

ENSAIO GEOMÉTRICO DE POSICIONAMENTO COM LASER INTERFEROMÉTRICO

* Prof. Antônio Salvador da Rocha

Realizar um ensaio geométrico de posicionamento, determinando-se os erros de movimento, de posicionamento dos eixos x, y e z ao longo do campo de trabalho da máquina, do centro de usinagem a comando numérico NBH-65, do Laboratório de Máquinas Operatrizes da U. F. S. C., para sua posterior compensação.

Como padrão de posicionamento será adotado o raio laser, proveniente de um laser interferométrico modular.

Serão apresentados os resultados do ensaio de posicionamento do eixo y.

1. DESCRIÇÃO DA MÁQUINA

O centro de usinagem o comando numérico NBH-65 possui uma base fundida em peça rígida nervurada e intensamente treliçada, que cumpre as funções de suporte da máquina, de barramento para a mesa e base para o montante.

O montante da unidade de usinagem, inclusive as guias, é fundido em uma peça, sendo rígido à torção e flexão.

Os eixos x, y e z são acionados por servomotores de corrente contínua, acoplados diretamente aos fusos de esferas recirculantes.

* Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UNIFOR e ETF-CE.

Como sistema de medição de deslocamento, usa-se o sistema indireto pela rotação de fuso, sistema inductosyn.

O sistema de medição de deslocamento foi construído e testado para uma temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

O montante serve de guia para a unidade de usinagem (caixa da árvore) no eixo y. Além disto, tem a função de um carro e contém os patins de rolos recirculantes do eixo z.

Eixo-X.

As guias são superdimensionadas em barras de aço temperado e retificado fino, aparafusadas à base da máquina. A condução principal é feita por 4 patins de rolos recirculantes, presos na carcaça, da mesa de assento.

Para evitar um cambamento da mesa sob carga, mais 4 patins de rolos recirculantes fazem a fixação inferior.

Eixo-Y.

As guias são executadas em réguas de aço temperado com retificado fino, aparafusadas ao montante. Uma régua prismática de aço é fixa, não desmontável.

A condução principal da unidade de usinagem é obtida por 8 patins de rolos recirculantes, que são ajustados por uma régua cônica sem folga, garantindo elevada precisão de deslocamento e posicionamento.

Eixo-Z.

As guias são executadas em réguas de aço temperado e retificado fino, aparafusadas na base da máquina. A condução principal é executada por 4 patins de rolos recirculantes aparafusados ao montante. A condução lateral é obtida também por 4 patins de rolos recirculantes, que são ajustados e protendidos sem folga, por réguas cônicas.

Para evitar o tombamento do montante, 4 elementos de rolos garantem a fixação inferior. Também estes elementos são ajustados e protendidos por blocos.

2. PLANEJAMENTO DO ENSAIO

2.1. Plano de Ensaio

O ensaio será planejado considerando-se: a facilidade de operação; operação em condições específicas; tempo de ensaio mínimo.

2.1.1 - Eixo-X.

Os erros de posicionamento no eixo x são devidos a: erros no passo do fuso; erro no medidor de deslocamento; erro na regulação; não cumprimento da Lei de Abbe (provoca tombamento, devido às folgas).

Com o objetivo de se detectar os erros devido ao tombamento, o ensaio de posicionamento no eixo x deverá ser feito em 3 níveis diferentes:

- 1 - próximo à superfície da mesa (erro mínimo).
- 2 - posição superior máxima (erro máximo).
- 3 - região de maior utilização.

Pretende-se realizar os ensaios a 20mm (ponto de referência zero da máquina); 200mm e 400mm da superfície da mesa, medindo o posicionamento nas seguintes co-

ordenadas do eixo x: 0 - 20 - 40 - 60 - 80 - 100 - 120 - 140 - 160 - 180 - 200 - 250 - 270 - 290 - 310 - 330 - 350 - 370 - 390 - 410 - 430 e 450, conforme a fig. 01. Com o objetivo de verificar o erro de histerese, serão realizadas leituras no sentido positivo e negativo.

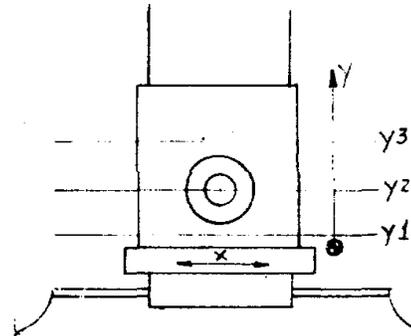


fig. 01 - Trajetórias Ensiadas em x

2.1.2. - Eixo-Y

Os erros de posicionamento no eixo y são função dos erros do fuso y, dos erros de retilidade da guia y e das inclinações da guia y devido ao não cumprimento do princípio de Abbe.

Será realizado apenas um ensaio de posicionamento no eixo y, na posição $z = 300\text{mm}$. Serão medidos os posicionamentos nas seguintes coordenadas de y: 100 - 150 - 200 - 210 - 220 - 230 - 240 - 250 - 260 - 270 - 280 - 290 - 300 - 350 e 380. Com o objetivo de verificar o erro de histerese, serão realizadas leituras no sentido positivo e negativo.

Este ensaio deverá ser correlacionado com o ensaio de retilidade do eixo z, uma vez que não é possível determinar os erros devido à guia z e as deformações destas guias no movimento do montante (para cada ensaio é necessário uma zeragem do sistema de medição).

A fig. 02 mostra o esquema do ensaio.

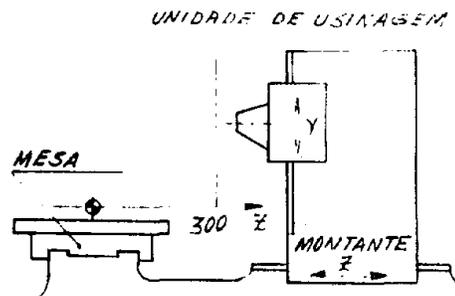


fig. 02 - Ensaio do Eixo-Y

2.1.3 - Eixo-Z

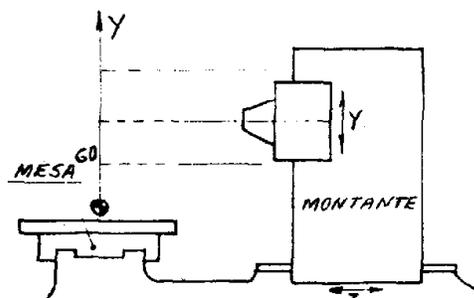
Os erros de posicionamento em z são devidos: aos erros de escala em z; erros da guia z; deformações da guia z em função do deslocamento do montante e deformações da estrutura da máquina; não cumprimento do princípio de Abbe; inclinações de rolamento e de torção no deslocamento em x.

Os erros de posicionamento devido ao tombamento do montante, são determinados por um ensaio de inclinação ou por um de posicionamento de mais de uma trajetória, em diferentes posições do eixo y.

O ensaio de posicionamento do eixo z deverá ser feito a 3 níveis diferentes: a 20mm, 200mm e 400mm da superfície da mesa, medindo-se o posicionamento nas seguintes coordenadas do eixo z: 175 - 200 - 220 - 240 - 260 - 280 - 300 - 320 - 340 - 360 - 380 - 400 - 450 - 500 e 550.

Para se determinar o erro de histerese, as leituras serão realizadas no sentido positivo e negativo.

A fig. 03 mostra o esquema de ensaio.



A fig. 03 - Trajetórias Ensaçadas no Eixo-Z

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

O laser interferométrico modular é um equipamento de medir de elevada precisão apropriado para a realização dos ensaios de precisão geométrica, tais como precisão do posicionamento e transmissão, medição dos desvios da retilidade e da ortogonalidade, etc.

Um laser a gás He-Ne emite um raio com duas frequências f_1 e f_2 bastantes próximas e estáveis, provocado por uma descarga elétrica de alta voltagem. Os elétrons do gás, ao passarem de um nível energético para outro, liberam luz (raio monocromático vermelho com comprimento de onda de 0,6328m). O raio, na verdade, são dois raios superpostos com frequência f_1 e f_2 , polarizados circular e diferentemente, que ao passar por polarizadores, são polarizados linearmente. O raio passa por um defletor, sendo jogada uma parte em um fotodetector, onde é gerado um sinal elétrico com frequência (f_1 e f_2). A outra parte do raio é colocada à disposição dos módulos, conforme fig. 04.

O raio proveniente do laser é, em um interferômetro, separado em duas componentes ortogonais. Através dos retrorefletores, são novamente encaminhados ao interferômetro, seguindo para o fotodetector, localizado no captador. Este sinal, juntamente com o sinal de referência gerado no cabeçote, são contados e separados ciclicamente, sendo o resultado registrado em um acumulador.

Caso se desloque um retrorefletor para frente a frequência será aumentada ($f_1 + \Delta f_1$), se para trás, a frequência será diminuída ($f_1 - \Delta f_1$) e/ou ($f_2 + \Delta f_2$), ($f_2 - \Delta f_2$), respectivamente. O sinal gerado terá durante o deslocamento, uma frequência ($f_1 + \Delta f_1$) - ($f_2 + \Delta f_2$), sendo registrada a diferença nos contadores, que multiplicada pelo comprimento de onda, dá o deslocamento do retrorefletor.

No interferômetro linear, um dos retrorefletores é fixo em relação ao interferômetro. Havendo deslocamento dx do outro retrorefletor a diferença no caminho ótico entre f_1 e f_2 será proporcional ao deslocamento dx .

O deslocamento dx pode ser medido com uma resolução de $0,16\mu\text{m}$ ao longo de 60m com uma incerteza de $\pm 1\mu\text{m/m}$, sob condições ideais.

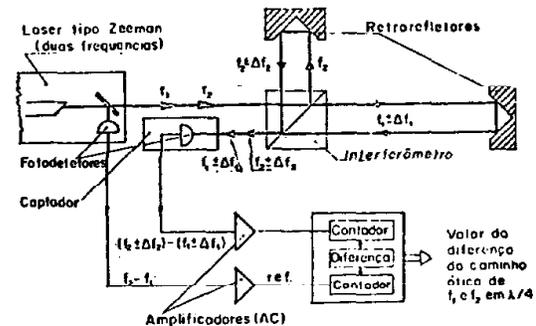


fig. 04 - Componentes básicos do Laser Interferométrico Modular.

3.1. Instrumentos Auxiliares

Foram utilizados os seguintes instrumentos auxiliares:

- Paquímetro - 0 - 150mm (Resolução = 0,05mm)
- Blocos retificados - 15 x 30 x 200mm
- Nível de bolha

4. ADAPTAÇÃO DO SISTEMA À MÁQUINA

1) O laser deve estar paralelo a uma das extremidades da mesa, e à sua superfície;

2) Os retrorefletores devem estar alinhados com o interferômetro;

3) O laser, o interferômetro e os retrorefletores devem estar rigidamente apoiados, para evitar-se vibrações;

4) Com o comprimento de onda do laser (λ) varia em função das condições atmosféricas do meio ambiente, se faz necessária a medição da temperatura, pressão e umidade. Para se comparar valores de comprimento em elevado grau de precisão, deve-se tomar estes valores a uma temperatura padrão. Por isso, será realizada a medição da temperatura ambiente;

5) Para o ensaio de posicionamento do eixo x e z, onde se planejou efetuar o ensaio em 3(três) níveis diferentes, o interferômetro, juntamente com o captador, serão fixados na cantoneira em L, conforme fig. 6;

6) Não será possível a utilização do avanço de trabalho, pois o mesmo só funciona com a árvore em movimento. O posicionamento será efetuado com avanço rápido;

7) Deverá ser programada uma parada da árvore, para que não haja movimento do retrorefletor (Programar M 19);

8) Antes de iniciar o ensaio, a máquina deverá funcionar em vazio durante aproximadamente 5 minutos, para que todos os elementos estejam à temperatura de trabalho;

9) As operações de ensaio devem ser protegidas contra variações térmicas externas.

Na figura 5 temos a apresentação do sistema de coordenadas do centro de usinagem NBH-65, enquanto que, na figura 6, temos uma vista do estrado e do cabeçote (árvore) da referida máquina, com o sistema de medição montado para ensaio do eixo y.

5. PROCEDIMENTO DO ENSAIO

5.1. Protocolo do Ensaio do Eixo-Y

a) Checar o sistema de medição e condições de operação da máquina.

b) Alinhar o laser com o retrorefletor, garantindo que o raio fique paralelo a uma das extremidades e à superfície da mesa. Usar calços retificados para facilitar a centragem.

c) Alinhar o interferômetro entre o laser e o retrorefletor, verificando se o raio chega ao captador.

d) Preencher os dados da Planilha Quadro de Leituras.

e) Fazer a zeragem do sistema de medição.

f) Realizar seqüencialmente a medição dos posicionamentos nos pontos pré-determinados, anotando os valores na planilha Quadro de Leituras e/ou armazenando os valores no computador (aquisição automática).

g) Serão feitos 5 ciclos de medição, onde cada ciclo consiste de 15 valores no sentido positivo e 15 no sentido negativo, determinados no plano de ensaio.

h) Qualquer anomalia ocorrida durante o ensaio, deve ser registrada no quadro de observações.

6. DOCUMENTAÇÃO DE DADOS

6.1. Quadro de Leituras (mm)

NBH-65 – ENSAIO DE POSICIONAMENTO

CONDIÇÕES AMBIENTAIS

TEMP. AMBIENTE = 24,0°C
 TEMP. MÁQUINA = 24,7°C
 UMIDADE REL. AR = 67%
 PRESSÃO ATMOSF. = 1017m bar
 DATA: 07/12/83
 HORA: 4,30 – 5,30h
 OPERADORES:
 SALVADOR e UDO

6.2. Quadro de Observações

1. Não foi possível fazer a aproximação do ponto de precisão (função G 60), pois a mesma só funciona com avanço programado (G 01).

2. Durante o deslocamento do montante da unidade de usinagem, observou-se um deslocamento da árvore, porém, parando sempre na mesma posição.

Pontos	Coorde- nada da máquina	Coorde- nada do laser	C 1	IC 2	L 3	O 4	S 5
1	100	10	0,999	0,929	0,924	0,920	0,924
2	130	60	0,988	0,922	0,921	0,920	0,917
3	200	110	0,981	0,917	0,917	0,915	0,912
4	210	120	0,985	0,919	0,916	0,917	0,912
5	220	130	0,982	0,918	0,915	0,915	0,911
6	230	140	0,983	0,920	0,917	0,916	0,913
7	240	150	0,984	0,920	0,917	0,917	0,913
8	250	160	0,986	0,921	0,917	0,917	0,914
9	260	170	0,981	0,919	0,917	0,916	0,912
10	270	180	0,980	0,917	0,916	0,914	0,911
11	280	190	0,979	0,917	0,916	0,913	0,910
12	290	200	0,981	0,918	0,917	0,916	0,912
13	300	210	0,980	0,916	0,915	0,918	0,911
14	350	260	0,981	0,915	0,916	0,915	0,912
15	380	290	0,983	0,915	0,915	0,914	0,910
-1	380	290	0,984	0,919	0,918	0,918	0,915
-2	350	260	0,986	0,920	0,919	0,920	0,917
-3	300	210	0,986	0,919	0,919	0,919	0,916
-4	290	200	0,970	0,921	0,918	0,921	0,917
-5	280	190	0,968	0,919	0,919	0,918	0,916
-6	270	180	0,969	0,920	0,920	0,920	0,917
-7	260	170	0,970	0,921	0,921	0,921	0,918
-8	250	160	0,970	0,921	0,921	0,921	0,918
-9	240	150	0,969	0,921	0,921	0,921	0,918
-10	230	140	0,969	0,921	0,921	0,921	0,918
-11	220	130	0,960	0,920	0,920	0,920	0,917
-12	210	120	0,961	0,921	0,921	0,921	0,918
-13	200	110	0,958	0,919	0,919	0,919	0,916
-14	150	60	0,951	0,922	0,922	0,922	0,919
-15	100	10	0,950	0,922	0,922	0,926	0,923

7. PROCESSAMENTO DE DADOS

7.1. Cálculo das Grandezas

1. MEDIDA REAL

MR = Média das Medidas

2. ERRO SISTEMÁTICO

ES = Média das Medidas – Valor Verdadeiro

ES = Medida Real – Medida Ideal

3. INCERTEZA DO RESULTADO

$$IR = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot S$$

Onde: S = Desvio Padrão
 t = Coeficiente de Student
 n = No. de Ciclos

$$\frac{t}{\sqrt{n}} = 1,24 \text{ (Por tabela)}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

4. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

IM = t . s t = 2,8 (Por tabela)

5. HISTERESE

H = Leitura do Descarregamento – Leitura do Carregamento

6. ERRO DE POSICIONAMENTO (VDI/DCQ 3441)

$$EP = \left| \begin{array}{c} H \\ \text{máx} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} H \\ \text{min} \end{array} \right|$$

7. INCERTEZA DE POSICIONAMENTO (VDI/DCQ 3441)

$$IP = \left| \begin{array}{c} IR \\ \text{carreg.} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{c} IR \\ \text{descar.} \end{array} \right|$$

fig. 05 - Sistema de Coordenadas - NBH - 65

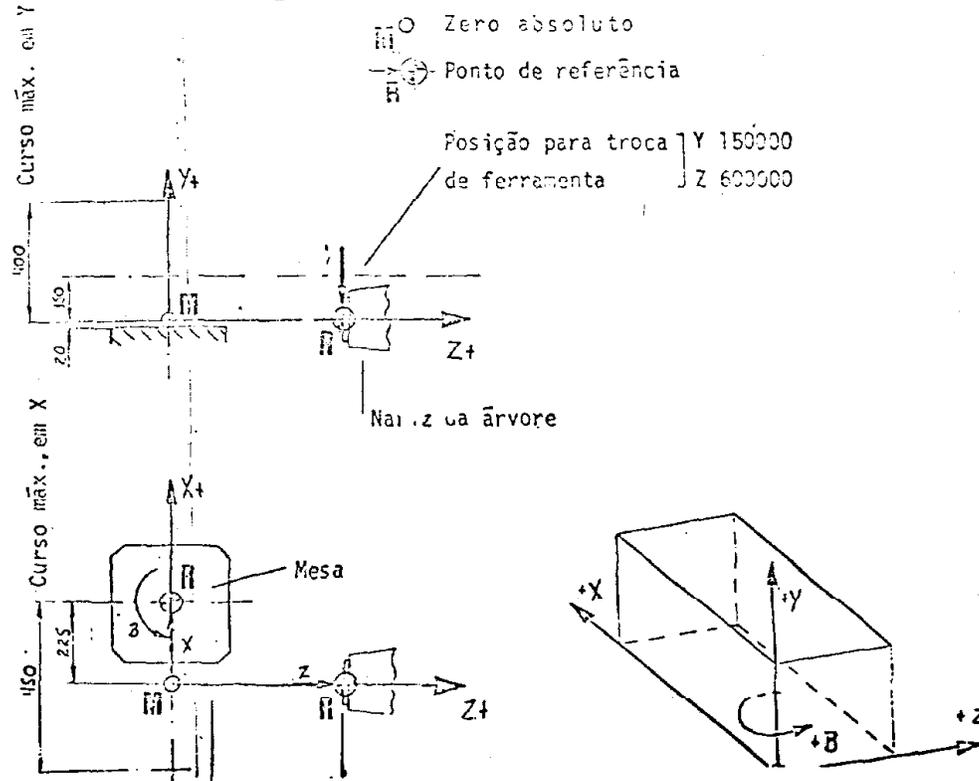
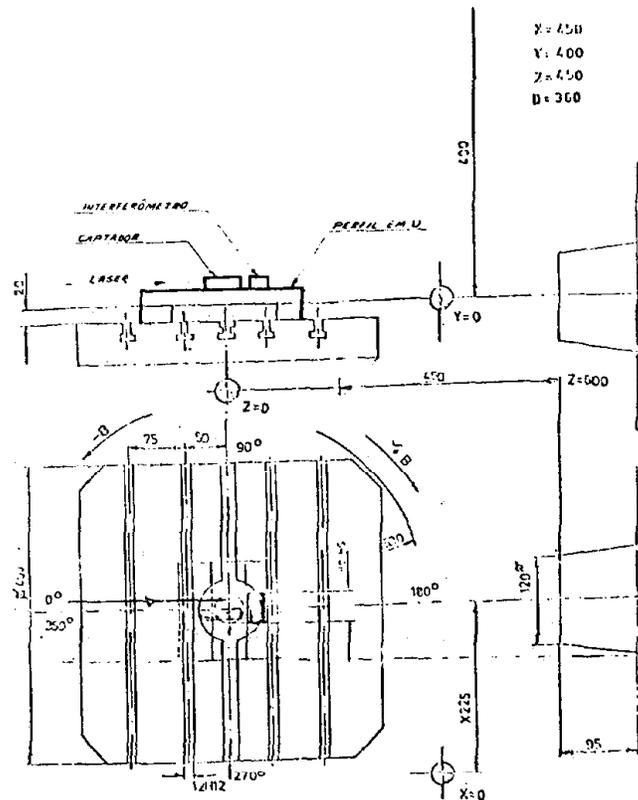
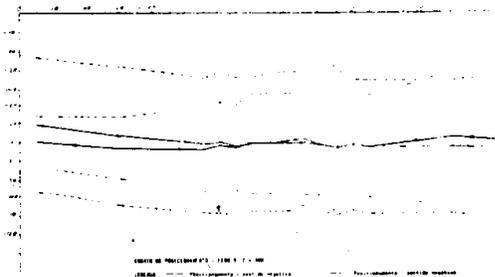


Fig. 06 - Estrado e Cabeçote (árvore) do Centro de Usinagem NBH-65.



7.2. Apresentação dos resultados, valores em (mm)

Pontos	Medida Ideal	Medida real	Erro aleatório (mm)	Incerteza temático do resul. de medição (mm)	Incerteza do resultado (mm)	Histerese (mm)
1	10	9,940	-59,8	36,2	81,7	
2	90	89,934	-65,4	37,9	85,0	
3	110	109,928	-71,6	37,2	85,1	
4	120	119,930	-70,2	38,7	87,3	
5	130	129,928	-71,8	37,9	85,2	
6	140	139,930	-70,2	37,2	83,7	
7	150	149,930	-69,8	37,7	84,8	
8	160	159,931	-69,0	38,6	86,6	
9	170	169,922	-67,6	36,7	82,6	
10	180	179,929	-71,2	36,6	82,3	
11	190	189,927	-73,0	36,7	82,5	
12	200	199,929	-71,2	36,4	81,9	
13	210	209,928	-72,0	36,6	82,3	
14	260	259,928	-72,2	37,0	83,2	
15	290	289,927	-72,6	39,1	87,9	
16	280	289,931	-69,2	37,4	84,1	3,4
17	260	260,932	-67,6	37,3	83,0	4,0
18	210	209,928	-71,8	28,1	63,2	0,2
19	200	199,929	-70,6	28,3	63,6	0,6
20	190	189,928	-72,0	27,9	62,7	1,0
21	180	179,929	-70,8	27,9	62,7	0,4
22	170	169,930	-70,0	28,0	63,0	-2,4
23	160	159,930	-69,8	27,9	62,7	-0,8
24	150	149,930	-70,0	27,7	62,3	-0,2
25	140	139,930	-70,0	27,4	61,0	0,2
26	130	129,927	-72,6	23,1	51,9	-0,8
27	120	119,928	-71,6	23,1	51,9	-1,4
28	110	109,928	-73,8	22,5	50,6	-2,2
29	90	89,927	-72,8	18,7	37,5	-4,4
30	10	8,931	-68,4	13,6	30,8	-9,6



8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

INCERTEZA DE POSICIONAMENTO = 83 m
 ERRO DE POSICIONAMENTO ≈ 13 m
 ERRO SISTEMÁTICO = Relativamente Alto
 ERRO MÁXIMO = 73,8 m, no ponto 110, no sentido neg.
 HISTERESE = - 9,6 μm no ponto 10.

Como o 1o. ciclo apresentou valores bastante diferentes dos demais, resolvemos eliminá-los e processá-los novamente, porém utilizando o computador.

Os resultados estão mostrados nas Tabelas 1,2 e Gráfico 2.

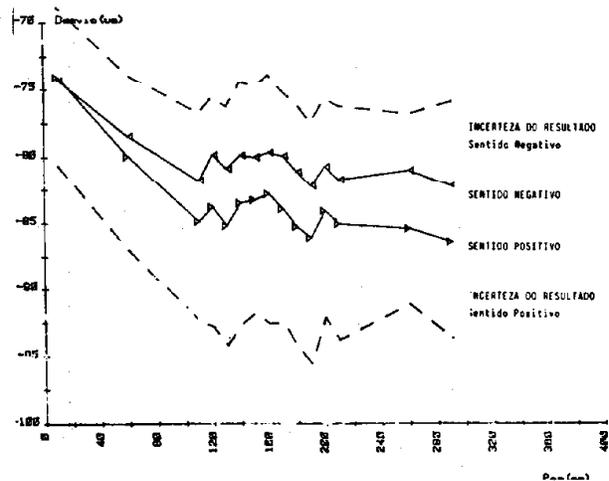
Observa-se que o erro sistemático aumenta, e que a incerteza do resultado diminui.

POSICIONAMENTO EM Y

Estação	Distância (m)	Medida (m)	Erro (mm)	Incerteza (mm)	Histerese (mm)
1	10	9,940	-59,8	36,2	81,7
2	90	89,934	-65,4	37,9	85,0
3	110	109,928	-71,6	37,2	85,1
4	120	119,930	-70,2	38,7	87,3
5	130	129,928	-71,8	37,9	85,2
6	140	139,930	-70,2	37,2	83,7
7	150	149,930	-69,8	37,7	84,8
8	160	159,931	-69,0	38,6	86,6
9	170	169,922	-67,6	36,7	82,6
10	180	179,929	-71,2	36,6	82,3
11	190	189,927	-73,0	36,7	82,5
12	200	199,929	-71,2	36,4	81,9
13	210	209,928	-72,0	36,6	82,3
14	260	259,928	-72,2	37,0	83,2
15	290	289,927	-72,6	39,1	87,9
16	280	289,931	-69,2	37,4	84,1
17	260	260,932	-67,6	37,3	83,0
18	210	209,928	-71,8	28,1	63,2
19	200	199,929	-70,6	28,3	63,6
20	190	189,928	-72,0	27,9	62,7
21	180	179,929	-70,8	27,9	62,7
22	170	169,930	-70,0	28,0	63,0
23	160	159,930	-69,8	27,9	62,7
24	150	149,930	-70,0	27,7	62,3
25	140	139,930	-70,0	27,4	61,0
26	130	129,927	-72,6	23,1	51,9
27	120	119,928	-71,6	23,1	51,9
28	110	109,928	-73,8	22,5	50,6
29	90	89,927	-72,8	18,7	37,5
30	10	8,931	-68,4	13,6	30,8

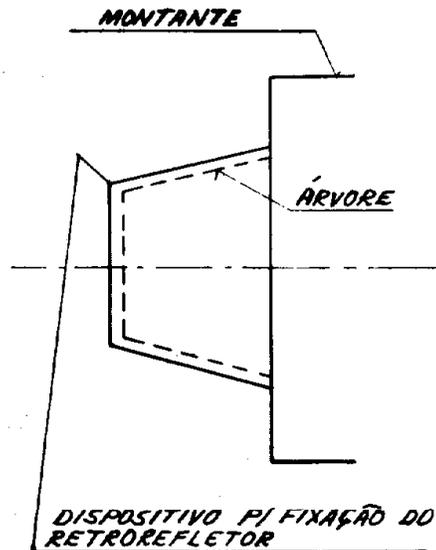
ENSAIO DE POSICIONAMENTO EIXO Y (Z)

ENSAIO DE POSICIONAMENTO EIXO Y (Z= 700)



9. RELATÓRIO

Não será apresentado relatório, uma vez que realizamos o ensaio de apenas um eixo e os resultados podem ser analisados no gráfico anterior.



10. ANÁLISE CRÍTICA DO ENSAIO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fato de não ser possível utilizar um avanço programado (G 01) e a aproximação do ponto desejado com precisão (G 60), associado ao fato de que a árvore, mesmo travada (M 19), possua um deslocamento angular durante o deslocamento, diminuem a confiabilidade do ensaio realizado.

Faz-se necessário, pois, um novo planejamento, onde estes fatores sejam eliminados.

Como sugestão, o retrorefletor deveria ser fixado em um dispositivo especial, o qual seria fixado sobre a árvore, porém sem evitar o seu funcionamento. Este dispositivo seria como o mostrado na figura 07.