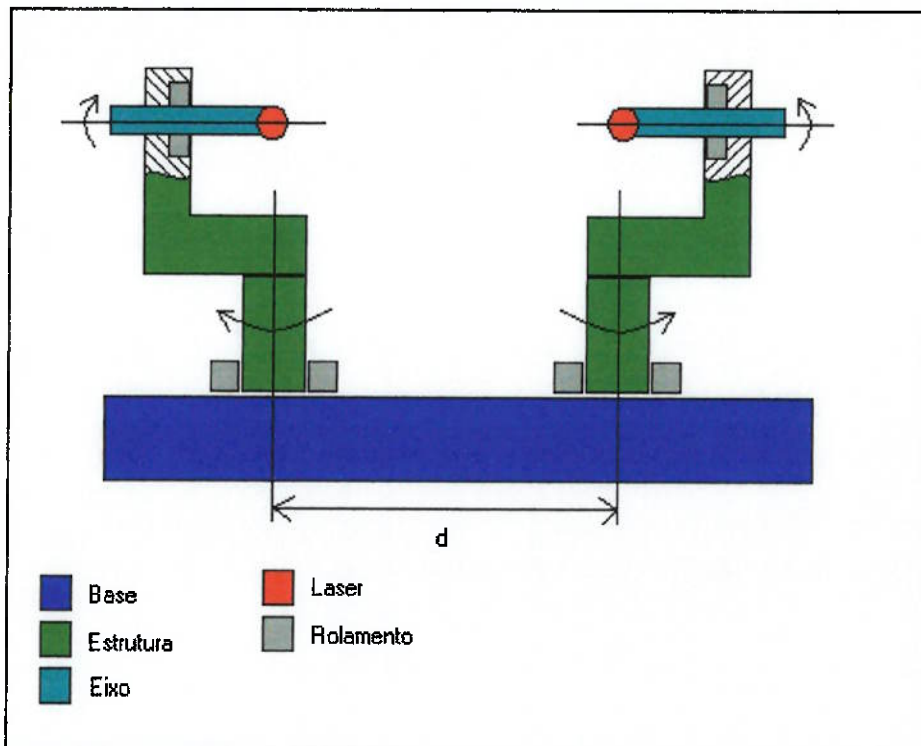


Figura 5 – Modelo

5.3. Análise de Sensibilidade

Existem cinco variáveis que interferem de forma mais significativa os resultados obtidos nas medições:

- ❑ Excentricidade do laser em relação ao eixo vertical de rotação;
- ❑ Excentricidade do laser em relação ao eixo horizontal de rotação;
- ❑ Laser não perpendicular ao eixo horizontal;
- ❑ Laser não perpendicular ao eixo vertical;
- ❑ Medição de ângulos pelo usuário;

Excentricidades no eixos verticais de rotação ($e_{v\alpha}$, $e_{v\beta}$) geram erros nas direções x e z conforme as rotações (α_v , β_v) destes eixos:

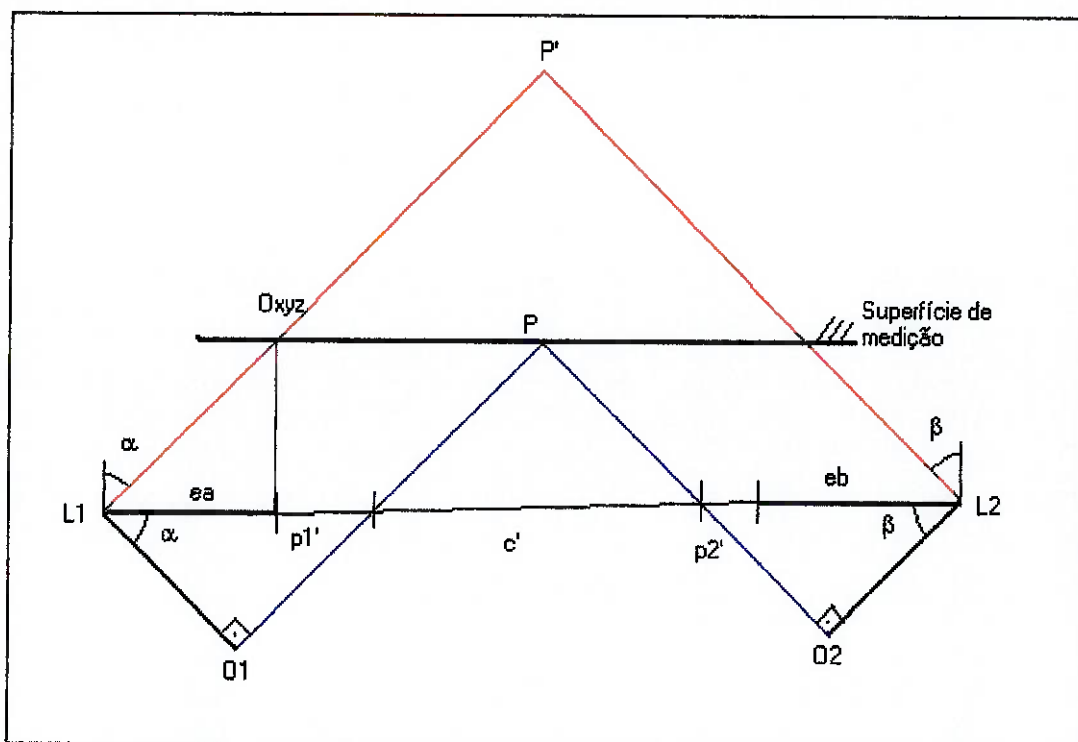


Figura 6 – Excentricidade nos eixos de rotação verticais

Dadas as movimentações de ângulos α e β de acordo com a Figura, o ponto ideal a ser medido seria o ponto P' , no entanto devido às excentricidades $e_{v\alpha}$ e $e_{v\beta}$, o ponto real a ser medido é o ponto P . Acrescenta-se ainda que o centro do eixo de coordenadas visto pelo usuário é o ponto $Oxyz$.

Para determinar o novo ponto P basta apenas calcular as coordenadas do ponto para uma nova distância entre os feixes de laser igual à c' e deslocar as novas coordenadas para o centro $Oxyz$.

Geometricamente, determina-se:

$$c' = c - e_{v\alpha} - p1' + e_{v\beta} + p2'$$

onde:

$$p1' = e_{v\alpha} \cdot (1 - \cos \alpha) / \cos \alpha$$

$$p_2' = e_{\beta} \cdot (1 - \cos \beta) / \cos \beta$$

Após o cálculo as coordenadas são deslocadas apenas no eixo x:

$$x_v = x' + e_{\alpha} \cdot (1 - \cos \alpha) / \cos \alpha$$

Convencionam-se os sinais das excentricidades como positivo se for à direita e negativo se for à esquerda.

De forma semelhante à situação anterior, a excentricidade no eixo de rotação horizontal (e_h) gera erro na direção y, conforme a rotação (θ) deste eixo:

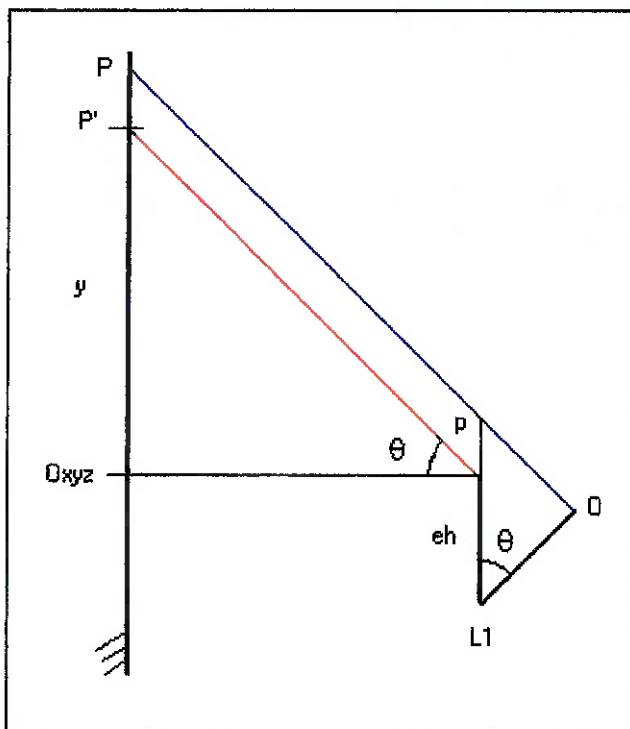


Figura 7 – Excentricidade no eixo horizontal

O valor de y para o caso corrigido:

$$y_h = y' + p$$

onde:

y' é o valor calculado para o caso ideal

$$p = e_h \cdot (1 - \cos \theta) / \cos \theta.$$

Nota-se que estes cálculos referem-se a medida do ângulo θ no dispositivo L1, portanto a excentricidade e_h refere-se a este dispositivo. O dispositivo L2 não é avaliado, pois considera-se que o ângulo θ é igual para ambos.

No terceiro caso, uma variação (θ_h) em relação ao ângulo reto do laser com o eixo horizontal gera os seguintes erros de medição:

$$y_h' = -d \cdot \sin \theta_h$$

$$z_h' = d - d \cdot \cos \theta_h$$

Analogamente, para uma variação (θ_v) em relação ao eixo vertical:

$$x_v' = d \cdot \sin \theta_v$$

$$z_v' = d - d \cdot \cos \theta_v$$

O observador fará três medidas de ângulo (α, β, θ), podendo haver erros nessas três medidas.

Fazendo as derivadas parciais, obtém-se os pontos de máxima variação para cada variável:

$$\partial z / \partial \alpha = 0, \text{ máxima variação: } \theta = 0^\circ,$$

$$\partial x / \partial \alpha = 0, \text{ máxima variação em: } \beta = 0;$$

$$\partial y / \partial \alpha = 0, \text{ máxima variação em: } \theta = 0^\circ;$$

$$\partial z / \partial \beta = 0, \text{ máxima variação em: } \theta = 90^\circ;$$

$$\partial x / \partial \beta = 0, \text{ máxima variação em: } \alpha = 0^\circ;$$

$$\partial y / \partial \beta = 0, \text{ máxima variação em: } \theta = 0^\circ;$$

$$\partial z / \partial \theta = 0, \text{ máxima variação em: } \theta = 0^\circ;$$

$$\partial x / \partial \theta = 0,$$

$$\partial y / \partial \theta = 0, \text{ máxima variação em: } \theta = 90^\circ;$$

$$\partial z / \partial c = 0, \text{ máxima variação em: } \theta = 90^\circ;$$

$$\partial x / \partial c = 0, \text{ máxima variação em: } \alpha = 0;$$

$$\partial y / \partial c = 0, \text{ máxima variação em: } \theta = 0^\circ;$$

Observa-se que α , β e c geram maior variação em z quando $\theta = 90^\circ$ e θ interfere quando vale 0° . A maior variação em x ocorre quando $\alpha = 0$ e $\beta = 0$. Em y , as variáveis α , β e c são críticas quando $\theta = 0^\circ$, e θ é crítico quando este é 0° .

Dessa forma conclui-se que o máximo erro ocorrerá quando $\theta = 45^\circ$ e $\alpha = \beta = 26,5^\circ$. Estes valores são obtidos levando em consideração as limitações físicas do protótipo e os pontos onde o conjunto dessas variáveis geram o máximo de erro, ao invés de analisá-los individualmente.

Estimando o erro de leitura do observador (α', β', θ'), calcula-se o erro máximo de cada variável (x_o, y_o, z_o).

A tabela a seguir apresenta as estimativas de valores de erro e dimensões do projeto, conforme sua utilização e processos de fabricação:

Grandeza	Valor
$e_{v\alpha}$	0,1 mm
$e_{v\beta}$	0,1 mm
e_h	0,1 mm
D	1000,0 mm
θ_h	0,1°
θ_v	0,1°
e_D	1 mm
α'	0,5°
β'	0,5°
θ'	0,5°

Tabela 2 – Erros

Calculando-se o erro máximo para cada variável:

Variável	Valor máx.
x_v	0,24 mm
z_v	0,48 mm
y_h	0,24 mm
y_h'	1,750 mm
z_h'	0,001 mm

x_v'	1,750 mm
z_v'	0,001 mm
x_o	0,5 mm
y_o	22,8 mm
z_o	22,8 mm

Tabela 3 – Erro máximo

Somando-se os erros totais em cada direção:

Direção	Valor (mm)
X	2,49
Y	23,04
Z	23,28

Tabela 4 – Erro Total

5.4. Análise de Compatibilidade

Na análise de compatibilidade, serão abordados apenas três componentes: o dispositivo laser, a morsa e os rolamentos.

Os dispositivos laser a serem utilizados são os de uso não-científico, mais especificamente aqueles utilizados como apontadores em palestras, aulas e outros. Analisando este tipo de laser verificou-se que atende as necessidades do projeto, além de possuir um custo muito baixo.

Com relação a morsa para fixação em balcão e os rolamentos, serão utilizadas peças padrões que possam ser facilmente encontradas no mercado. Não haverá problemas consideráveis de compatibilidade, pois todas as demais peças serão produzidas de acordo

com a necessidade de construção. Portanto, estas serão ajustadas conforme as peças padrões já adquiridas.

5.5. Análise de Estabilidade

Os principais pontos a serem analisados quanto a estabilidade são: o eixo de rotação horizontal e a posição do objeto. No primeiro caso, é importante que o eixo não se mova durante a medição. Para isso um dispositivo simples (trava) pode garantir a estabilidade do mesmo. Quanto ao objeto, deve-se garantir que a distância entre o ele e o dispositivo de medição não seja alterada. A fixação do dispositivo já está garantida pela morsa e o corpo de medição ressalta-se apenas a recomendação de não tocá-lo durante o ensaio e não provocar movimentos na bancada em que se está fazendo o experimento.

5.6. Otimização Formal

A figura 8 indica o desenho de conjunto do dispositivo.

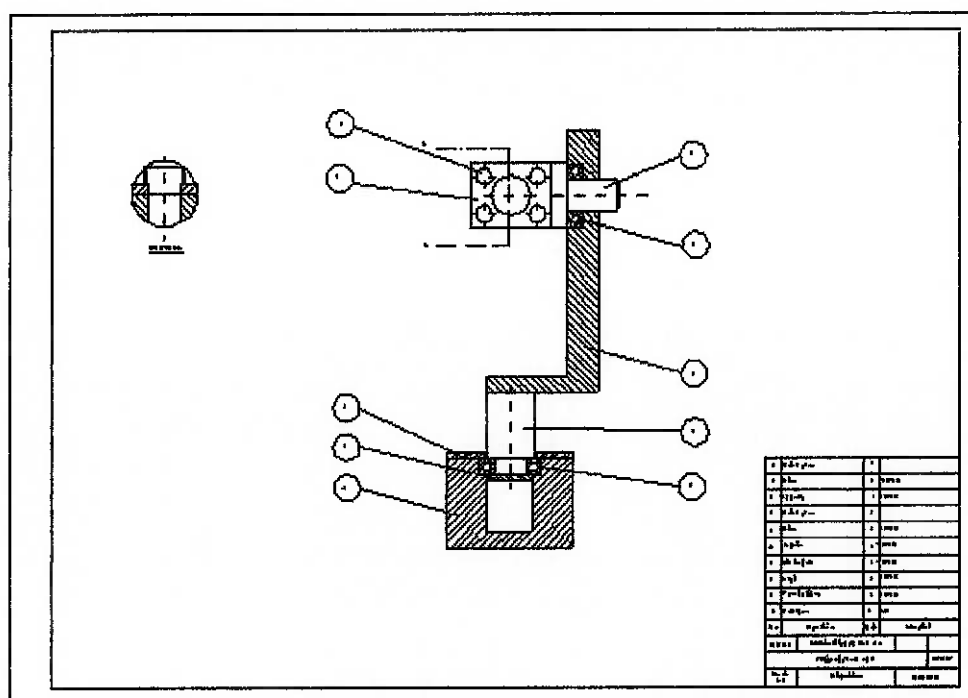


Figura 8 – Desenho de conjunto.

6. CALIBRAÇÃO E TESTES

6.1. Calibração

Dentre as variáveis que têm maior influência nos resultados finais, apenas uma não é passível de calibração de forma a atenuar os desvios: o erro na medição de ângulos pelo usuário. As demais grandezas seguirão os seguintes procedimentos de calibração:

- ❑ Laser não perpendicular ao eixo horizontal e vertical – esta distorção pode ser minimizada apoiando o dispositivo em uma mesa de aferição totalmente plana e mirando o feixe de laser em um anteparo apoiado nesta mesma mesa. Considerando que os ângulos em relação aos eixos são retos, ao afastar o anteparo do dispositivo, sem deslocamentos laterais, o feixe de laser deve permanecer num mesmo ponto do anteparo. Caso isso não ocorra, há indícios de variação nos ângulos em relação a 90° , que podem ser facilmente calculados e corrigidos (Figura 9). Dessa forma determina-se os ângulos 0° no dispositivo;

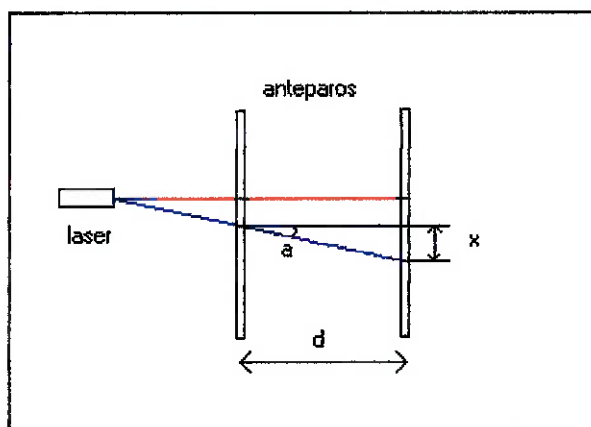


Figura 9 – Ângulos de Calibração

A variação de posição (x) do ponto do feixe de laser no anteparo determina o ângulo que o laser faz com o eixo (a) pela seguinte expressão:

$\arctan a = x / d$, onde d é a distância percorrida pelo anteparo.

Idealmente o ângulo 'a' deveria ser igual a 0°. De forma análoga, utiliza-se a expressão para determinar o outro ângulo.

- Excentricidade do laser em relação aos eixos vertical e horizontal – este procedimento deve ser executado após a calibração dos ângulos 0°. Na mesma mesa de aferição do procedimento anterior, mantém-se o ângulo do eixo horizontal em 0° e varia-se o ângulo do eixo vertical. Medindo-se a distância percorrida pelo feixe de laser no anteparo, é possível determinar a excentricidade do laser (Figura 10). Repetindo-se o processo para o outro eixo, determina-se a outra excentricidade.

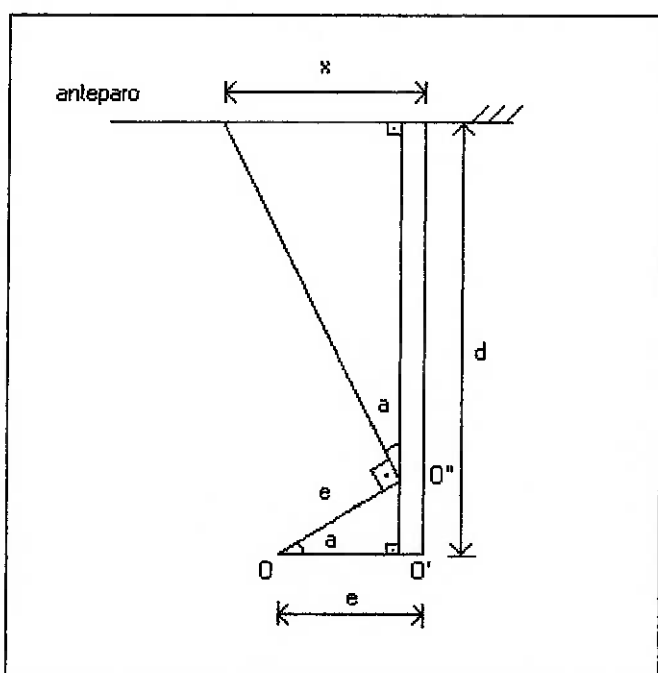


Figura 10 – Calibração de Excentricidade

Teoricamente, o ponto de onde partiria o feixe de laser seria em O. No entanto, devido a uma excentricidade em relação ao eixo de rotação o ponto passa a ser O', que posiciona-se na posição O'' após uma rotação de um ângulo 'a' do eixo. A partir do deslocamento (x) do feixe de laser no anteparo, é possível determinar a excentricidade.

Por trigonometria, chega-se à seguinte expressão da distância percorrida 'x':

$$x = (e - e \cdot \cos a) + \operatorname{tg} a \cdot (d - e \cdot \sin a)$$

Onde d é a distância do dispositivo ao anteparo. Consequentemente:

$$e = (x - d \cdot \operatorname{tg} a) / (1 - \cos a - \operatorname{tg} a \cdot \sin a)$$

De forma análoga, calcula-se a excentricidade para o outro eixo.

6.2. Testes

6.2.1. Triangulação

A primeira parte do teste do dispositivo de triangulação foi a calibração para determinação dos ângulos referenciais e minimização dos erros referentes às não perpendicularidades dos feixes de laser em relação aos seus eixos de rotações. O procedimento seguido para a realização desta etapa estão descritos no item de “Calibração” deste mesmo trabalho.

Após a calibração verificou-se um desvio de $\pm 2^\circ$ nas perpendicularidades dos feixes com os respectivos eixos de rotação. O principal fator causador destes desvios foi a imprecisão de leitura e posicionamento do feixe de laser no alvo que ficou com desvios próximos de $\pm 2^\circ$.

A última etapa consistiu na realização de medidas utilizando o dispositivo. As possíveis fontes de erro tiveram em alguns casos, desvios diferentes do previsto. A tabela abaixo apresenta os erros experimentais obtidos:

Variável	Erro
Perpendicularidades	2°
Distância c	1 mm
Ângulos (usuário)	2°
Medida real x	0,5 mm
Medida real y	0,5 mm
Medida real z	2 mm

Tabela 5 – Erros experimentais

Estes erros foram estimados considerando-se o uso de uma régua comum para a medida da distância c e o uso de uma trena para as medidas reais das coordenadas x , y e z .

Foram coletadas medidas de quatro pontos, calculados via software anexo e comparadas com dados reais conforme tabela abaixo:

Ponto	Dados Experimentais		Dados Reais	Desvios
1	$\alpha = 10^\circ$	$X = 119 \text{ mm}$	$X = 100 \text{ mm}$	16,0%
	$\beta = 15^\circ$	$Y = 47 \text{ mm}$	$Y = 40 \text{ mm}$	14,9%
	$\theta = 4^\circ$	$Z = 673 \text{ mm}$	$Z = 625 \text{ mm}$	7,1%
2	$\alpha = 3^\circ$	$X = 49 \text{ mm}$	$X = 40 \text{ mm}$	18,4%
	$\beta = 15^\circ$	$Y = -81 \text{ mm}$	$Y = -70 \text{ mm}$	13,6%
	$\theta = -5^\circ$	$Z = 932 \text{ mm}$	$Z = 745 \text{ mm}$	25,1%
3	$\alpha = -3^\circ$	$X = -29 \text{ mm}$	$X = -20 \text{ mm}$	31,0%
	$\beta = 30^\circ$	$Y = 19 \text{ mm}$	$Y = 20 \text{ mm}$	5,3%
	$\theta = 2^\circ$	$Z = 571 \text{ mm}$	$Z = 484 \text{ mm}$	15,2%
4	$\alpha = -13^\circ$	$X = -113 \text{ mm}$	$X = -80 \text{ mm}$	29,2%
	$\beta = 40^\circ$	$Y = -110 \text{ mm}$	$Y = -110 \text{ mm}$	0,0%
	$\theta = -13^\circ$	$Z = 480 \text{ mm}$	$Z = 419 \text{ mm}$	12,7%

Tabela 6 – Dados Experimentais

Obs: as medidas foram feitas para $c = 300,0 \text{ mm}$.

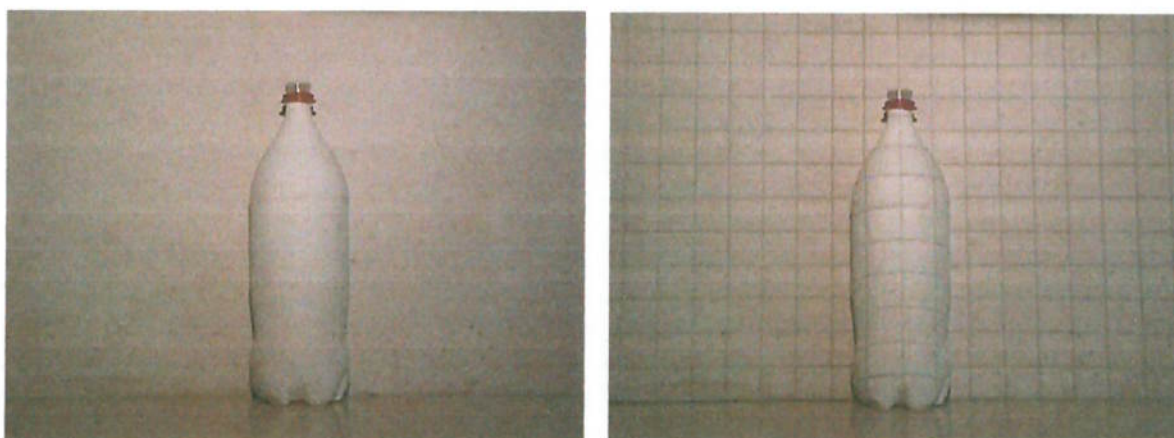
Os desvios obtidos estão dentro do previsto de acordo com os erros de medição. Após uma análise mais aprofundada e inúmeros testes conforme dados do Anexo

3, observou-se que o valor de α interfere diretamente em x . Quanto maior o seu valor, maior será o erro em x . Este erro só passará a ser afetado pelo valor de β quando este for muito grande e isto pode ser justificado pela convenção utilizada para se medir a coordenada x . O valor α também gera erros máximos em z para ângulos muito pequenos ou muito grandes, passando por um erro mínimo em um valor intermediário. O erro em y e z cresce quanto maior for o valor do ângulo θ .

Utilizando o software, também foram mapeados os desvios dos valores experimentais com os reais. Considerando erros de medição da ordem de 2° resultou em desvios que cobrem os resultados obtidos.

6.2.2. Luz Estruturada

Para o teste de luz estruturada foi utilizado como corpo de prova (Figura) uma garrafa PET e um retro-projetor. O corpo de prova estava encostado no plano de projeção e assume-se que a unidade de medida do quadriculado projetado é (u).



Figuras 11 (a) e 11 (b) – Corpo de Prova de Luz estruturada

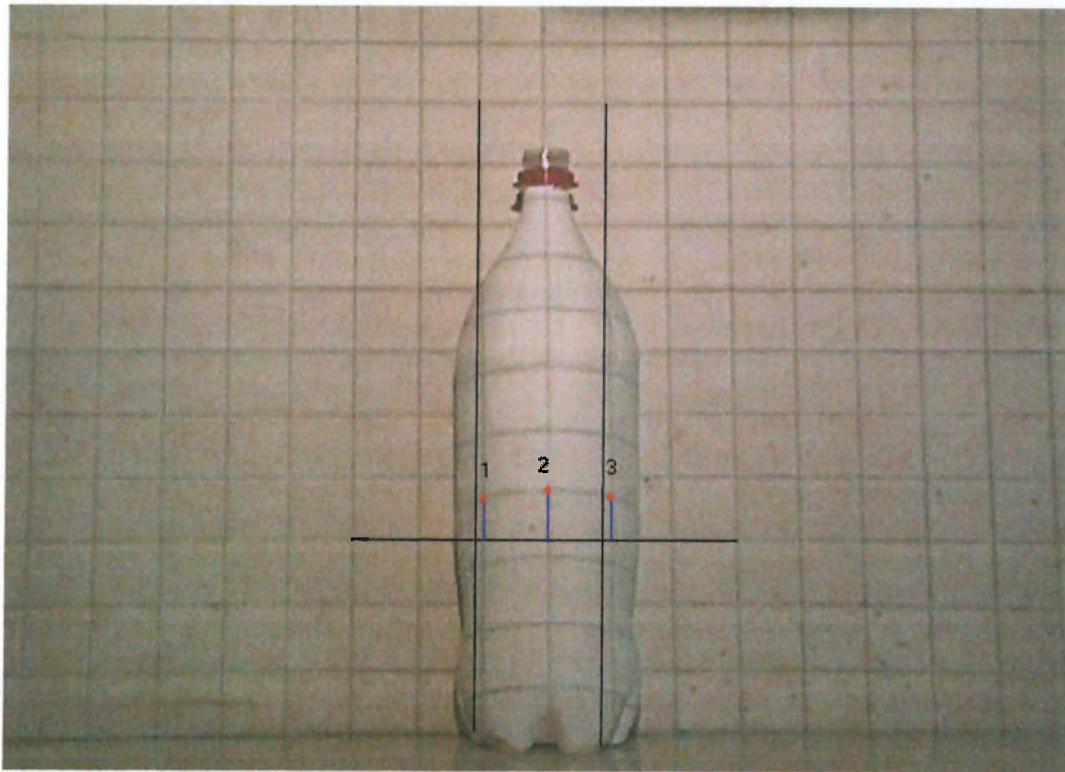


Figura 12 – Pontos de Medição

A linha azul representa o valor de y na seguinte fórmula:

$$z = y \cdot \cos \alpha / \operatorname{tg} \theta$$

Foram feitas as seguintes considerações:

- ❑ distância do projetor ao plano de projeção: $d = 1340 \text{ mm}$
- ❑ altura de projeção em relação à base: $h = 13,5 \text{ u}$
- ❑ unidade do quadriculado: $u = 37,78 \text{ mm}$
- ❑ ângulos: $\alpha = 0^\circ$;
- ❑ distorções ópticas da câmera foram desprezadas;

Logo, foram obtidos os seguintes valores:

Pontos	1	2	3
Y	0,58 u	0,75 u	0,67 u
α	0°	0°	0°
OP''	10,5 u	10,5 u	10,5 u
tg θ	0,016	0,021	0,019
Z	74,02 mm	95,71 mm	85,50 mm

Tabela 7 – Dados Experimentais

O valor real medido do diâmetro da garrafa é 103,45 mm. Comparando este valor com o ponto 2, que corresponde a esta grandeza, obtém-se um erro de 7,48% (as medidas foram feitas utilizando-se fita métrica e trena – precisão de 1mm).

Este desvio é considerado aceitável para o escopo do trabalho. As possíveis fontes de erro são:

- ❑ posicionamento da câmera digital ao tirar a foto (distorção óptica);
- ❑ estimativa das medidas da distância (d) e unidade (u);
- ❑ medidas na figura impressa.

7. PROCEDIMENTOS

7.1. Triangulação

A seguir está sugerido um procedimento didático para efetuar o experimento:

- ❑ Escolher uma superfície plana onde possam ser apoiados o objeto a ser medido e o dispositivo;

Dicas:

- escolher um local onde não há muita interferência luminosa;
- uma vez dispostos, a distância entre o objeto e o dispositivo não pode mais ser alterada.
- ❑ Verificar a calibração dos ângulos de referência 0° . Caso o dispositivo não esteja calibrado, seguir os procedimentos descritos no Capítulo 6 – “Calibração e Testes”;
- ❑ Posicionar o objeto na posição onde será feita a medida;
- ❑ Escolher alguns pontos de medição, onde possam ser focados pelos dois feixes de laser;
- ❑ Focar um dos pontos de medição pelos dois feixes de laser;
- ❑ Fazer a medida dos quatro ângulos obtidos no dispositivo;
- ❑ Medir a distância entre os dois dispositivos;
- ❑ Calcular a distância do ponto medido utilizando os conceitos descritos no Capítulo 3 – “Conceitos Teóricos”, ou utilizar o software que acompanha o dispositivo;
- ❑ Repetir os mesmos procedimentos para outros pontos;
- ❑ Obter medidas reais do corpo de prova;
- ❑ Comparar com dados experimentais.

7.2. Luz Estruturada

O procedimento abaixo refere-se à Luz Estruturada:

- ❑ Posicionar o objeto a ser medido em frente a um fundo branco para ressaltar a projeção da luz estruturada;
 - ❑ Utilizar um retro-projetor para projetar uma matriz quadriculada no objeto;
 - ❑ Fotografar a cena com um câmera digital;
 - ❑ Imprimir a imagem;
 - ❑ Traçar a matriz quadriculada não deformada sobre a imagem com a matriz deformada;
 - ❑ Colher os dados e medidas na imagem impressa;
 - ❑ Calcular as distâncias em diversos pontos, conforme indicações no Capítulo 3 – “Conceitos Teóricos”;
 - ❑ Comparar dados experimentais com os reais.
-

8. CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS

A construção do dispositivo sofreu algumas alterações quanto a forma geométrica de algumas peças. Isso deve-se ao fato de que estas alterações facilitaram a obtenção de material e facilitaram a usinagem. As modificações feitas foram transformação da base da forma de paralelepípedo para cilíndrica e divisão do suporte do eixo horizontal em duas peças. Porém, linhas básicas de funcionamento do dispositivo não foram alteradas.

Após a realização dos testes alguns aspectos foram considerados importantes para o melhora do dispositivo em um possível reprojeto:

- ❑ Estabilidade do feixe de laser – Os feixes não apresentam estabilidade de posição. Este fato dificulta as medições e gera desvios nos dados pois sua posição não é estável, tanto para a calibração quanto para a realização das medidas;
 - ❑ Continuidade do feixe de laser – a emissão do feixe de Laser não é contínua, depende da manutenção constante da interferência do usuário.
 - ❑ Ângulos de medição – o dispositivo não apresenta uma forma precisa e eficiente da medição dos ângulos;
 - ❑ Colocação dos dispositivos de fixação para garantir a não movimentação do dispositivo durante o experimento;
 - ❑ Mapeamento dos erros devido a não perpendicularidade entre os eixos de rotação.
-

9. SOFTWARE

O software foi desenvolvido em Borland Builder C++ para ambiente Windows. Sua função é exclusivamente de cálculo, onde o usuário fornece dados para que os cálculos sejam efetuados. Ele é dividido em duas partes:

- ❑ Coordenadas – os dados de entrada são os ângulos medidos no dispositivo e a saída é o valor calculado teoricamente das coordenadas do ponto que está sendo medido;
- ❑ Erros – Os dados de entrada são os valores reais das coordenadas do ponto e as grandezas dos erros de medição, excentricidades e desvios do dispositivo. As saídas são os desvios que são provocados nas coordenadas devido às fontes de erro. Os valores calculados servem de parâmetro para determinar a propagação dos erros, no entanto não fornece os valores reais de cada erro pois não é possível determinar precisamente a ordem de grandeza de cada fonte de erro, a exemplo do erro de leitura de ângulos pelo usuário.

Os cálculos seguem as descrições apresentadas no item “Conceitos Teóricos” e o programa fonte encontra-se no “Anexo 2” deste trabalho.

10. MANUAL DO USUÁRIO

10.1. Dispositivo de Triangulação à Laser

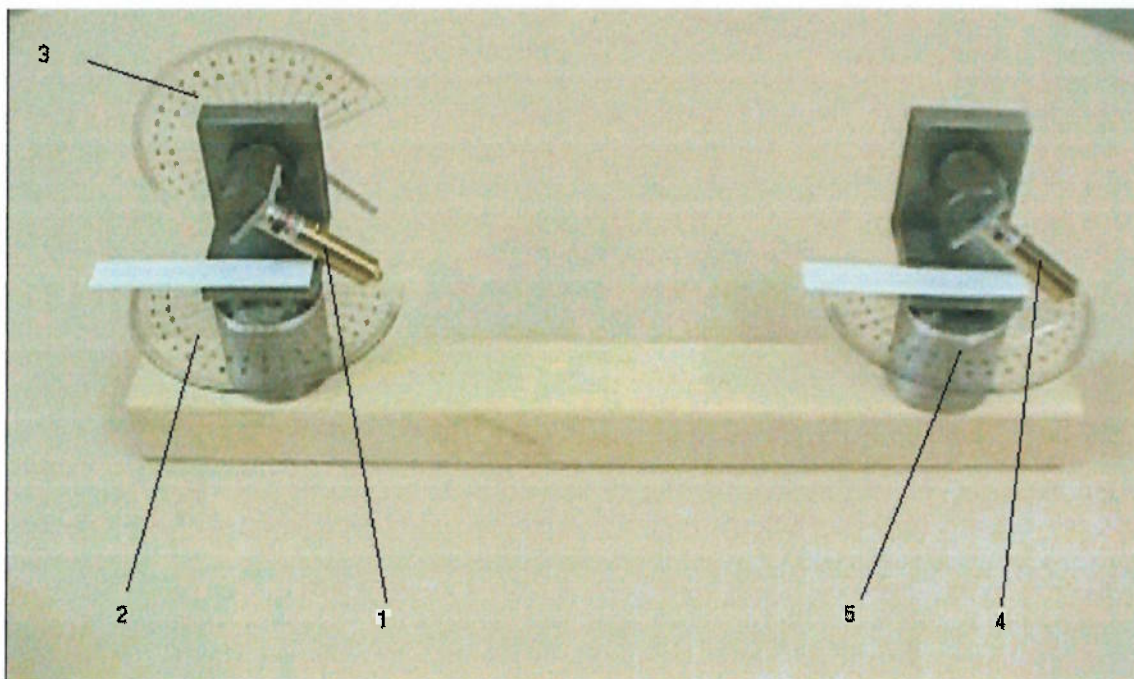


Figura 13 – Dispositivo de Triangulação

1. Feixe de Laser L1;
2. Medição do ângulo α ;
3. Medição do ângulo θ ;
4. Feixe de Laser L2;
5. Medição do ângulo β .

A utilização do dispositivo segue o seguinte procedimento:

- ☐ Calibrar os ângulos referenciais (consultar “Calibração e Testes”);
- ☐ Posicionar o dispositivo na bancada de medição;

- ❑ A distância (c) entre os feixes de Laser é fixa e igual a 300 ± 1 mm;
- ❑ Mirar o feixe L1 no ponto de medição;
- ❑ Medir os ângulos α e θ (Recomendado utilizar as convenções de ângulos descritos no item “Conceitos Teóricos” para a utilização do software);
- ❑ Mirar o feixe L2 no mesmo ponto de medição;
- ❑ Medir o ângulo β ;

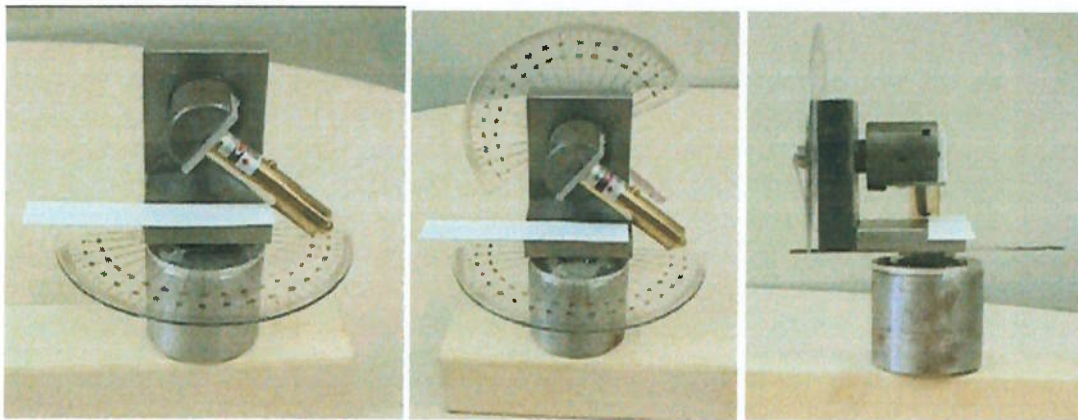


Figura 14 – Dispositivo de triangulação (detalhe)

10.2. Software

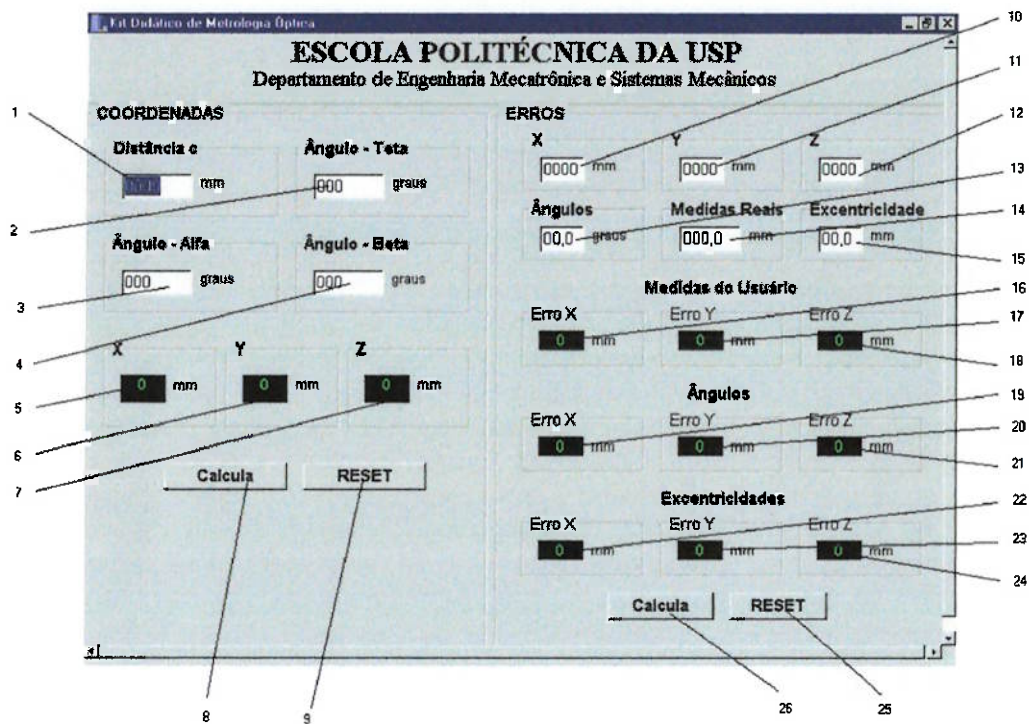


Figura 15 - Software

Conforme a figura:

1. Campo para entrada da distância (c) entre os feixes de laser, em milímetros;
2. Campo de entrada do ângulo θ , em graus;
3. Campo de entrada do ângulo α , em graus;
4. Campo de entrada do ângulo β , em graus;
5. Display do valor calculado da coordenada x , em milímetros;

6. Display do valor calculado da coordenada y, em milímetros;
7. Display do valor calculado da coordenada z, em milímetros;
8. Botão para cálculo das coordenadas;
9. Botão para limpar todos os campos de “Coordenadas”;
10. Campo para entrada do valor real da coordenada x, em milímetros;
11. Campo para entrada do valor real da coordenada y, em milímetros;
12. Campo para entrada do valor real da coordenada z, em milímetros;
13. Campo para entrada do erro de medida de ângulos do usuário, em graus;
14. Campo para entrada do erro das medidas reais, em milímetros;
15. Campo para entrada do valor das excentricidades do dispositivo, em milímetros;
16. Display do valor do erro de medidas do usuário em x, em milímetros;
17. Display do valor do erro de medidas do usuário em y, em milímetros;
18. Display do valor do erro de medidas do usuário em z, em milímetros;
19. Display do valor do erro de medidas de ângulos em x, em milímetros;
20. Display do valor do erro de medidas de ângulos em y, em milímetros;
21. Display do valor do erro de medidas de ângulos em z, em milímetros;
22. Display do valor do erro de excentricidade em x, em milímetros;
23. Display do valor do erro de excentricidade em y, em milímetros;
24. Display do valor do erro de excentricidade em z, em milímetros;
25. Botão para cálculo dos erros;
26. Botão para limpar todos os campos de erros;

A utilização do software segue o procedimento a seguir:

- Digitar os valores de c , α , β e θ nos campos indicados (Obs: para valores de ângulos negativos, deve-se digitar seus ângulos suplementares. Ex: $-15^\circ = 345^\circ$.);

- ❑ Clicar o botão “Calcula” do campo “Coordenadas”;
 - ❑ Os displays apresentaram os valores calculados das coordenadas x, y e z;
 - ❑ Em caso de erro de digitação ou novo cálculo, ao clicar o botão “RESET”, todos os campos são limpos para nova digitação;
 - ❑ A segunda parte de “Erros”, deve-se digitar os valores medidos reais das coordenadas em módulo, os valores dos erros de medição de ângulos e medidas reais e as excentricidades dos dispositivos nos campos adequados;
 - ❑ Clicar o botão “Calcula” referente a “Erros”;
 - ❑ Os displays apresentarão os desvios gerados em cada coordenada devido a cada um dos tipos de imprecisão (o cálculo é feito com os dados de “Coordenadas”, portanto este deve estar preenchido e calculado;
 - ❑ O botão “RESET” tem a mesma função do outro.
-

11. GUIA DE LABORATÓRIO

Experiência: Metrologia Óptica – Triangulação e Luz Estruturada

- **Objetivos:** Apresentar os conceitos básicos de Triangulação a Laser e Luz Estruturada para determinação da forma de superfícies.
- **Conceitos Teóricos:** consultar o trabalho de Graduação “Kit Didático de Metrologia Óptica” da Escola Politécnica da USP (Hamano, M.S.)

PARTE I – Triangulação a Laser

- **Procedimentos:**
 - Posicionar o dispositivo na bancada na posição em que será utilizado para a realização das medidas;
 - Calibrar o dispositivo (consultar “Calibração e Testes”);
 - Posicionar o corpo de prova em frente ao dispositivo

Obs: A distância entre o corpo de prova e o dispositivo não pode mais ser alterada;

- Escolher 5 pontos no corpo de prova a serem medidos

Obs: Atenção: lembre-se que estes pontos devem ser possível de serem focados pelos feixes de laser sem que haja a movimentação do corpo ou do dispositivo;

- Meça a distância (c) entre os dois suportes dos feixes de laser;
 - Faça a medida dos 3 ângulos correspondentes a cada um dos cinco pontos;
-

Ponto	$\alpha (^{\circ})$	$\beta (^{\circ})$	$\theta (^{\circ})$
1			
2			
3			
4			
5			
Distância c: _____ mm			

- Para o ponto 1, calcule suas coordenadas:

X = _____ mm	Y = _____ mm	Z = _____ mm
--------------	--------------	--------------

- Para os demais pontos, determine suas coordenadas utilizando o software fornecido:

Ponto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
2			
3			
4			
5			

- Faça a medida real dos pontos;

Ponto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
-------	----------	----------	----------

1			
2			
3			
4			
5			

- Forneça as medidas reais ao software e determine os desvios;
- Calcule as porcentagens de erro entre os valores reais e experimentais;

Ponto	% erro X (mm)	% erro Y (mm)	% erro Z (mm)
1			
2			
3			
4			
5			

▪ **Questões:**

1. Qual é a necessidade de se realizar as calibrações iniciais ?
2. Descreva um procedimento para medir pontos que estão fora de alcance dos feixes de laser (Sugestão: movimentar o dispositivo ou o corpo de prova).
3. Comente os erros encontrados.
4. Quais são as possíveis fontes de erro que geram as variações entre os valores medidos e os reais ?
5. Cite alguns exemplos de utilização de triangulação a laser em automação industrial.

PARTE II – Luz Estruturada

▪ Procedimentos:

- Posicione o corpo de prova na bancada na frente de um fundo branco;
- Utilizando um retro-projetor, projete uma matriz quadriculada no corpo;
- Fotografe a cena com uma câmera digital;

Obs: O foto deve ser tirada de um ponto mais próximo possível da fonte de projeção;

- Imprima a foto;
- Trace sobre a foto a matriz quadriculada, porém sem deformação;
- Calcule as coordenadas de 5 pontos da figura;

Ponto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1			
2			
3			
4			
5			

- Meça as coordenadas reais do corpo de prova;

Ponto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1			
2			

3			
4			
5			

- Calcule as porcentagens de erro:

Ponto	% erro X (mm)	% erro Y (mm)	% erro Z (mm)
1			
2			
3			
4			
5			

▪ **Questões:**

1. Quais são as possíveis fontes de erro ?
2. Quais as semelhanças e as diferenças em relação ao procedimento anterior?
3. Cite exemplos onde a luz estruturada pode ser aplicada.

12. COMENTÁRIOS FINAIS

A utilização de triangulação a laser para medir distâncias ou determinar formas de superfícies ou objetos é uma ferramenta muito utilizada e importante no ramo de automação. Sua utilização é fundamental em processos de fabricação e controle de qualidade automatizados, permitindo redução dos custos e agilidade dos processos.

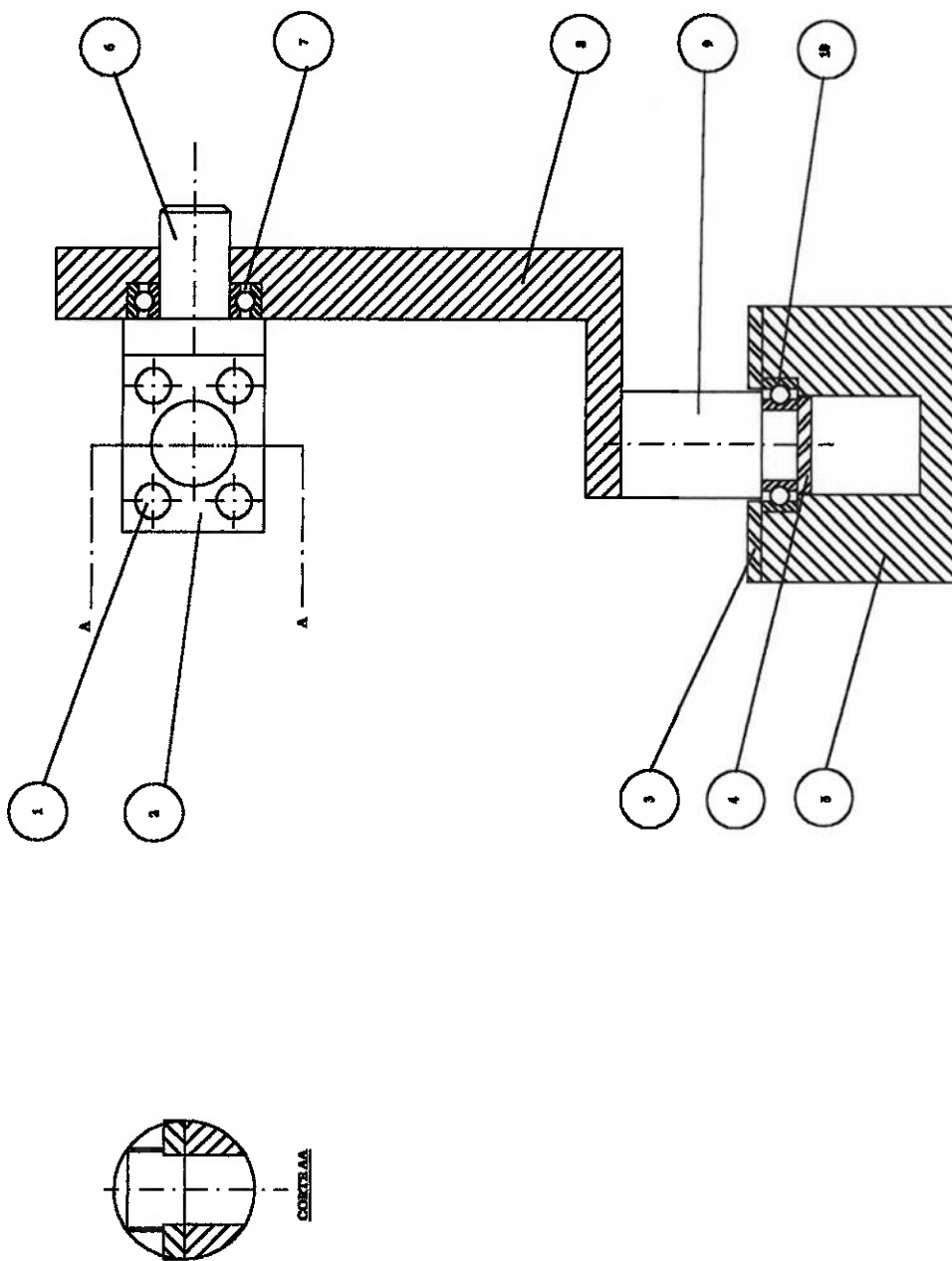
O Kit didático permite ao aluno uma introdução a este assunto que é relativamente simples, porém muito utilizado. Através dos experimentos é possível assimilar os conceitos teóricos simultaneamente com os aspectos que interferem na precisão neste tipo de experimento.

Quanto ao projeto, este aborda de forma bastante ampla um projeto de engenharia, pois nele constam estudo teórico, elaboração e execução do projeto, construção, testes e implementação de um software. Destaca-se que as maiores dificuldades encontradas para realização deste projeto foram a transição do projeto em papel para a construção do protótipo e a realização dos testes. Nestas etapas, foram verificadas as reais barreiras que se encontram em um projeto de engenharia quando este não restringe-se apenas a conceitos teóricos. De uma forma geral, este trabalho possibilitou um real contato com a engenharia prática, sendo de grande valia como experiência do curso.

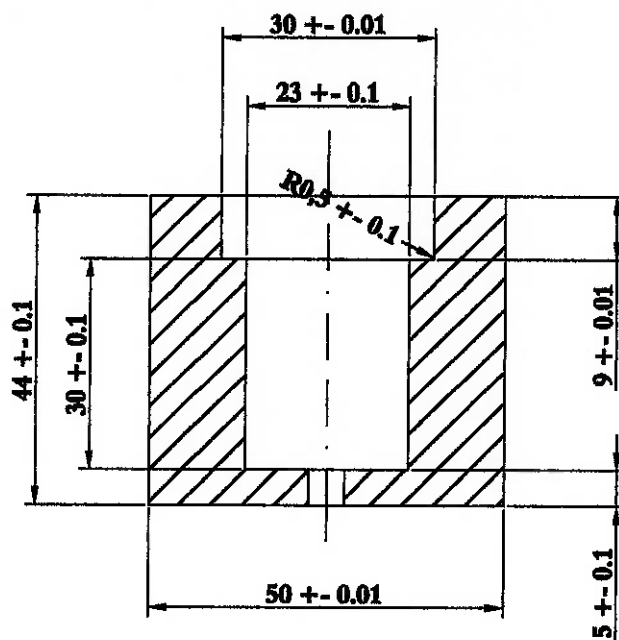
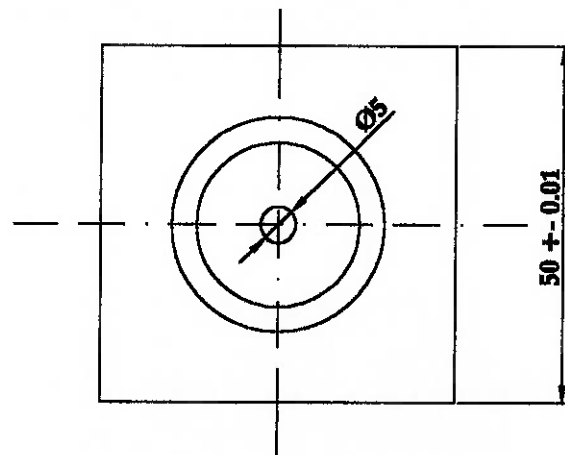
ANEXO 1 – Desenhos de Projeto

Este Anexo contém os seguintes desenhos:

- ❑ Desenho de conjunto do Dispositivo;
- ❑ Desenho de fabricação da base;
- ❑ Desenho de fabricação do Eixo vertical;
- ❑ Desenho de fabricação do Suporte;
- ❑ Desenho de fabricação do Eixo horizontal;

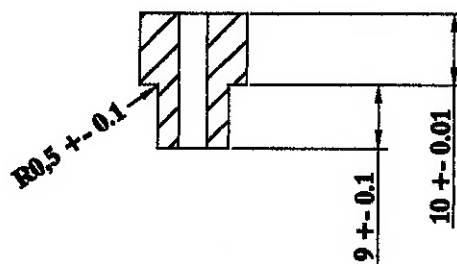
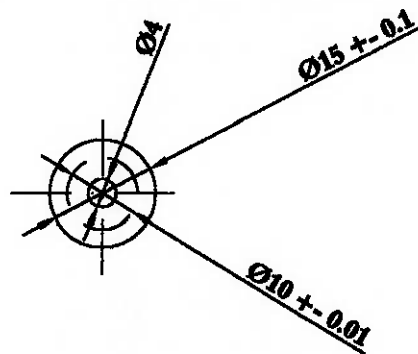


Nº	Descrição	Qtd.	Material
10	Encaixe	1	
9	Elas	1	FORO
8	Superfície	1	FORO
7	Encaixe	1	
6	Elas	1	FORO
5	Apelo	1	FORO
4	Interfície	1	FORO
3	Assal	1	FORO
2	Papa de água	1	FORO
1	Parafuso	4	M5
Material			
Materiais Básicos e Normas			
234443			
Projeto de Formatura			
EFUSP			
Dispositivo			
08/07/2008			



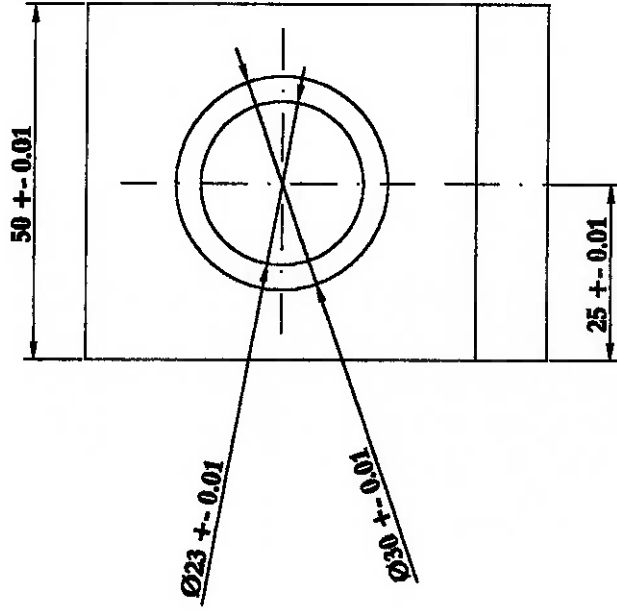
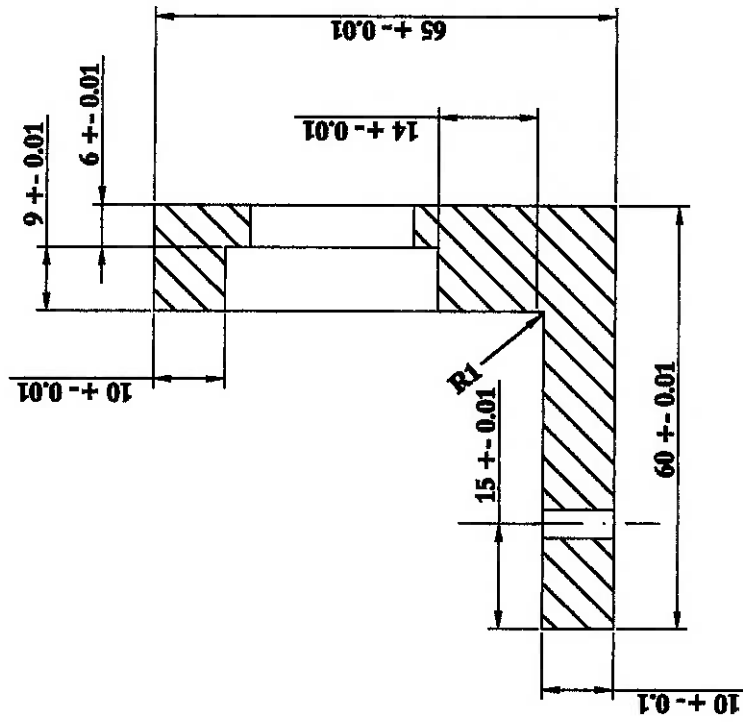
Material: Aço

Marcio Shiguero Hamano		1.0
Kit Didático de Metrologia Óptica		Qtd. 2
Escala 1:1	Base	Data 07/09/2000



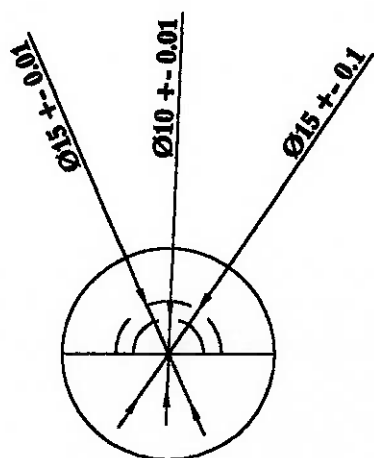
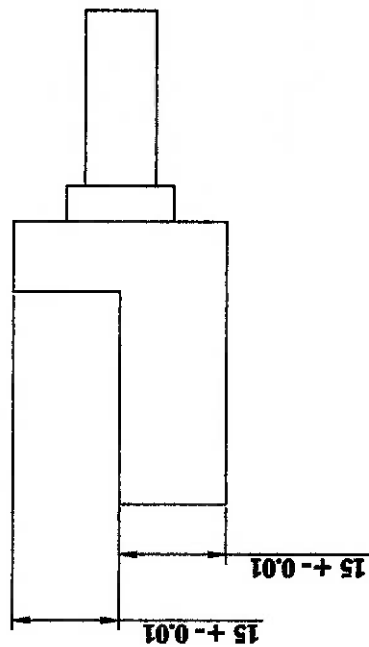
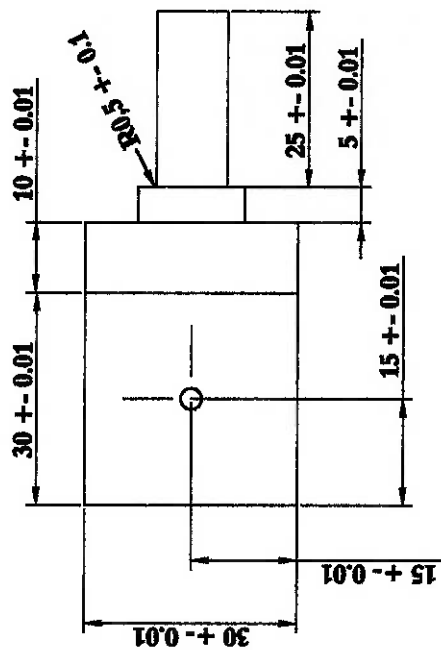
Material: Aço

Marcio Shigueru Hamano		1.0
Kit Didático de Metrologia Óptica		Qtd. 2
Escala 1:1	Eixo Vertical	Data 07/09/2000



Material: Aço

Marcio Shiguere Hamano		1.0
Kit Didático de Metrologia Óptica		Qtd. 2
Escala 1:1	Suporte	Data 07/09/2000



Material: Aço

Marcio Shiguern Hamano	1.0
Kit Didático de Metrologia Óptica	
Escala 1:1	Data 07/09/2000

ANEXO 2 – Software

```
#include "soft.h"
//-----
#pragma resource "*.dfm"
TForm1 *Form1;

double a,b,c,t;
int x,y,z;
int xe,ye,ze;
int xu,yu,zu,xa,ya,za,xi,yi,zi;
const double pi=3.14159265359;

//-----
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}

//-----
// cálculo de módulo

double mod(double num)
{
    double modulo;

    if(num>=0)
        modulo=num;
    else
        modulo=-num;

    return(modulo);
}

//-----
// cálculo das coordenadas x,y e z

void __fastcall TForm1::Button1Click(TObject *Sender)
{
    int dat1[10],dat2[10],dat3[10],dat4[10],i;

    for(i=1;i<10;i++)
    {
        dat1[i]=0;
        dat2[i]=0;
        dat3[i]=0;
        dat4[i]=0;
    }

    for(i=1;i<5;i++)
    {
        if(MaskEdit1->Text[i]!=32)
            dat1[i]=MaskEdit1->Text[i]-48;
        else
            dat1[i]=0;
    }

    c=dat1[1]*1000+dat1[2]*100+dat1[3]*10+dat1[4];
```

```

for(i=1;i<4;i++)
{
    if(MaskEdit2->Text[i]!=32)
        dat2[i]=MaskEdit2->Text[i]-48;
    else
        dat2[i]=0;
}
t=dat2[1]*100+dat2[2]*10+dat2[3];

for(i=1;i<4;i++)
{
    if(MaskEdit3->Text[i]!=32)
        dat3[i]=MaskEdit3->Text[i]-48;
    else
        dat3[i]=0;
}
a=dat3[1]*100+dat3[2]*10+dat3[3];

for(i=1;i<4;i++)
{
    if(MaskEdit4->Text[i]!=32)
        dat4[i]=MaskEdit4->Text[i]-48;
    else
        dat4[i]=0;
}
b=dat4[1]*100+dat4[2]*10+dat4[3];

y=c*sin(t*pi/180)/(tan(a*pi/180)+tan(b*pi/180));
x=c*tan(a*pi/180)/(tan(a*pi/180)+tan(b*pi/180));
z=c*cos(t*pi/180)/(tan(a*pi/180)+tan(b*pi/180));

Label7->Caption=x;
Label8->Caption=y;
Label9->Caption=z;
}
//-----
// cálculo dos erros

void __fastcall TForm1::Button2Click(TObject *Sender)
{
    int data1[10],data2[10],data3[10],u[10],ang[10],e[10],i;
    double an,us,ex,cc;

    xe=0;ye=0;ze=0;

    for(i=1;i<10;i++)
    {
        data1[i]=0;
        data2[i]=0;
        data3[i]=0;
        u[i]=0;
        ang[i]=0;
        e[i]=0;
    }

    for(i=1;i<5;i++)
    {
        if(MaskEdit5->Text[i]!=32)
            data1[i]=MaskEdit5->Text[i]-48;

```

```

else
    data1[i]=0;
}
xe=data1[1]*1000+data1[2]*100+data1[3]*10+data1[4];

for(i=1;i<5;i++)
{
    if(MaskEdit6->Text[i]!=32)
        data2[i]=MaskEdit6->Text[i]-48;
    else
        data2[i]=0;
}
ye=data2[1]*1000+data2[2]*100+data2[3]*10+data2[4];

for(i=1;i<5;i++)
{
    if(MaskEdit7->Text[i]!=32)
        data3[i]=MaskEdit7->Text[i]-48;
    else
        data3[i]=0;
}
ze=data3[1]*1000+data3[2]*100+data3[3]*10+data3[4];

for(i=1;i<5;i++)
{
    if(MaskEdit8->Text[i]!=32)
        ang[i]=MaskEdit8->Text[i]-48;
    else
        ang[i]=0;
}
an=ang[1]*10+ang[2]+ang[4]*0.1;

for(i=1;i<6;i++)
{
    if(MaskEdit9->Text[i]!=32)
        u[i]=MaskEdit9->Text[i]-48;
    else
        u[i]=0;
}
us=u[1]*100+u[2]*10+u[3]+u[5]*0.1;

for(i=1;i<4;i++)
{
    if(MaskEdit10->Text[i]!=32)
        e[i]=MaskEdit10->Text[i]-48;
    else
        e[i]=0;
}
ex=e[1]*10+e[2]+e[4]*0.1;

xu=us;
yu=us;
zu=us;

ya=c*sin((t+an)*pi/180)/(tan((a+an)*pi/180)+tan((b+an)*pi/180));
xa=c*tan((a+an)*pi/180)/(tan((a+an)*pi/180)+tan((b+an)*pi/180));
za=c*cos((t+an)*pi/180)/(tan((a+an)*pi/180)+tan((b+an)*pi/180));

if(a!=90 & a!=270)
    xi=ex*(1-cos(a*pi/180))/(cos(a*pi/180));

```

```

else
{
xi=0;
MessageBox(Handle,"Não é possível calcular erro em X.,"Atenção!",MB_OK);
}

cc=2*ex+ex*((1-cos(a*pi/180))/(cos(a*pi/180)))+ex*((1-cos(b*pi/180))/(cos(b*pi/180)));

if(a!=0 & a!=180 & b!=0 & b!=180)
zi=mod(mod(z)-((c-cc)*(cos(t*pi/180))/(tan(a*pi/180)+tan(b*pi/180))));
else
{
zi=0;
MessageBox(Handle,"Não é possível calcular erro em Z.,"Atenção!",MB_OK);
}

if(t!=90 & t!=270)
yi=ex*(1-cos(t*pi/180))/(cos(t*pi/180));
else
{
yi=0;
MessageBox(Handle,"Não é possível calcular o erro em Y.,"Atenção!",MB_OK);
}

Label13->Caption=xi;
Label14->Caption=yi;
Label15->Caption=zi;
Label25->Caption=xu;
Label27->Caption=yu;
Label29->Caption=zu;
Label32->Caption=mod(mod(xa)-mod(x));
Label34->Caption=mod(mod(ya)-mod(y));
Label36->Caption=mod(mod(za)-mod(z));
}
//-----
// Reset - coordenadas

void __fastcall TForm1::Button3Click(TObject *Sender)
{
x=0;
y=0;
z=0;
Label7->Caption=x;
Label8->Caption=y;
Label9->Caption=z;
MaskEdit1->Text="0;
MaskEdit2->Text="0;
MaskEdit3->Text="0;
MaskEdit4->Text="0;
}
//-----
// Reset - erros

void __fastcall TForm1::Button4Click(TObject *Sender)
{
xi=0;
yi=0;
zi=0;
xe=0;
ye=0;

```

```
ze=0;
xu=0;
yu=0;
zu=0;
xa=0;
ya=0;
za=0;
Label13->Caption=xi;
Label14->Caption=yi;
Label15->Caption=zi;
Label25->Caption=xu;
Label27->Caption=yu;
Label29->Caption=zu;
Label32->Caption=xa;
Label34->Caption=ya;
Label36->Caption=za;
MaskEdit5->Text=0;
MaskEdit6->Text=0;
MaskEdit7->Text=0;
MaskEdit8->Text=0;
MaskEdit9->Text=0;
MaskEdit10->Text=0;
}
//-----
```

ANEXO 3 – Testes

Ponto			Dados Experimentais		Dados Reais	Desvios
1	a =	0	x	0	0	0,00
	b =	29	y	0	0	0,00
	t =	0	z	541	628	16,08
2	a =	4	x	39	50	28,21
	b =	25	y	0	0	0,00
	t =	0	z	559	628	12,34
3	a =	9	x	94	100	6,38
	b =	19	y	0	0	0,00
	t =	0	z	596	628	5,37
4	a =	15	x	144	150	4,17
	b =	16	y	0	0	0,00
	t =	0	z	540	628	16,30
5	a =	19	x	198	200	1,01
	b =	10	y	0	0	0,00
	t =	0	z	576	628	9,03
6	a =	24	x	250	250	0,00
	b =	5	y	0	0	0,00
	t =	0	z	563	628	11,55
7	a =	30	x	300	300	0,00
	b =	0	y	0	0	0,00
	t =	0	z	519	628	21,00
8	a =	15	x	150	150	0,00
	b =	15	y	48	50	4,17
	t =	5	z	557	628	12,75
9	a =	15	x	150	150	0,00
	b =	15	y	87	100	14,94
	t =	9	z	552	628	13,77
10	a =	15	x	150	150	0,00
	b =	15	y	125	150	20,00

	t =	13	z	545	628	15,23
11	a =	15	x	150	150	0,00
	b =	15	y	163	200	22,70
	t =	17	z	535	628	17,38
12	a =	15	x	150	150	0,00
	b =	15	y	200	250	25,00
	t =	21	z	522	628	20,31

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Shirai, Y. – **Three Dimensional Computer vision** – Springer-Verlag Berlin
Hidelberg , Nova Iorque, 1987

 - [2] Rosenfeld, A. – **Techiques for 3-D Machine Perception** – North Holland, 1986

 - [3] Horn, B. K. P. – **Robot Vision** – Mc Graw Hill – London – 1986

 - [4] Stefani, M. A. – **Medida de Distância por Triangulação a Laser** – USC, São Carlos,
1995

 - [5] Manfé, Pozza, Scarato – **Desenho Técnico Mecânico** – Hemm, São Paulo, 1992

 - [6] NSK – **NSK Rolamentos** – NSK Ltd.

 - [7] Spanghero, A. – **Aprendendo C++ Builder 3** – Makron Books, São Paulo, 1999
-