

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CONTRIBUIÇÃO À CONVERSÃO DE UMA FRESADORA
MANDRILADORA EM UMA MÁQUINA DE MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

MARCIANO FURUKAVA

FLORIANÓPOLIS - FEVEREIRO, 1982

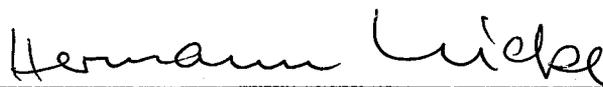
CONTRIBUIÇÃO À CONVERSÃO DE UMA FRESADORA
MANDRILADORA EM UMA MÁQUINA DE MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL

MARCIANO FURUKAVA

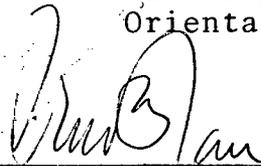
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

"MESTRE EM ENGENHARIA"

Especialidade Engenharia Mecânica - área de concentração - Projeto
e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação.



Prof. Hermann Adolf Harry Lücke, Dr. Ing.
Orientador



Prof. Arno Blass, Ph. D.
Coordenador do Curso

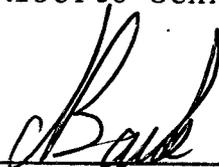
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Hermann Adolf Harry Lücke, Dr. Ing.



Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.



Prof. Nelson Back, Ph. D.

Prof. Kozel

À minha mãe

À minha esposa

AGRADECIMENTOS

- . Ao Prof. Lücke pela orientação e incentivo.
- . Ao Prof. Schneider e sua equipe do LABMETRO, pelo apoio e dedicação.
- . Aos Profs. Blass e Back.
- . Aos amigos, Brandão (photo), Roque, Marcos, Edlaine, Aldo, Basso, Alexandre, Vera, Bete, Carlson, Altamir, Lourdes, Quirino, Acires, Bia, Wilians.
- . A todos que de alguma forma, prestaram sua colaboração à realização deste trabalho.

Meus sinceros

Agradecimentos

Í N D I C E

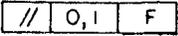
SIMBOLOGIA	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Considerações iniciais	1
1.2 - Máquinas de medição tridimensionais .	2
1.3 - Fresadora mandriladora	6
1.4 - Objetivos do trabalho	10
CAPÍTULO II - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS SOBRE A PRECISÃO GEO	
MÉTRICA	12
2.1 - Erros dos movimentos	12
2.2 - Erros de medição	12
2.2.1 - Erro de medição de 1a. e 2a.	
ordem	15
2.3 - Erro nas três direções com a movimen-	
tação da mesa sobre um dos eixos	16
2.4 - Descrição geral dos erros para a mo-	
vimentação da mesa nos três eixos ...	19
2.5 - Princípio de Abbe	19
2.6 - Determinação analítica dos erros de	
medição	21

CAPÍTULO III - ADAPTAÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE MEDIÇÕES DE COORDENADAS	25
3.1 - Sistemas de medições de deslocamento.	25
3.2 - Localização do sistema de medições de deslocamento	28
3.3 - Diretrizes do projeto	31
3.3.1 - Características da adaptação da escala no eixo x	33
3.3.2 - Características da adaptação da escala no eixo y	34
3.3.3 - Características da adaptação da escala no eixo z	36
3.4 - Definição das principais grandezas geométricas	37
CAPÍTULO IV - MEDIÇÃO DOS ERROS	41
4.1 - Objetivos da medição	41
4.1.1 - Medição do erro de posicionamento	42
4.1.2 - Medição do erro de retilidade	44
4.1.3 - Medição do erro angular (medição direta)	46
4.1.4 - Determinação do erro angular pela medição do erro de posicionamento e retilidade em dois planos diferentes	49
4.2 - Metodologia de obtenção e apresentação dos resultados	51
4.2.1 - Calibração dos instrumentos .	63

CAPÍTULO V - RESULTADOS E ANÁLISES	70
5.1 - Erro sistemático do posicionamento e retilineidade	70
5.2 - Erros sistemáticos angulares do movimento na direção x	73
5.3 - Erro aleatório da medição	75
5.4 - Determinação do ângulo pelo método <u>in</u> direto	78
5.5 - Quadro dos resultados das medições ..	79
5.6 - Análise dos erros em relação a geometria da máquina	82
5.7 - Análise comparativa dos erros	82
5.7.1 - Análise dos erros angulares .	82
5.7.2 - Análise dos erros de retilineidade	84
5.7.3 - Análise dos erros de posicionamento	85
 CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES	 86
 CAPÍTULO VII - RECOMENDAÇÕES	 87
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 88

SIMBOLOGIA

M3D	- Máquinas de medição tridimensionais
SAS	- Sistemas de aquisição de sinais
\square	- Guia plana
V	- Guia "v"
(x,y,z)	- Coordenadas cartesianas
(x_0,y_0,z_0)	- Coordenadas iniciais (P1)
(x_f,y_f,z_f)	- Coordenadas finais (P2)
$\Delta A,\Delta B,\Delta C$	- Graus de liberdade angular, movimentos de tombamento, rolamento e torção
$\Delta x,\Delta y,\Delta z$	- Graus de liberdade linear
dx,dy,dz	- Erros de 1a. ordem
$dx_2,dy_2,dz_2,dx^*,dy^*,dz^*$	- Erros de 2a. ordem
$dx(Bz)_x$	- Erro de medição
dxx,dyy,dzz	- Erros de posicionamento
dyx,dzx,dxy,dzy,dxz,dyz	- Erros de retilineidade
$dx(x),dy(x),dz(x)$	- Erros sistemáticos de posicionamento
$dy(x),dz(x),dx(y),dz(y),dx(z),dy(z)$	- Erros sistemáticos de retilineidade
dAx,dBx,dCx	- Erros angulares
$dA(x),dB(x),dC(x)$	- Erros sistemáticos angulares
$Sx(x)$	- Erro aleatório de medição do posicionamento

- max - Índice de máximo
- A, B, C, α , β , σ - Ângulos
- b, h - Braços de medição
-  - Fixação na mesa
-  - Fixação na base
- g - Tolerância de retilineidade
- am - Distância da linha de medição à escala
- al - Distância da linha de medição à guia
- $\ell_{mx}, \ell_{my}, \ell_{mz}$ - Comprimento das arestas do campo de trabalho
-  - Superfície "B"
- POSIC - Erro de posicionamento
- RETIL - Erro de retilineidade
- PV - Primeiro valor
- INCL - Inclinação da reta
- No - Nível
- \emptyset - Diâmetro da ponta do apalpador
-  - Paralelismo de 0,1 com a superfície F
- ℓ_f - Distância entre os pontos de apoio da guia

RESUMO

Este trabalho é um passo básico no projeto de conversão de uma máquina ferramenta em uma máquina de medição tridimensional.

O objetivo principal constitui na análise dos erros da máquina bem como os fatores causadores.

Baseadas nesta análise, serão fixadas as escalas eletroônicas para a medição dos deslocamentos, visando a conversão.

Além disto, os erros serão determinados através de metodologias distintas: analiticamente através do relacionamento com as dimensões da máquina e diretamente através da medição propriamente dita.

Finalmente, os resultados apresentados pelos dois métodos serão analisados e comparados para a determinação da validade dos mesmos e caracterizar a qualidade desta máquina de medição tridimensional.

A B S T R A C T

The present work is a basic step in the design of the conversion of a machine tool into a tridimensional measuring machine.

The main objective of the work is to analyse the errors in the machine as well as the factors which caused these errors.

Based on such analyses, electro optical scales will be established for measuring displacement, aiming the conversion.

Besides, errors will be determined through distinct methodologies: analytically, through the relationship of the dimensions of the machine and directly through the measurement itself.

Finally, the results obtained through both methods will be analysed and compared in order to determine their validity and characterize the quality of the tridimensional measuring machine.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações iniciais

Com o desenvolvimento tecnológico nos diversos campos de conhecimentos, como por exemplo, o aeroespacial, nuclear e computacional, a metrologia é requisitada a efetuar medições em peças de dimensões, desde as minúsculas até as gigantescas, com graus de complexidade e precisão cada vez maiores, necessitando para isto, de instrumentos e sistemas de controle que permitam atingir estes requisitos.

Esta problemática, atualmente, está sendo satisfatoriamente solucionada com a utilização das MÁQUINAS DE MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL - M3D.

Apesar do grande aperfeiçoamento das M3D, o processo do controle dentro da fabricação e o domínio da automatização da medição com a utilização de computadores, tem incentivado a proposta de converter uma máquina ferramenta como M3D.

Dentro deste contexto, este trabalho objetiva converter, especificamente, uma fresadora mandriladora numa M3D, analisando tanto o processo de conversão quanto os resultados obtidos.

1.2 - Máquinas de medição tridimensionais

As M3D são equipamentos de porte, destinadas ao controle tridimensional e geométrico da peça, que executam medições através do movimento relativo entre um apalpador e a peça, dentro do sistema de coordenadas [1].

A figura 1, esquematiza a concepção de uma M3D, onde podem ser observados os seus principais componentes, quais sejam:

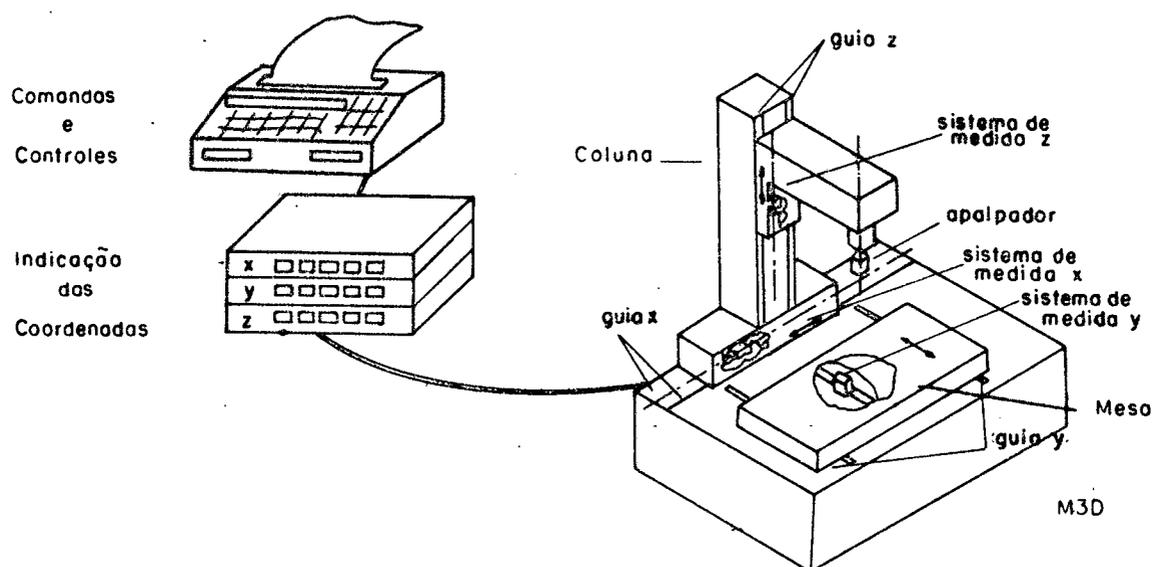


FIGURA 1 - Componentes básicos de uma M3D.

1º) - A mesa, para o assentamento da peça a ser medida, posicionada sobre o plano (x,y);

2º) - O sistema de guias, para o deslocamento da mesa (direção y), e do apalpador (direções x e z). A guia x permite o deslocamento da coluna de sustentação do apalpador. E a guia z, o deslocamento do suporte do apalpador;

3º) - O apalpador multidirecional;

4º) - As escalas, embutidas no corpo da máquina, que me-

dem os deslocamentos da mesa e do apalpador nas três direções (x,y,z) ;

5º) - O comando e o controle para a indicação das coordenadas e o processamento das medições.

O processo de medição, pode ser compreendido com o auxílio da figura 2, onde se verifica a escala e a peça fixa na mesa da M3D (móvel), e o apalpador, juntamente com o cabeçote de leitura, presos na base da máquina (fixa).

A peça e a escala são posicionadas em 1 (início do trecho a medir), relativa ao apalpador e o cabeçote, respectivamente, quando inicia-se o processo de medição.

O deslocamento da mesa e da peça para posicioná-las em 2 (final do trecho a medir) induz movimento idêntico da escala em relação ao cabeçote.

O resultado da medição é obtido, através das escalas, pela diferença entre a posição final e inicial do seu cabeçote, levando em consideração uma constante (\emptyset), relativa a dimensão da ponta do apalpador.

As M3D, podem apresentar diversas formas estruturais como as exemplificadas na figura 3.

Elas diferem, uma das outras, pelas características de movimentação da peça ou do apalpador; pelas suas formas estruturais, e, pela sistemática de posicionamento da peça e do sistema de medição.

A M3D, tipo "braço", da figura 3, movimenta o apalpador nas três direções (x,y,z) , medindo este deslocamento em relação ao sistema de coordenadas, mantendo fixa a peça.

Este fato, constitui-se em uma das vantagens apresentadas por esta M3D, já que o resultado da medição não é influenciado pelo peso da peça a ser mensurada. No entanto, apresenta a desvantagem da influência do peso do apalpador e de seu cabeçote, sobre a geometria do braço de sustentação, influenciando no resultado final

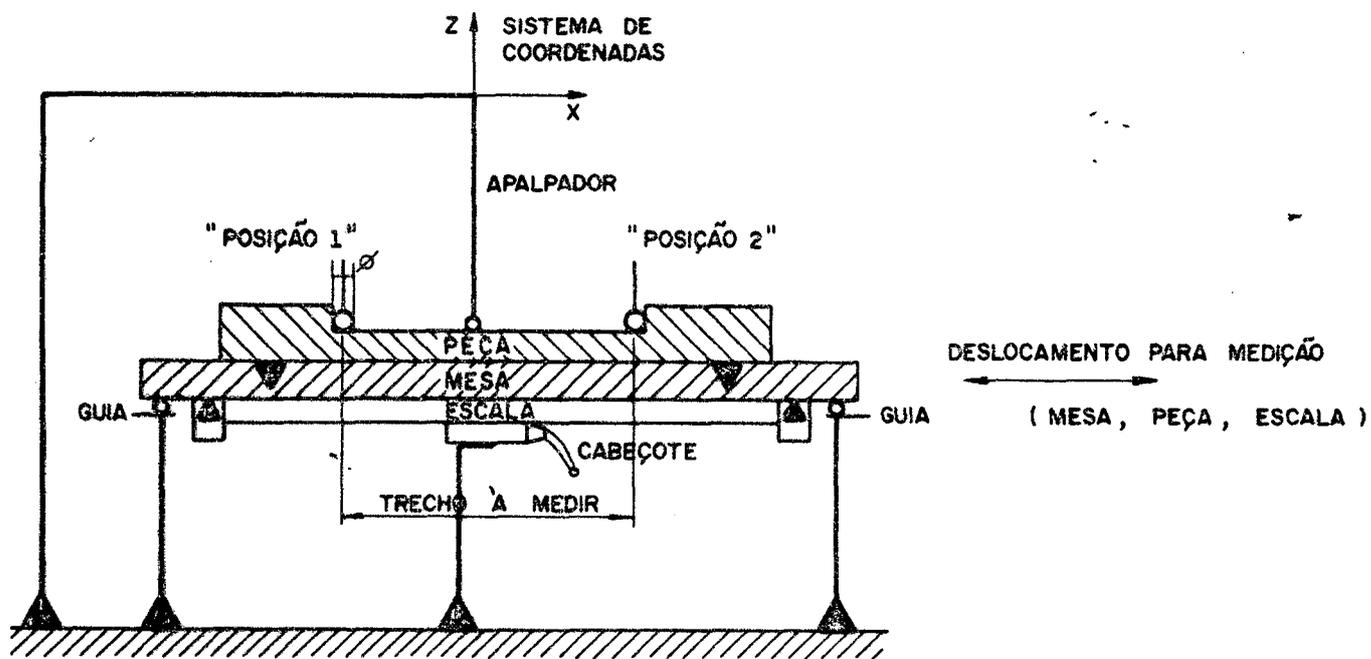


FIGURA 2 - Processo de medição com a utilização de um apalpador.

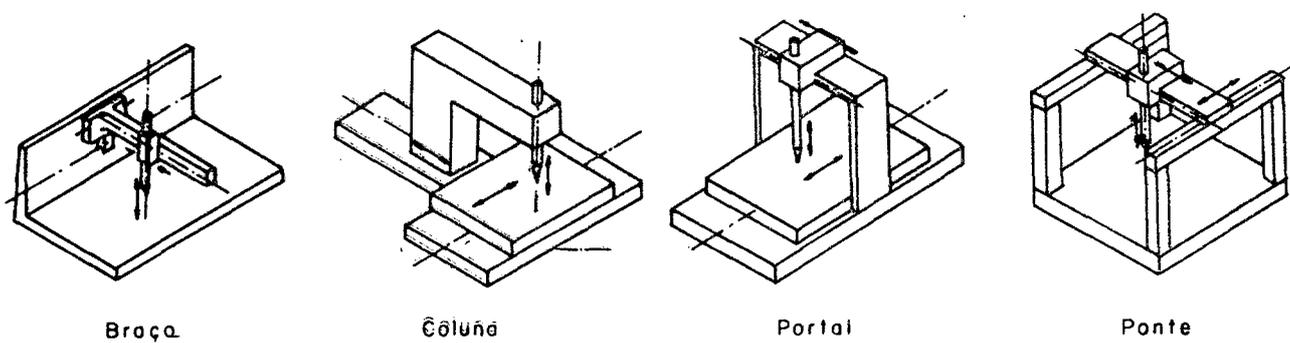


FIGURA 3 - Formas estruturais básicas das M3D.

da medição.

A M3D, tipo "coluna", da figura 3, adota um sistema misto de movimentação, deslocando tanto o apalpador quanto a mesa.

Para a movimentação do apalpador, a solução encontrada, para minimizar o efeito do peso sobre a estrutura, foi a de deslocar toda a coluna de sustentação. Com isto, no entanto, a medição efetuada por esta máquina fica susceptível ao posicionamento da coluna, além do posicionamento da mesa, isto é, influenciada pelas características das guias de deslizamentos de ambas.

Nota-se que, tanto este tipo de M3D, quanto a M3D tipo "braço", apresentam a vantagem da facilidade de posicionamento da peça dentro de seu campo de trabalho.

A M3D, tipo "portal", da figura 3, desloca tanto o apalpador quanto a mesa, para a medição. Este tipo de M3D, procura minimizar o efeito do peso do apalpador na medição, apoiando a viga de sustentação nas suas duas extremidades.

A M3D, tipo "ponte", da figura 3, mantém fixa a peça, medindo o deslocamento do apalpador em relação ao sistema de coordenadas. No entanto diferencia-se, das outras M3D, por ter uma estrutura para minimizar o efeito do posicionamento do apalpador dentro do sistema de coordenadas. Possui a desvantagem, tal como a M3D tipo "portal", de dificultar o posicionamento da peça, a ser mensurada, além da dificuldade de observação da forma geométrica de sua estrutura.

Diversos estudos tem sido feitos no sentido de determinar a melhor forma para as M3D. Tais comparações podem ser verificadas, por exemplo, em [2], que classifica as M3D quanto a sua forma estrutural principal, os seus elementos móveis e o posicionamento do sistema de medição.

É de grande importância conhecer as características da M3D em função de sua estrutura, principalmente nos projetos de adaptação, já que a qualidade de medição depende, a princípio, da forma estrutural da M3D; pois sendo a mesma projetada para medições de deslocamentos; qualquer deformação introduzida na estrutura, irá

afetar os resultados da medição.

1.3 - Fresadora mandriladora

A fresadora mandriladora (disponível no LABMETRO - UFSC), tem como principal função, executar as operações de fresamento e mandrilamento; tendo a capacidade de posicionar o objeto no plano de um sistema de coordenadas retangulares (x,y), possuindo movimentos angulares e lineares na direção z.

A fresadora mandriladora BKoE 315 x 500 [3], mostrada na figura 4 e em detalhes nas figuras 5 e 6, possui, ainda, as seguintes características:

- 1º) - Campo de trabalho da máquina
 - eixo x (l_{mx}) - 0 a 400 mm
 - eixo y (l_{my}) - 0 a 250 mm
 - eixo z (l_{mz}) - 0 a 500 mm
- 2º) - Superfície útil da mesa
 - 315 x 500 mm
- 3º) - Peso máximo admissível (peça)
 - 100 kg
- 4º) - Velocidade de deslocamento da mesa
 - 63/160/400/1000 mm/min
- 5º) - Mecanismos de movimento
 - a = deslocamento (eixo x)

A mesa movimentava-se na direção x, sobre as guias plana e v, apoiadas em rolôs cilíndricos, em banho de óleo.

Esta movimentação é transmitida por um fuso, localizado

na base da mesa, conforme figura 5 e figura 6.

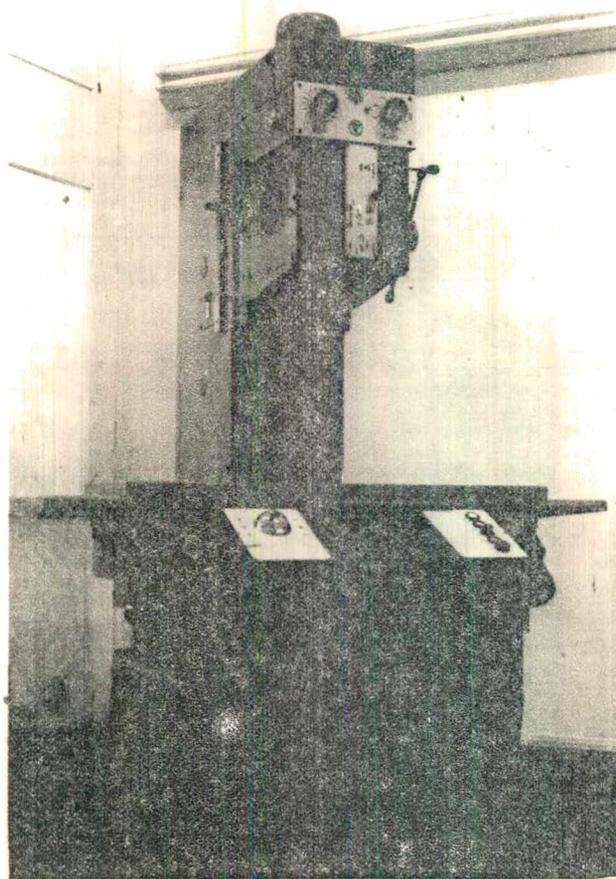


FIGURA 4 - Fresadora mandriladora.

(BKoE 315 x 500 VEB MIKROMAT DRESDEN)

b = deslocamento (eixo y)

Para o deslocamento da mesa na direção y, é movimentado todo o conjunto, mostrado na figura 6, sobre as guias plana e em v na direção y. Neste caso, movimenta-se tanto a mesa quanto a sua base de apoio. (figura 5).

A transmissão do movimento é executado por um outro fuso, ligado ao mesmo sistema motor do eixo x. A seleção de um ou outro movimento é feita por uma caixa de engrenagens, que controla, a-

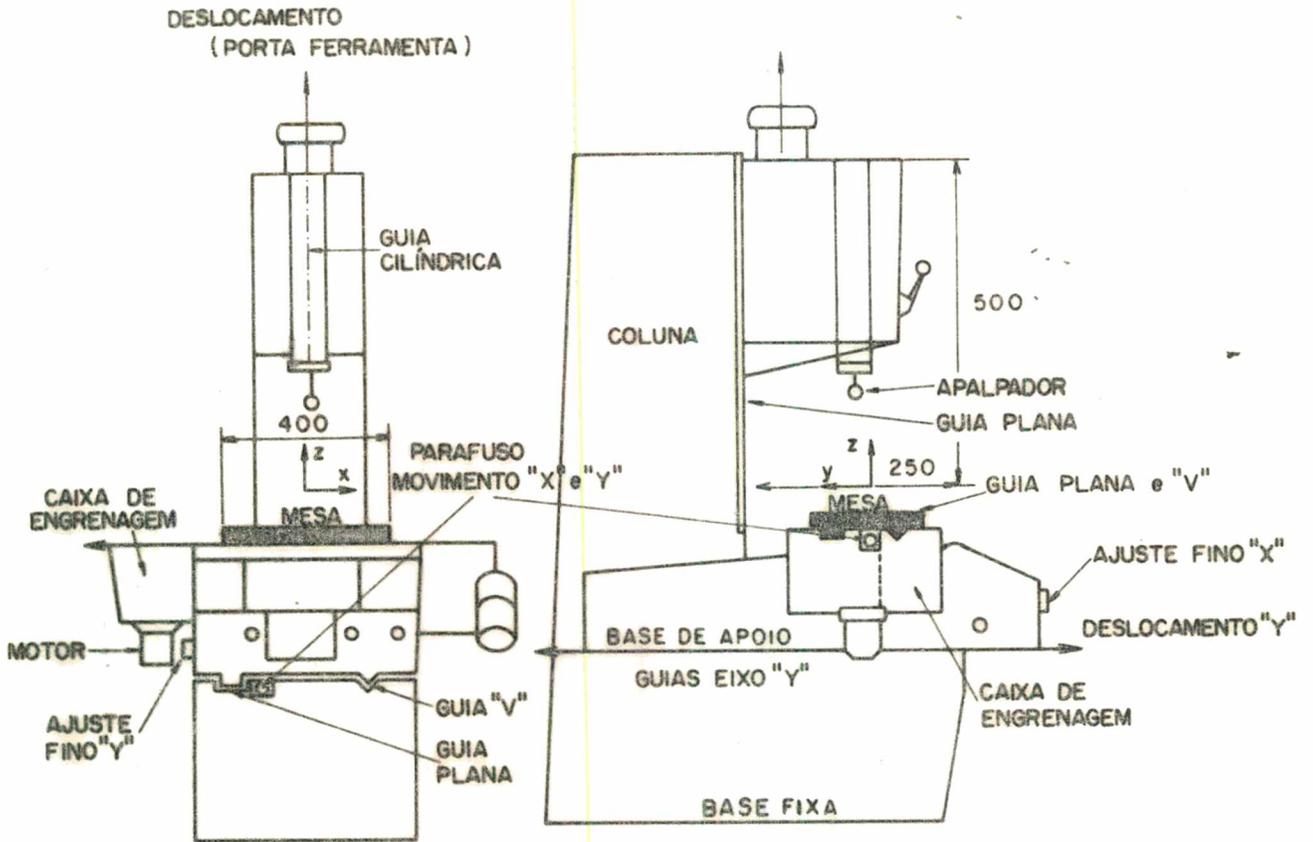


FIGURA 5 - Características da fresadora mandriladora.

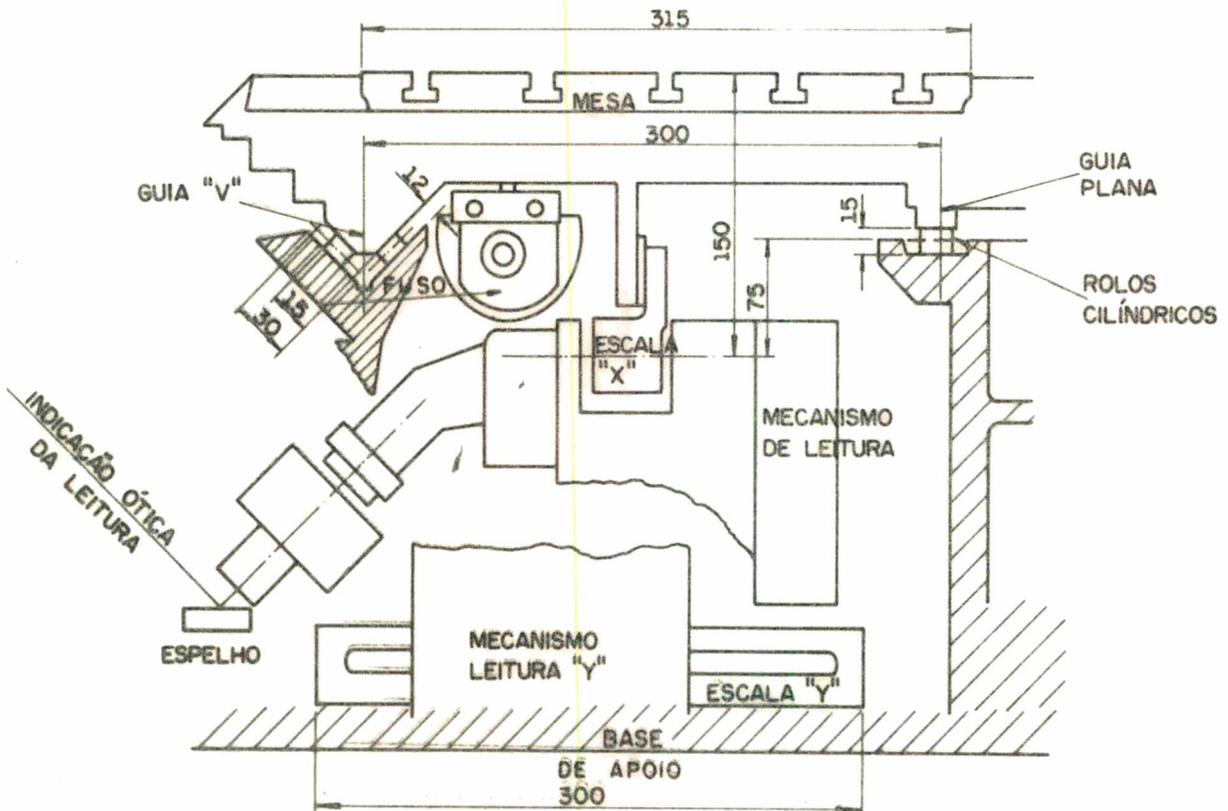


FIGURA 6 - Detalhes da fresadora mandriladora, plano "x", "y" e "z".

lêm disto, a velocidade.

Para os posicionamentos da ordem de 10^{-3} mm, utiliza-se uma manivela de ajuste fino, com acionamento manual (figura 5).

c - deslocamento (eixo z)

A movimentação no eixo z é feita independente do eixo x e y; através da movimentação da árvore e do eixo porta ferramenta (figura 5).

A árvore movimenta-se sobre as guias planas, rasqueteadas na própria coluna, com um curso de 400 mm, e, o eixo porta ferramenta, interna a uma guia cilíndrica no interior da árvore, movimenta-se com um curso de 100 mm.

6º) - Sistema de medição

a - eixos x e y (fig. 6)

O deslocamento da mesa na direção x, ou de sua base de assentamento na direção y, movimenta a escala, com graduações de 1 mm, em relação aos seus respectivos sistemas de leitura, sendo, os resultados, transmitidos óticamente até o visor por um conjunto de espelhos.

A resolução desta leitura é de $1\mu\text{m}$, e a precisão de posicionamento de $\pm 2\mu\text{m}$, sendo que este grau de resolução é obtido com o auxílio de um microscópio espiral, que permite, a interpolação da leitura da escala.

b - eixo z

Para o eixo z, a leitura é feita através de graduações milimétricas, contidas na escala posicionada lateralmente a árvore. Para menores resoluções, controla-se o deslocamento do eixo utilizando relógios comparadores.

As características especificadas acima, oferecem as considerações iniciais para a conversão de fresadora mandriladora como M3D. Entre elas:

1º) - A fresadora mandriladora apresentada é uma máquina

de precisão.

2º) - A semelhança da estrutura da fresadora mandriladora com a M3D, tipo coluna (fig. 3).

3º) - A forma estrutural, rígida, da máquina operatriz, própria para suportar esforços provenientes das operações de corte, além da flexibilidade de posicionamento da fresadora mandriladora foram consideradas como fatores positivos para a conversão.

4º) - A movimentação da mesa nas direções x e y, é um fator negativo para a futura M3D, já que o comportamento geométrico fica afetado pelo peso da peça atuando nos elementos de apoio e movimentação.

Com isto, verifica ser utilizável a estrutura da fresadora mandriladora, suas guias e seus elementos de movimento para a conversão proposta sendo que, o seu sistema de medição apresenta a limitação da impossibilidade de automatizar a aquisição de sua leitura.

1.4 - Objetivos do trabalho

Para a conversão de uma máquina ferramenta em uma M3D, diversas condições devem ser verificadas. Entre elas:

1º) - A possibilidade de medição com a adaptação de equipamentos complementares como apalpadores e escalas de medição.

2º) - A determinação dos erros apresentados pela máquina.

3º) - A automatização da obtenção das medidas (resultados).

Dentro deste contexto, visando contribuir para a conversão de uma fresadora mandriladora de precisão em uma M3D, este tra

balho analisa especificamente os seguintes ítems:

1º) - A definição do sistema de coordenadas com a instalação de escalas eletroópticas de medição.

2º) - A determinação da precisão geométrica da máquina.

3º) - A instalação de um controle que permita processar as leituras efetuadas.

4º) - A adaptação dos comandos da máquina para executar as novas operações.

CAPÍTULO II

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS SOBRE A PRECISÃO GEOMÉTRICA

2.1 - Erros dos movimentos

Considerando o deslocamento da mesa com a peça entre dois pontos; P1 de coordenadas x_0 , y_0 e z_0 , e P2 de coordenadas x_f , y_0 e z_0 , para um caso ideal, é registrada nas M3D a variação da coordenada: $(x_f - x_0)$.

No caso real, devido as irregularidades apresentadas, como por exemplo, por desgastes e deformações das guias e da mesa, surgirão variações nos valores das coordenadas, denominadas erros dos movimentos. Estes erros, estão vinculados aos 6 graus de liberdade de movimento apresentados por um corpo rígido no espaço, sendo três de rotação: ΔA , ΔB e ΔC em torno dos eixos x , y , e z , e, três de translação Δx , Δy e Δz , na forma indicada na figura 7.

2.2 - Erros de medição

Além dos graus de liberdade apresentados pela máquina, considerando que a M3D é um instrumento de medição de deslocamento, é de fundamental importância a análise dos erros que surgem no processo de medição; os chamados erros de medição.

O processo de medição com a M3D, na forma descrita no ítem 1.2, pode ser exemplificado pelo esquema da figura 8, que indica em corte (plano x, z), a medição do trecho b, sobre o eixo x.

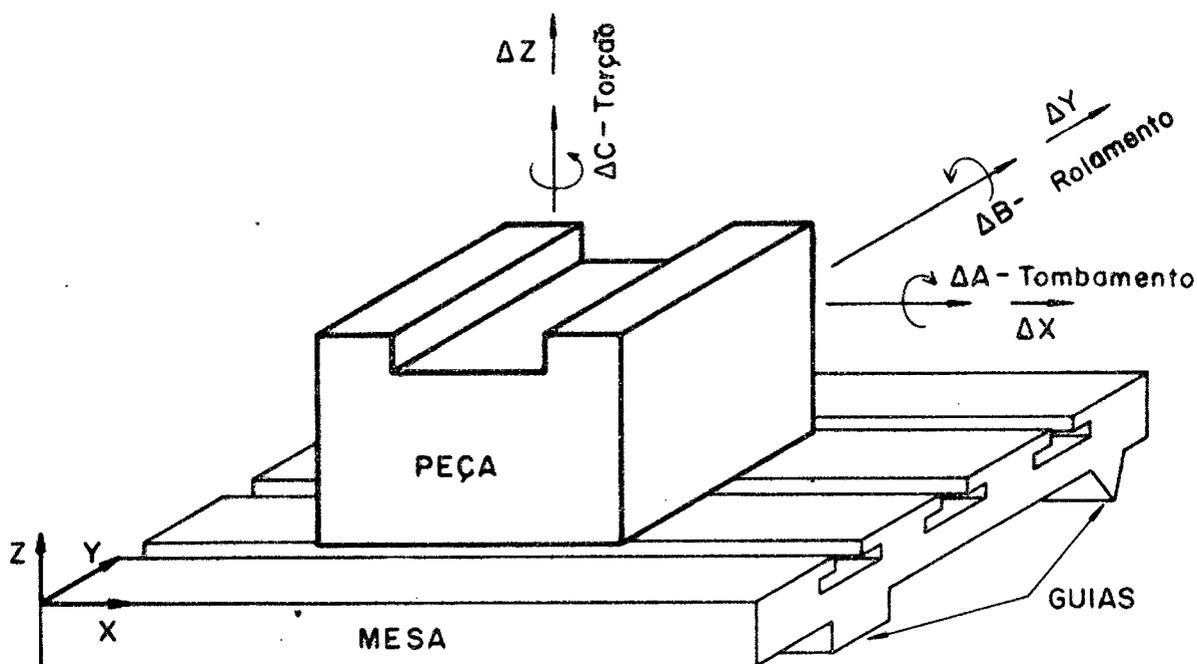


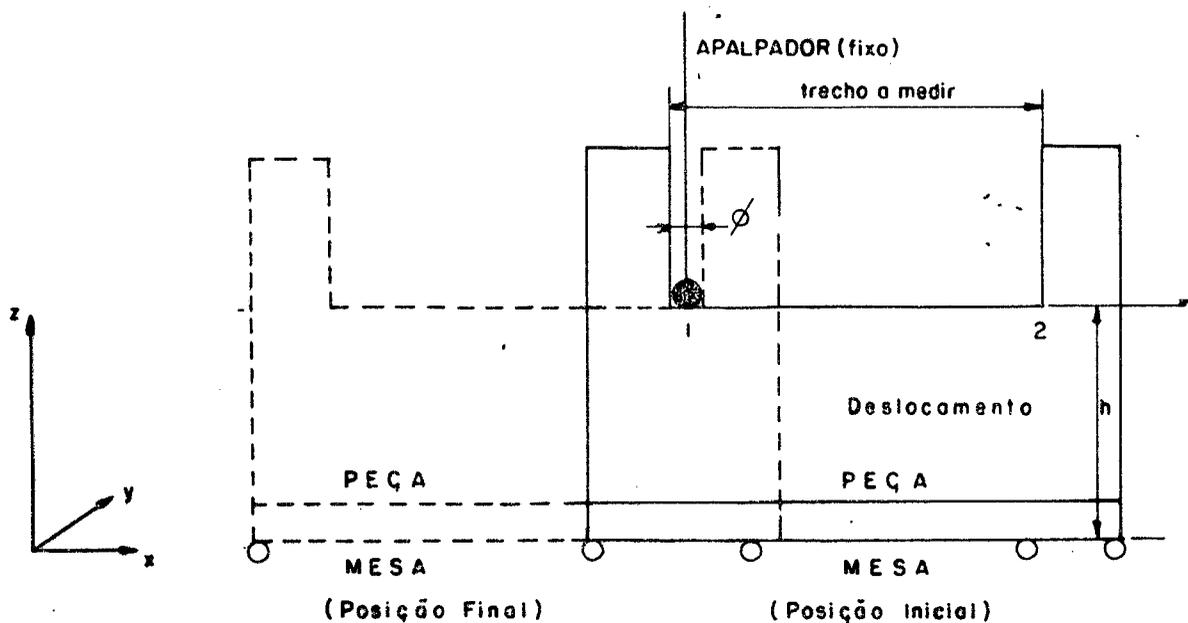
FIGURA 7 - Graus de liberdade de uma mesa e de uma peça no espaço tridimensional.

Nesta medição, o ponto 1 da peça é inicialmente colocado em contato com o apalpador (fixo) e desloca-se a peça até que o ponto 2 entre em contato com o apalpador.

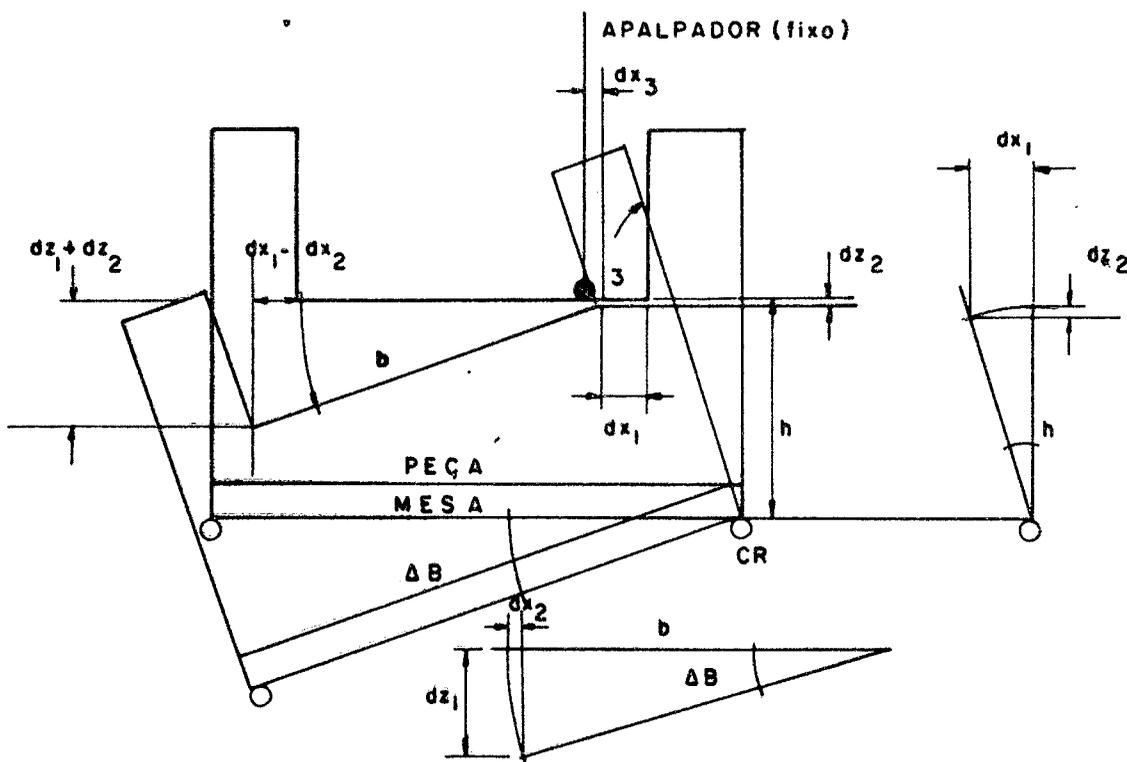
No caso ideal, figura 8a, este deslocamento corresponde a medição do trecho b, levando em consideração o diâmetro do apalpador.

No caso real, figura 8b, no entanto, devido as irregularidades dos apoios da mesa, surgirão os movimentos indesejáveis, exemplificado pela rotação ΔB , em torno de um centro de rotação CR.

Esta rotação influi na medição, modificando o contato final; do ponto 2 ideal para o ponto 3 real.



a - Processo de medição ideal.



b - Processo de medição com erro ΔB .

FIGURA 8 = Processos de medição do trecho b.

Esta modificação introduz erros no resultado final da medição do trecho b , na direção x , na forma:

$$b \text{ medido} = b + dx$$

$$dx = \sum_{i=1}^3 dx_i$$

Estando dx_1 , dx_2 e dx_3 indicados na figura 8b.

2.2.1 - Erros de medição de 1a. e 2a. ordem

Pela análise geométrica da figura 8b, obtém-se os erros de medição que surgem com o movimento ΔB , na forma:

$$dx = \sum_{x=1}^3 dx_i \quad \text{na direção } x, \text{ que influe no resultado da}$$

medição do trecho "b" e

$$dz = \sum_{i=1}^2 dz_i \quad \text{na direção } z.$$

Sendo

$$dx_1 = h \operatorname{sen} \Delta B$$

$$dz_1 = b \operatorname{sen} \Delta B$$

$$dx_2 = b - b \cos \Delta B$$

$$dz_2 = h - h \cos \Delta B$$

$$dx_3 = dz_2 \operatorname{sen} \Delta B$$

Desenvolvendo as funções trigonométricas em séries de Taylor:

$$dx_1 = h \Delta B = \frac{h \Delta B^3}{3!} + \frac{h \Delta B^5}{5!} - \frac{h \Delta B^7}{7!}$$

$$dz_1 = b \Delta B = \frac{b \Delta B^3}{3!} + \frac{b \Delta B^5}{5!} - \frac{b \Delta B^7}{7!}$$

$$dx_2 = \frac{b\Delta B^2}{2!} - \frac{b\Delta B^4}{4!} + \frac{b\Delta B^6}{6!}$$

$$dz_2 = \frac{h\Delta B^2}{2!} - \frac{h\Delta B^4}{4!} + \frac{h\Delta B^6}{6!}$$

$$dx_3 = dz_2 \cdot \Delta B - \frac{dz_2 \Delta B^3}{3!} + \frac{dz_2 \Delta B^5}{5!}$$

Considerando, além disto, que os ângulos apresentados pela movimentação são pequenos, (da ordem 2"), dx₂, dx₃ e dz₂, são termos de segunda ordem (b < 400 mm; ΔB ≅ 2"; resulta dx₂ < 0,1 μm) e, serão desprezados neste trabalho, restando:

$$\text{Erro na direção } x = dx = h\Delta B$$

$$\text{Erro na direção } z = dz = b\Delta B$$

que fornecem os valores dos erros de medição, em função do posicionamento do apalpador (h e b), em relação ao centro de rotação; e do erro de movimento angular ΔB.

Processos semelhantes podem ser feitos para os outros planos, determinando-se com isto, a influência da rotação sobre o erro de medição.

2.3 - Erro nas três direções com o movimento da mesa sobre um dos eixos

Considerando a importância da análise dos erros nas três direções, já que a M3D é uma máquina de medições de deslocamento em três direções, os erros de movimento e os erros de medição que ocorrem no processo de medição de uma das coordenadas da peça podem ser esquematizados na forma da figura 9 deste trabalho.

Nesta figura, a peça e a escala estão fixos na mesa () , enquanto o apalpador e o cabeçote estão fixos na base ().

Desloca-se a mesa para a medição da coordenada x e entre a posição inicial e final da peça surgem os erros de posicionamento dx_x , retilineidade dxy e dxz além dos erros de movimento angulares dAx , dBx e dCx que, no processo de medição, influirão nos resultados através dos erros:

$$dx(Bz)_x, dy(Cz)_x, dy(Az)_x \text{ etc.}$$

Nota-se que na parte inferior não foram indicados os erros de 2a. ordem ($dz(Bx)_x$, $dz(Ay)_x$ e $dx(Cy)_x$), desprezados neste trabalho.

A nomenclatura adotada para os erros torna-se mais complexa que a introduzia na figura 8, acrescentando além da direção do erro; os eixos de movimentação, o erro de movimento angular, causador do erro e a posição de medição. Com isto, tem-se:

$$dy_x \begin{array}{l} \text{movimento no eixo } x \\ \text{erro de movimento na direção do eixo } y \end{array}$$

$$dAx \begin{array}{l} \text{movimento no eixo } x \\ \text{erro de movimento } \Delta A \end{array}$$

$$dy(Az)_x \begin{array}{l} \text{movimento no eixo } x \\ \text{altura do plano de medição definida pela coordenada } z \\ \text{erro de movimento angular } \Delta A \\ \text{erro de influência do movimento } \Delta A \text{ na direção } y \end{array}$$

Para a determinação da precisão geométrica da máquina, todos os erros apresentados acima, com exceção dos erros de segunda ordem devem ser considerados, merecendo uma particular atenção

os erros de efeito, causados pelos movimentos angulares, que variam de amplitude conforme o plano de medição, influenciando tanto no posicionamento do sistema de medição de coordenadas, quanto na posição do apalpador dentro do sistema de coordenadas.

2.4 - Descrição geral dos erros para a movimentação da mesa nos 3 eixos

De modo geral, os erros que surgem no processo de medição, devido aos movimentos indesejáveis, podem ser classificados, segundo o quadro da figura 10, para a movimentação da mesa nas três direções. Para a movimentação da mesa sobre o eixo x, surgem os erros de natureza direta, e de efeito, como analisador no item anterior, repetindo-se o mesmo critério de nomenclatura para a movimentação sobre os outros eixos de movimento da M3D.

2.5 - Princípio de Abbe

Um dos princípios mais importantes na metrologia refere-se ao posicionamento do instrumento de medição (escala) em relação ao trecho de medição, assim enunciado por Abbe:

"O padrão deve constituir um prolongamento retilíneo do trecho a medir".

Esta colinearidade é de grande importância, devido aos movimentos angulares que introduzem erros na medição que consiste na diferença entre o deslocamento do apalpador e do cabeçote de leitura da escala.

Exemplificando na figura 9, o posicionamento ideal da es-

		DESLOCAMENTO EIXO "X"		DESLOCAMENTO EIXO "Y"		DESLOCAMENTO EIXO "Z"	
E	L I N E A R	"X"	POSIC dxx	RETIL dxy	RETIL dxz		
		"Y"	RETIL dyx	POSIC dyy	RETIL dyz		
		"Z"	RETIL dzx	RETIL dzy	POSIC dzz		
R	A N G U L A R	"X"	dAx dy(Az)x dz(Ay)x	dAy dy(Az)y dz(Ay)y	dAz dy(Az)z dz(Ay)z		
		"Y"	dBx dx(Bz)x dz(Bx)x	dBy dx(Bz)y dz(Bx)y	dBz dx(Bz)z dz(Bx)z		
O		"Z"	dCx dx(Cy)x dy(Cx)x	dCy dx(Cy)y dy(Cx)y	dCz dx(Cy)z dy(Cx)z		
			direto	direto	direto	direto	efeito

FIGURA 10 - Classificação dos erros de medição.

cala \bar{e} representado pela posição 2 do instrumento de medição.

No entanto, esta colinearidade não pode ser mantida simultaneamente para as três direções de medição devido aos elementos estruturais da M3D bem como a própria peça a medir.

Com isto, posicionando-se o instrumento, por exemplo em 1, onde o trecho a medir dista de " ℓ " do instrumento de medição, o erro de Abbe é dado por:

$$dx(Bz)x = \ell \operatorname{sen} dBx$$

que desenvolvido em série de Taylor fornece:

$$dx(Bz)x = dBx - \frac{\ell dBx^3}{3!} + \frac{\ell dBx^5}{5!}$$

que desprezado os termos de 2a. ordem fica:

$$dx(Bz)x = \ell \cdot dBx$$

2.6 - Determinação analítica dos erros de medição

Como verificado, o princípio de Abbe não pode ser obedecido simultaneamente para a medição nos três eixos da M3D.

Com isto, os erros de medição (ou de efeito) não podem ser eliminados apenas pelo posicionamento adequado dos instrumentos de medição, tornando-se por conseguinte, necessário determiná-los, dentro de todo o campo de trabalho da M3D.

O método descrito a seguir [2], propõe descrever os erros de medição da máquina, de forma analítica, relacionando-os com as grandezas físicas características da M3D e com o erro angular.

Para a determinação dos erros, este método supõe diversas condições; enumeradas a seguir:

1º) - Os apoios (da mesa ou do apalpador), são considerados ideais. Isto é, apoios em três pontos conhecidos, sendo a distância entre estes pontos também conhecidos.

2º) - O comprimento máximo entre o local da medição à guia e ao instrumento de medição, são conhecidos.

3º) - As dimensões máximas, do campo de trabalho, são conhecidas.

Estas suposições foram feitas no sentido de idealizar uma M3D e, determinar a qualidade da máquina em relação ao posicionamento da guia e dos instrumentos de medição, representados pelos seguintes valores:

1 - Tolerância de retitude g.

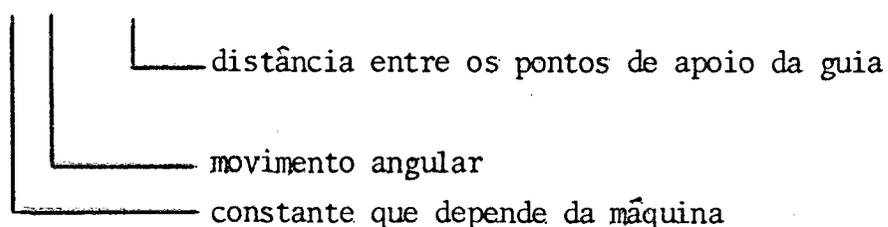
Exemplo: g_{xB} - Tolerância de retitude quando do deslocamento sobre o eixo x e movimento angular d_{Bx} .

A tolerância de retitude g, representa a relação entre o movimento angular e a distância entre os pontos de apoios da mesa na forma:

$$g_{xB} = C. \sin d_{Bx} . l_{fxB}$$

desenvolvendo a função trigonométrica em séries e considerando somente o 1º termo:

$$g_{xB} = C. d_{Bx} . l_{fxB}$$



2 - Distância entre os pontos de apoio da guia

Exemplo: l_{fxB} = comprimento entre os pontos de apoio quando do movimento sobre o eixo x e com erro de movimento dB.

- 3 - Distância máxima da linha de medição (trecho percorrido pelo apalpador), ao sistema de medição (escala)

Exemplo: $a_{mx}B_z$ - comprimento a_m , quando do movimento sobre o eixo x , com erro de movimento δB e, direção do comprimento z .

- 4 - Distância máxima da linha de medição à guia

Exemplo: $a_{lx}B_z$ - distância a_l , quando do movimento sobre o eixo x , com erro de movimento δB e, direção da distância da do por z .

Estas grandezas, que podem ser visualizadas nos planos do campo de trabalho definidos por l_{mx} , l_{my} e l_{mz} da figura 11, são utilizadas nas equações da figura 12, que, descrevem os erros de medição (linear) em função dos erros de movimento (angular).

Verifica-se o estreito relacionamento entre o método analítico, o esquema da figura 9 e os erros considerados no item 2.2, quanto aos erros e as dimensões características do processo de medição. Entre elas:

1º) - A mesma nomenclatura adotada para os erros de efeito do movimento angular ($dy(Az)_x$, $dz(Az)_x$, etc.).

2º) - A semelhança da nomenclatura adotada para os erros angulares, somente que no método analisado, os erros angulares foram representados pelas relações g_{xB}/l_{fxb} , g_{xA}/l_{fxA} e g_{xC}/l_{fxc} entre a tolerância de retilidade e, a distância l_f entre os pontos de apoio da guia, supostos conhecidos.

3º) - A relevância do posicionamento da escala, em relação a linha de medição, na forma do termo a_m (considerando o princípio de Abbe), correspondendo a altura h da equação do item 2.2.

4º) - A semelhante consideração para o posicionamento da guia, na forma do termo a_l (supondo a localização do centro de rotação sobre a guia), que na equação do item 2.2 é representado pelo trecho de medição b .

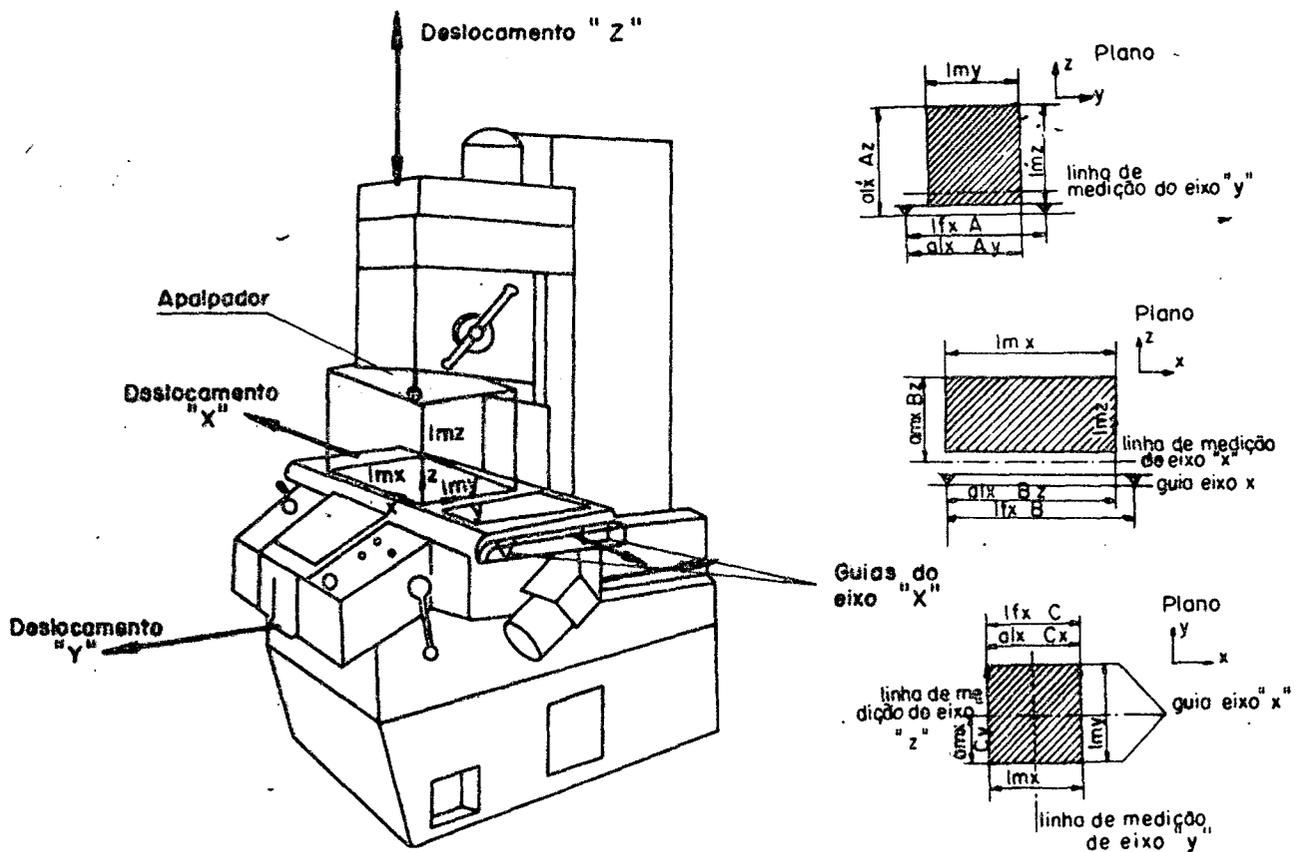


FIGURA 11 - Grandezas envolvidas no cálculo do erro considerando o movimento sobre a guia "x".

$$dy(Az)_x = \frac{g_{xA}}{l_{fxA}} al_{xAz}$$

$$dz(Bx)_x = \frac{g_{xB}}{l_{fxB}} al_{xBz}$$

$$dz(Az)_x = \frac{g_{xA}}{l_{fxA}} al_{xAy}$$

$$dx(Cy)_x = \frac{g_{xC}}{l_{fxC}} am_{xCy}$$

$$dx(Bz)_x = \frac{g_{xB}}{l_{fxB}} am_{xBz}$$

$$dy(Cx)_x = \frac{g_{xC}}{l_{fxC}} al_{xCx}$$

FIGURA 12 - Equações de relacionamento entre os erros e as grandezas físicas.

CAPÍTULO III

ADAPTAÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE MEDIÇÕES DE COORDENADAS

3.1 - Sistemas de medições de deslocamento

O sistema de medição escolhido para a medição dos deslocamentos e indicação das coordenadas, nos três eixos, foi o eletroóptico digital incremental [4], devido a possibilidade de automatizar as medidas para o seu processamento. Este sistema apresenta, além disto, a vantagem de medir deslocamentos da ordem de 10^4 mm e resoluções menores que 10^{-3} mm.

A escala eletroótica digital é composta basicamente de uma fonte emissora de luz, uma lente condensadora, uma escala móvel com grades, uma escala fixa e de um conjunto de fotocélulas, como pode ser verificado pelo esquema da figura 13.

A fonte emite uma luz, que é colimada pela lente. A luz, após passar pelas grades da escala móvel e pelas grades da escala fixa, atinge a fotocélula gerando um sinal elétrico.

A escala móvel, contém duas séries de grades; a primeira com passos de $20\mu\text{m}$, utilizadas para a medição do deslocamento, colocadas na figura 13, na parte superior da escala; e a segunda utilizada para a marcação da referência da escala, posicionada na parte inferior da escala.

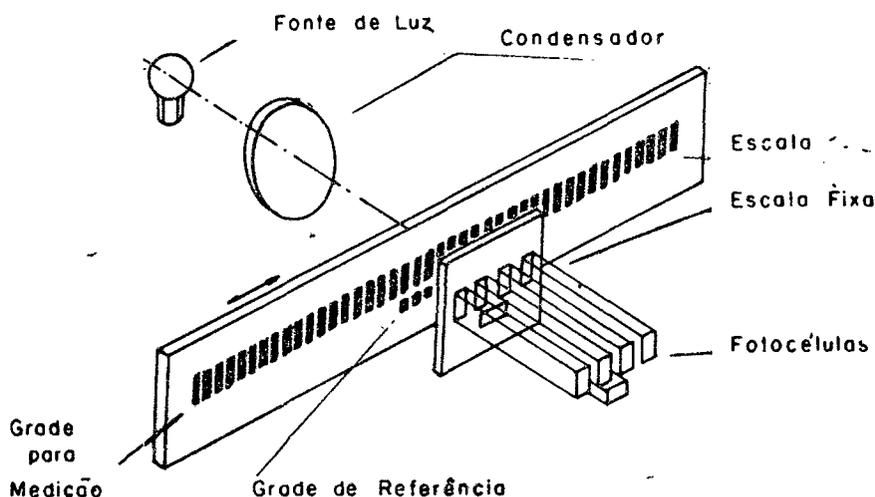


FIGURA 13 - Esquema de funcionamento do sistema eletroótico digital incremental de medições de deslocamento.

A escala fixa, neste exemplo da figura 13, possui 4 grades verticais e uma grade posicionada na horizontal.

As dimensões destas grades coincidem com as das grades da escala móvel.

Com o deslocamento da escala móvel em relação a escala fixa, a fotocélula recebe mais ou menos luz, sendo este efeito utilizado para: medição do deslocamento, interpolação destas medidas além da determinação do sentido do deslocamento.

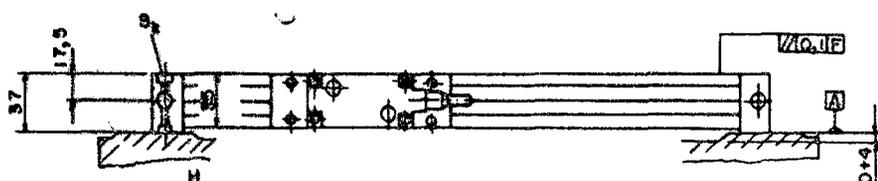
Além disto, a grade horizontal é utilizada para a determinação de uma marca de referência para a posição da escala.

Os pulsos emitidos pela fotocélula, são captados em um contador que fornece, digitalmente, após uma análise e nova interpolação (melhorando a resolução até a ordem de $10^{-1} \mu\text{m}$), o valor do deslocamento, seu sentido e a posição de referência da régua.

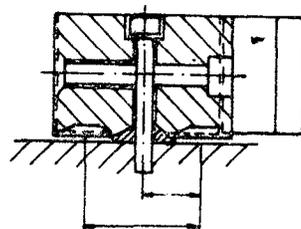
No sistema escolhido [5], a escala fica embutida em uma caixa vedada e todos os outros elementos localizados no cabeçote de leitura:

Todo este conjunto é fixo segundo as recomendações forne-

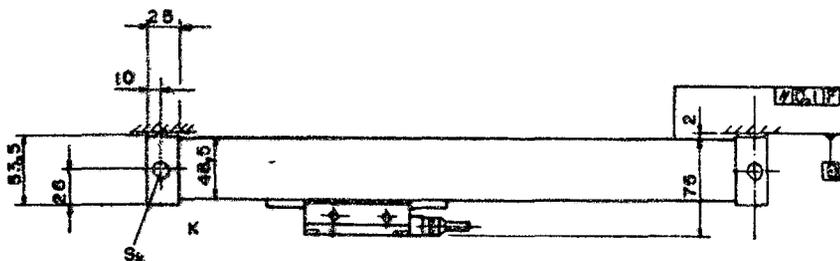
cidas pelo fabricante [5], tais como: - posicionamento da escala em relação a máquina; fixação da escala no elemento móvel; fixação do cabeçote na base fixa; conexões, fornecidas pelo fabricante, entre o cabeçote e o contador de pulsos; e a preparação da superfície para a fixação.



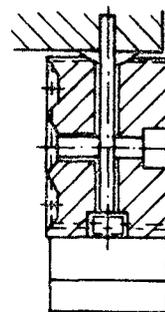
a - posicionamento lateral (F= Guia)



b = Detalhes da fixação da escala na posição horizontal



c - posicionamento vertical (F = Guia)



d = Detalhes da fixação da escala na posição vertical

FIGURA 14 - Posicionamento e fixação da escala eletroótica.

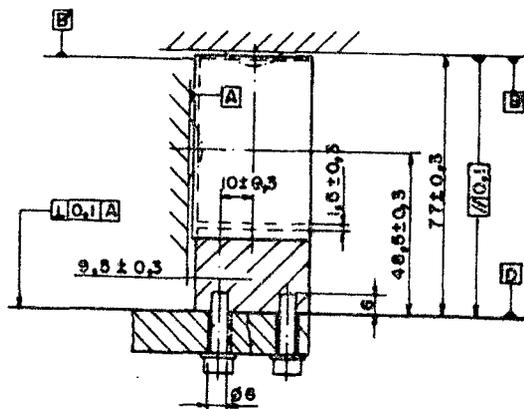
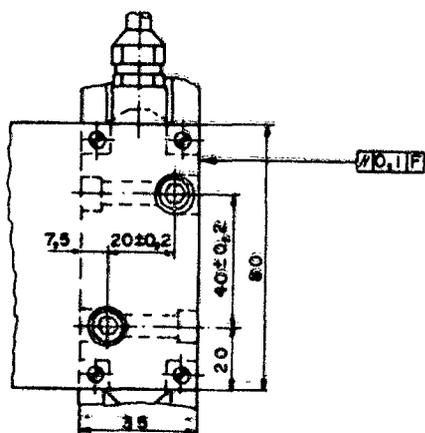


FIGURA 15 = Recomendações para a fixação do cabeçote (F = Guia).

As figuras 14 e 15 trazem as informações adicionais para a fixação da escala e do cabeçote.

Na figura 14, verifica-se as recomendações de paralelismos (\parallel ; 0,1; F) entre a escala e a superfície da guia bem como as recomendações de sua fixação nas extremidades, segundo os detalhes da figura 14 (b), para a posição horizontal da escala e, para a posição vertical da escala, são fornecidas recomendações semelhantes pela figura 14, (c) e (d).

Para a fixação do cabeçote, foram seguidas as recomendações, fornecidas na figura 15, principalmente no que se refere ao paralelismo de sua superfície em relação as guias da máquina, (\parallel ; 01; F) e em relação a escala (\parallel ; 0,1; A).

As escalas eletroópticas selecionadas, HEINDENHEIN 5041, apresentam ainda as seguintes características:

- 1º) - escala de vidro
- 2º) - graduações da escala - 20 μ m
- 3º) - velocidade máxima de deslocamento relativo entre a escala e o cabeçote 3 m/min (para uma resolução de 1 μ m)
- 4º) - aceleração máxima - 30 m/s²
- 5º) - erros sistemáticos - (gráficos anexos) faixa de \pm 5 μ
- 6º) - temperatura permissível de funcionamento (-20.C a 70.C)
- 7º) - peso - 0,7 kg + 2 kg/m de comprimento
- 8º) - vedação da caixa - DIN 40050
- 9º) - vida útil - 100 000 horas

3.2 - Localização do sistema de medição de deslocamento

Para a definição da posição do sistema de medição da M3D,

com a fixação dos instrumentos selecionados, foram considerados os requisitos de posicionamento colinear da escala com a linha de medição e algumas restrições, como a manutenção das características da máquina ferramenta e do sistema de medição ótico existente.

Os principais locais possíveis de fixação, estão indicados na figura 16 e a análise de cada uma destas posições está apresentada a seguir.

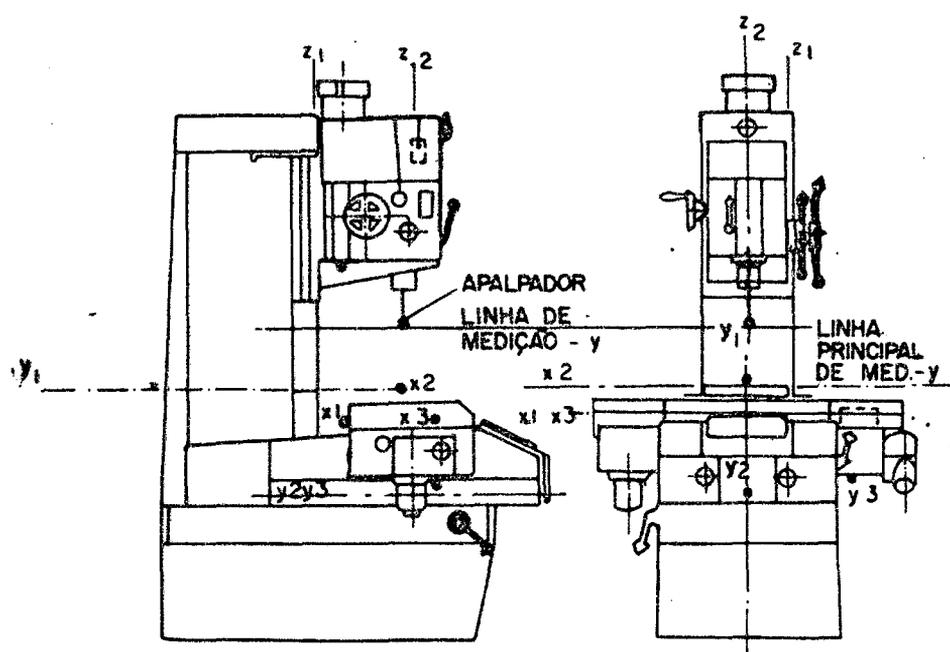


FIGURA 16 - Localizações possíveis do sistema de medição.

A posição X1, apresenta a vantagem da facilidade de fixação da escala e do cabeçote. No entanto, sua localização é desfavorável devido a grande distância que a separa da linha principal de medição.

A posição X2, apresenta a vantagem da localização da escala, mais próxima possível do apalpador. Neste caso, é necessária a construção de uma estrutura de sustentação para o cabeçote e de uma nova mesa, para localizar a peça dentro do campo de trabalho da máquina.

A posição X3, tem características semelhantes da posição X2, situando-se sob a mesa existente. No entanto, apresenta a desvantagem da retirada do sistema ótico original.

Para o eixo y, a posição y1 é uma localização favorável da escala, possibilitando inclusive a observação do princípio de Abbe, em determinada linha de medição. Para esta posição necessita-se de uma estrutura para a sustentação da escala e do cabeçote.

A posição Y2, com a escala posicionada no corpo da máquina, apresenta a grande desvantagem da retirada do sistema ótico de medição.

A posição Y3, apresenta a simplicidade de fixação da escala, porém a sua localização é desfavorável devido a grande distância que a separa da linha de medição.

A estrutura da máquina permite, para o eixo z, duas opções principais. A primeira posição Z1, apresenta a simplicidade de fixação da escala e do cabeçote como vantagem, no entanto, esta posição, não possibilita o registro de todos os movimentos.

A segunda posição, Z2, apresenta uma localização favorável da escala, já que ela fica colinear ao apalpador, sendo necessária, neste caso, a construção de uma estrutura de sustentação para a escala e o cabeçote.

Dentre as possibilidades apresentadas, foram escolhidas, principalmente, devido a observação do princípio de Abbe e a manutenção do sistema de medição existente, as seguintes localizações.

eixo x - localização X2
eixo y - localização Y1
eixo z - localização Z2

Para a fixação das escalas eletroópticas nestes locais, foram desenvolvidos os projetos adequados detalhados a seguir, no ítem 3.3.

3.3 - Diretrizes do projeto

No projeto dos elementos de fixação das escalas eletro^oticas e dos respectivos cabeçotes, foram considerados os seguintes fatores comuns aos 3 eixos do sistema de coordenadas:

1º) - Preparação da superfície, livre de pintura, para fixação da escala e do cabeçote;

2º) - Tolerâncias de paralelismo, entre a guia e a superfície de fixação da escala e do cabeçote, segundo as figuras 14 e 15;

3º) - Sequência de fixação escala e cabeçote. Remoções das proteções além da correta aplicação da força de fixação;

4º) - Eliminação do efeito de temperatura, sobre a geometria da estrutura, utilizando vigas simplesmente engastadas. Na outra extremidade foram utilizados sistemas de molas de chapas, deixando-se um grau de liberdade para a movimentação da viga, com a variação da temperatura;

5º) - Utilização de materiais de formas simples; vigas L para a sustentação da escala y; viga U para o apoio transversal da escala y; cantoneiras para apoio do cabeçote x (figura 17);

6º) - Redução das áreas e pontos de ajuste fino, facilitando as operações de usinagem. Para a ajustagem, foram utilizados os elementos da figura 18;

7º) - Operações de usinagens simples, possibilitando a sua execução em oficinas de pequeno porte.

Para facilitar a compreensão do desenvolvimento deste item, dividiu-se em sub-itens correspondentes aos 3 eixos cartesianos, onde são citadas as peculiaridades de cada estrutura:

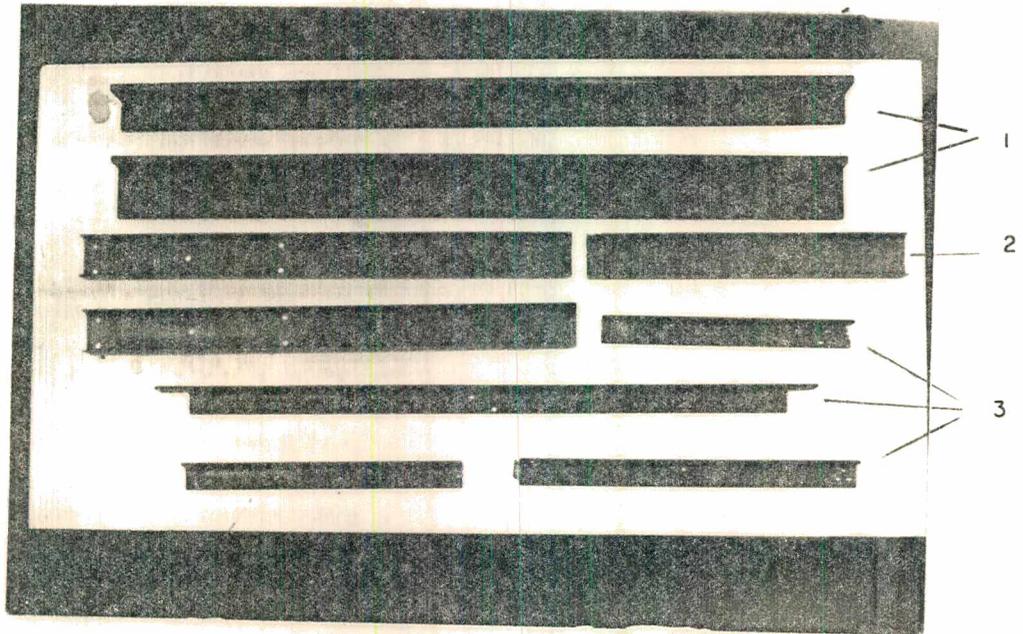


FIGURA 17 - Elementos estruturais utilizados na fixação.
1 - Vigas L, para escala y; 2 - Vigas U, para escala y; 3 - Cantoneiras para o cabeçote x.

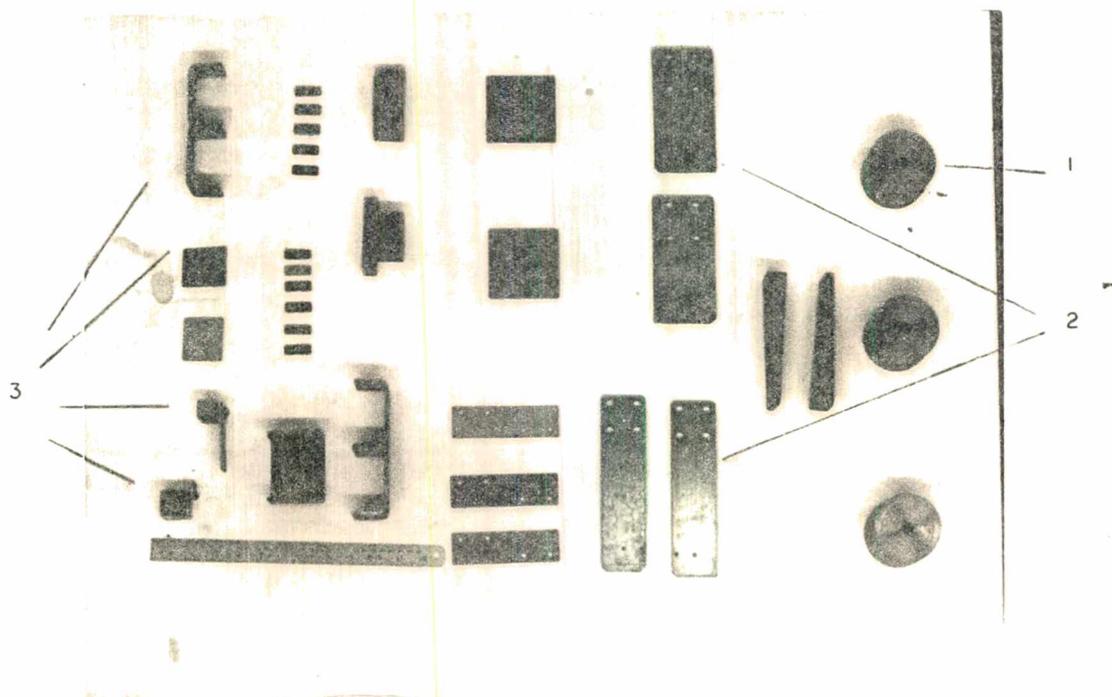


FIGURA 18 - Elementos de ajustagem utilizados na fixação.
 1 - Base de sustentação para a chapa-nova mesa;
 2 - Elementos de fixação das cantoneiras do eixo X;
 3 - Diversos elementos de ajustagem.

3.3.1 - Características da adaptação da escala no eixo x

A escala, foi presa na mesa de trabalho, e o cabeçote de leitura preso na base da máquina (fig. 19). Observa-se pela figura, que a escala fica localizada no centro e na parte superior da mesa, sendo necessária a construção de uma nova mesa (chapa de 250 x 400 mm), para posicionar a peça dentro do campo de trabalho.

O cabeçote por sua vez, está fixo a uma viga posicionada na direção do deslocamento, a fim de minimizar o efeito da força de atrito entre a escala e o cabeçote, sobre a estrutura, quando houver um deslocamento relativo.

O instrumento de medição utilizado (NR 8006 D006) tem o comprimento útil de medição de 420 mm.

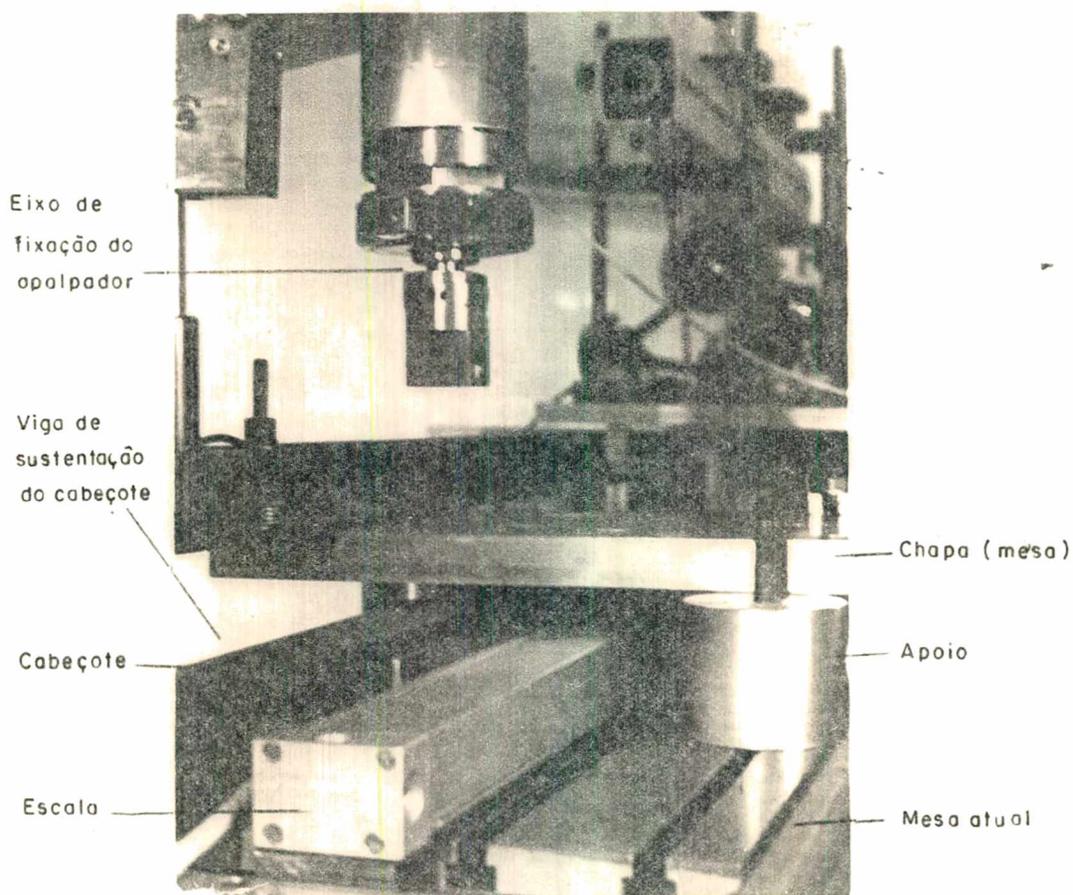


FIGURA 19 - Posicionamento da escala para o eixo x.

3.3.2 - Características da adaptação da escala no eixo y

Para o eixo y, a escala fica localizada na parte posterior da máquina, sobre uma armação fixa a base de movimento do eixo y, e o cabeçote, fixo à coluna da fresadora mandriladora, como pode ser observado na figura 20.

Particularmente, para o eixo y, a escala foi colocada em um plano, acima do nível da mesa, possibilitando com isto, a manutenção da colinearidade entre a escala e o apalpador, em determinada posição da escala (nível "no" colinear a escala), conforme figura 21.

O instrumento de medição utilizado (NR 7799 D003), tem o comprimento útil de medição de 270 mm.

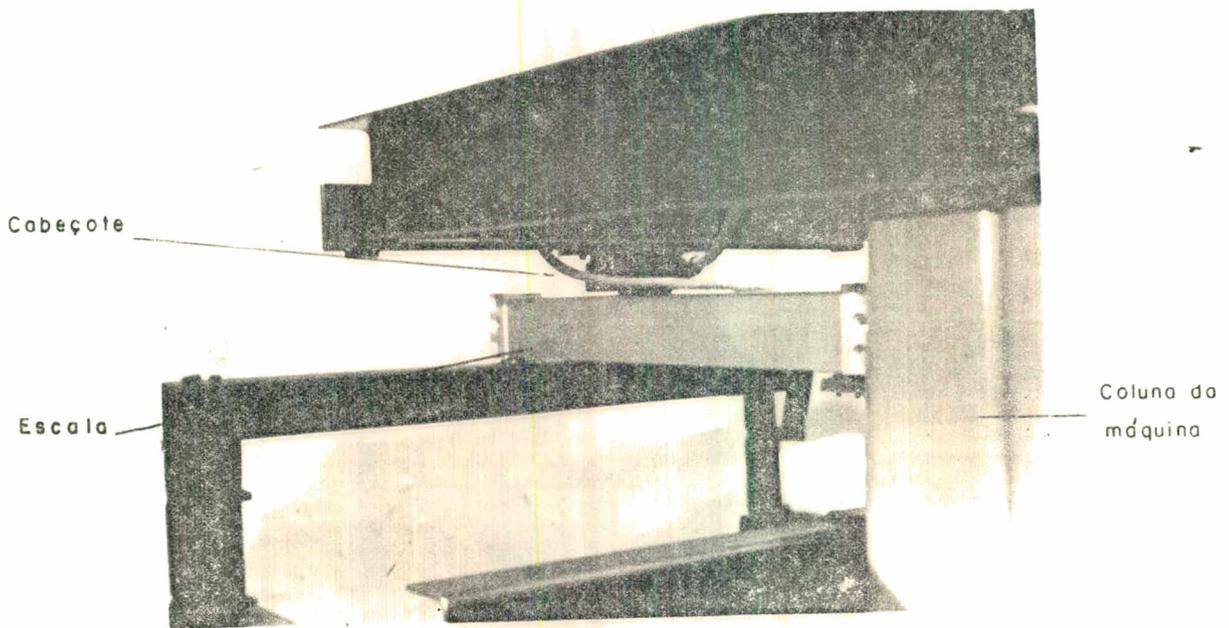


FIGURA 20 - Posicionamento da escala no eixo "y".

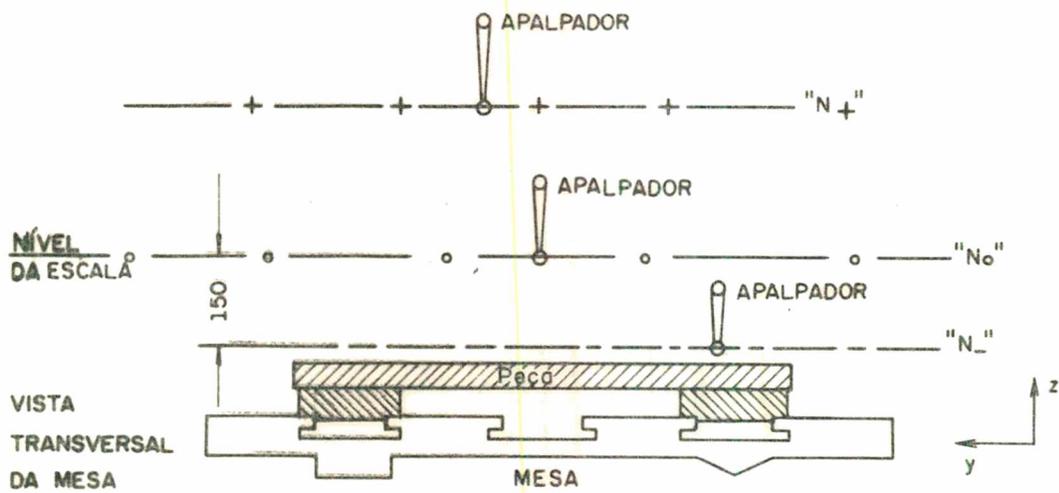


FIGURA 21 - Variação positiva ou negativa do nível do apalpador em relação ao nível da escala.

3.3.3 - Características da adaptação na escala no eixo "z"

O projeto de fixação da escala para o eixo "z", foi detalhadamente elaborado e, o aspecto geral da montagem pode ser observado na figura 22.

O instrumento de medição disponível tem o número de série de identificação, NR 7050 DQ07, com comprimento útil de medição de 470 mm.

Nesta figura, o cabeçote (2), está fixo na estrutura (3), que por sua vez está fixo na coluna da máquina.

A escala (1), está fixo nas barras transversais (4), que a sustentam, e que deslizam nas guias (5), fixas à base de sustentação (6), quando solicitado pelo elemento (7).

Quando o eixo da ferramenta se desloca, ele movimenta o contato (7), preso nas barras (4), movimentando somente a escala, deslizando as barras (4), sobre as guias (5), em relação ao cabeçote fixo.

Com esta estrutura é possível detectar tanto o movimento do eixo, através do elemento (7), como também da árvore porta ferramenta, através do deslocamento de todo o conjunto, em relação a estrutura (3).

A construção desta estrutura, bem como a análise do seu comportamento, não foi realizada neste trabalho e oferece sugestões para futuros estudos(*).

(*] Os detalhes deste projeto estão arquivados no LABMETRO - UFSC.

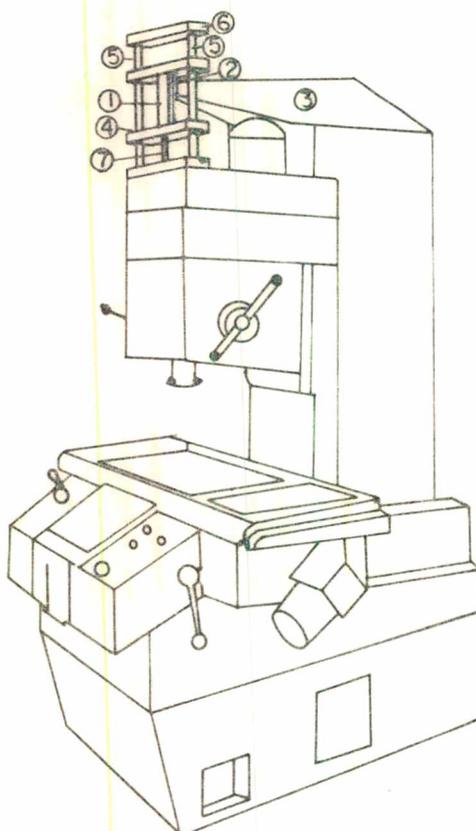
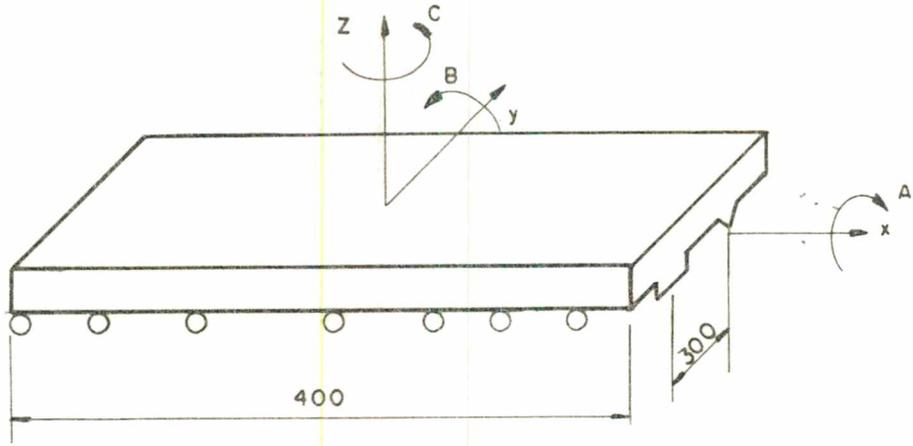


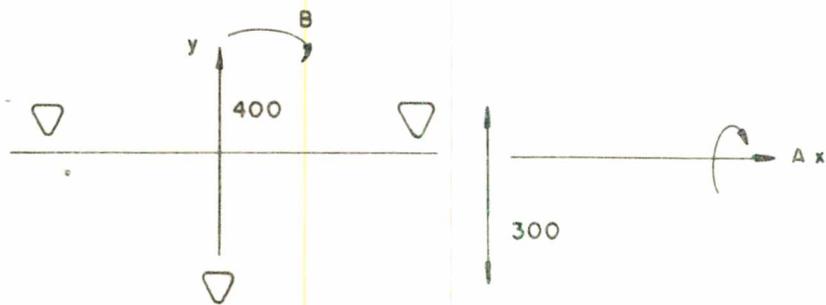
FIGURA 22 - Vista em conjunto dos elementos projetados para a fixação da escala e do cabeçote para o eixo "z". 1 - Escala; 2 - Cabeçote; 3 - Sustentação do cabeçote; 4 - Sustentação da escala; 5 - Guias; 6 - Base de sustentação para a escala e guias; 7 - Contato ferramenta / escala.

3.4 - Definição das principais grandezas geométricas

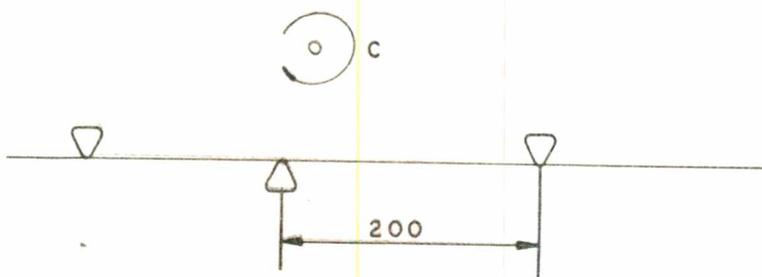
Determinado o sistema de medição de coordenadas, ficam de finidas as principais grandezas físicas características da M3D, necessárias para a determinação da precisão geométrica da medição na forma exposta no item 2.6, deste trabalho.



a - Movimentos A, B e C e vínculos.



b - Vínculos aos movimentos A e B.



c = Vínculos ao movimento C.

FIGURA 23 = (Pontos de apoio) vínculos ao movimento.

M3D - tipo COLUNA

Elemento de Movimento:

eixo x - mesa
 eixo y - mesa
 eixo z - suporte + cabeçote

Campo de trabalho da M3D nas respectivas direções

$l_{mx} = 400 \text{ mm}$
 $l_{my} = 250 \text{ mm}$
 $l_{mz} = 400 \text{ mm}$

Outras grandezas características para o caso da movimentação sobre o eixo x.

Distância máxima do plano de medição (apalpador) ao sistema de medição (escala).

$amxBz = 450 \text{ mm}$
 $amxCy = 125 \text{ mm}$

Distância máxima do plano de medição (apalpador) a guia.

$alxAz = 550 \text{ mm}$
 $alxAy = 250 \text{ mm}$
 $alxBz = 400 \text{ mm}$
 $alxCx = 400 \text{ mm}$

Distância entre os pontos de apoio da guia (considerando-os ideais), 3 pontos de apoio (figura 23).

$l_{fxA} = 300 \text{ mm}$ - (Distância entre a guia plana e a guia V do eixo x)
 $l_{fxB} = 400 \text{ mm}$ - (Distância do trecho da mesa apoiado nos rolos cilíndricos do eixo x)
 $l_{fxC} = 200 \text{ mm}$ - (Distância entre os apoios para vincular o movimento C)

Outrossim, outras características foram mantidas, idênticas as da máquina operatriz.

Baseadas nestas informações, ficam as equações da figura 12, assim enunciadas:

$$dy(Az)_x = g_{xA} \frac{550}{250} = 2,2 g_{xA}$$

$$dz(Ay)_x = g_{xA} \frac{250}{250} = 1,0 g_{xA}$$

$$dx(Bz)_x = g_{xB} \frac{450}{400} = 1,1 g_{xB}$$

$$dz(Bx)_x = g_{xB} \frac{400}{400} = 1,0 g_{xB}$$

$$dx(Cy)_x = g_{xC} \frac{125}{400} = 0,3 g_{xC}$$

$$dy(Cx)_x = g_{xC} \frac{400}{400} = 1,0 g_{xC}$$

Com isto, obtêm-se os valores máximos do grau de influência do erro de movimento sobre os erros de medição.

CAPÍTULO IV

MEDIÇÃO DOS ERROS

4.1 - Objetivos da medição

A medição dos erros de movimento e a determinação dos erros de medição, descrito no quadro da figura 10, constituem o objetivo principal da metodologia desenvolvida em função da natureza dos erros e das peculiaridades dos transdutores indicadores dos erros.

Para isto, o processo de medição dos erros foi dividido em quatro grupos, assim constituídos:

- a) - medição do erro de posicionamento
- b) - medição do erro de reticidade
- c) - medição do erro angular (direto)
- d) - determinação do erro angular pela medição do erro de posicionamento e reticidade em dois planos.

O erro de posicionamento é a componente linear do erro na direção do deslocamento. Ele corresponde a diferença entre o deslocamento indicado pelo sistema de medição da M3D e o deslocamento padrão efetivo.

Os detalhes da medição do erro de posicionamento, exemplificado para o eixo x estão expressos no item 4.1.1 deste trabalho.

Os erros de reticidade são as componentes lineares dos

erros nas direções ortogonais ao deslocamento.

Para a sua medição, são empregados padrões de retilinearidade, ressaltando que os transdutores são característicos para a medição de pequenos movimentos (10^{-2} mm).

Os detalhes desta metodologia estão descritos no item 4.1.2 deste capítulo.

O processo de medição do erro angular foi dividido em dois métodos distintos que compõem os dois últimos grupos descritos acima. O primeiro que consiste na medição dos ângulos de tombamento, rolamento e torção sobre os três eixos ortogonais através dos transdutores indicadores de ângulos e o segundo que consiste na determinação dos ângulos através da medição dos efeitos causados pelos mesmos sobre o erro de posicionamento e de retilinearidade.

No quadro da figura 24 estão indicados os erros que serão medidos em cada um dos grupos acima citados exemplificados para a movimentação sobre o eixo x.

Atente-se para os procedimentos semelhantes a efetuar nos eixos y e z para a obtenção do completo levantamento das características da M3D, permitindo com isto, determinar outros tipos de erros como a ortogonalidade entre os movimentos.

4.1.1 - Medição do erro de posicionamento

Como padrões de deslocamento linear sobre o próprio eixo de movimento podem ser utilizados diversos instrumentos. O mais simples e tradicionalmente conhecido na metrologia é a coluna micrométrica constituída por blocos padrões que definem o seu passo.

A coluna micrométrica [6], é empregada na medição do erro de posicionamento na forma indicada pela figura 25, com o auxílio

de um apalpador.

Ela é posicionada e deslocada colinearmente às direções x, y e z para a medição dos erros de posicionamento dxx, dyy e dzz, respectivamente.

			DESLOCAMENTO EIXO X	
E	L I N E A R O	X	POSIC dxx	(A)
		Y	RETIL dyx	(B)
		Z	RETIL dzx	
R	A N G U L A R	X	dAx	dy(Az) x dz(Ay) x
		Y	dBx (C)	dx(Bz) x (D) dz(Bx) x
O	A O R	Z	dCx	dx(Cy) x dy(Cx) x
			direto	efeito

- A - Medição do erro de posicionamento.
- B - Medição do erro de retilineidade.
- C - Medição do erro angular (direto).
- D - Determinação do erro angular pela medição do erro de posicionamento e retilineidade em dois planos.

FIGURA 24 - Relação entre os erros e os métodos de medição.

Esta medição é iniciada zerando-se a leitura do apalpador em contato com a coluna micrométrica.

Deslocando a coluna micrométrica através do deslocamento,

por exemplo, da mesa, de um padrão correspondente ao seu passo, zera-se novamente a leitura do apalpador quando em contato com a coluna micrométrica.

Com isto, o erro de posicionamento é obtido pela diferença entre o deslocamento registrado na M3D e o deslocamento padrão dado.

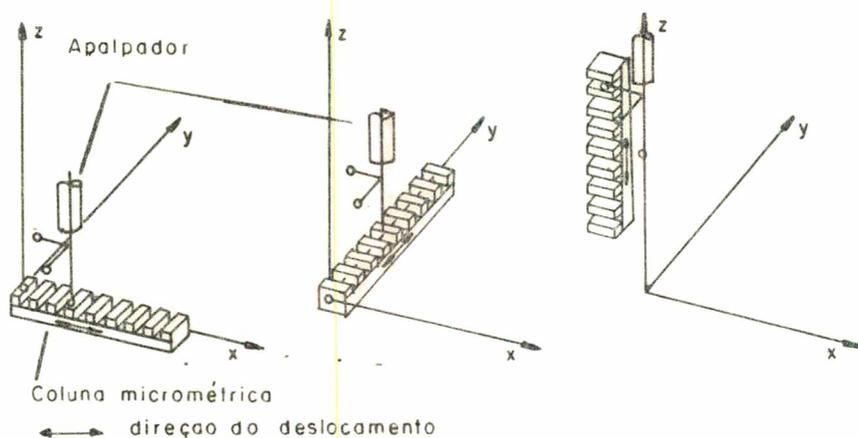


FIGURA 25 - Posicionamento da coluna micrométrica.

Exemplificando a medição do erro de posicionamento, para o eixo x, efetuou-se o ensaio apalpando a superfície de uma escala micrométrica PVE, GREAT BRITAIN, de comprimento 250 mm e passo 25 mm.

4.1.2 - Medição do erro de retilidade

Como padrões planos, para a medição do erro de retilidade, podem ser utilizados os esquadros de granito e as bases pla

nas.

O erro de retilineidade corresponde ao deslocamento indesejável, por exemplo da mesa, na direção ortogonal ao deslocamento sendo medido nas suas componentes ortogonais sobre os eixos cartesianos.

Posicionando a direção de medição do apalpador na direção da componente do erro e a ponta do apalpador em contato com uma superfície plana padrão, qualquer movimento do plano nesta direção é indicado pelo apalpador.

Fixando este plano, paralelo a direção do deslocamento da mesa, qualquer movimento desta implica em idêntico movimento do plano correspondente a componente do erro de retilineidade.

O processo de utilização do esquadro de granito pode ser exemplificado através dos esquemas contidos na figura 26, onde as arestas dos esquadros foram posicionadas sobre as direções principais (caso a, plano (x,y) ; caso b, plano (y,z) ; caso c, plano (x,z)).

No caso a, o esquadro foi posicionado de tal forma que as suas arestas coincidiam com as direções ortogonais x e y .

Com isto, posicionando o apalpador em contato com a aresta x e deslocando a mesa nesta direção, qualquer componente do erro de retilineidade na direção y será indicado pelo apalpador (medição de dy).

Por outro lado, posicionando o apalpador na aresta y e deslocando a mesa nesta direção qualquer componente do erro de retilineidade na direção x será indicada pelo apalpador (medição de dx).

Este processo é repetido nas outras direções, conseguindo-se determinar os erros apresentados nas direções ortogonais ao deslocamento.

O processo de utilização da base plana é semelhante a utilização do esquadro; somente pela impossibilidade da medição do

erro em eixos ortogonais, já que, ela possui apenas um plano de trabalho.

A medição do erro de retilidade, é exemplificado para a movimentação da mesa sobre o eixo x, através de contato de dois apalpadores, simultaneamente, com o esquadro e a base plana, para a medição dos componentes nas direções ortogonais y e z.

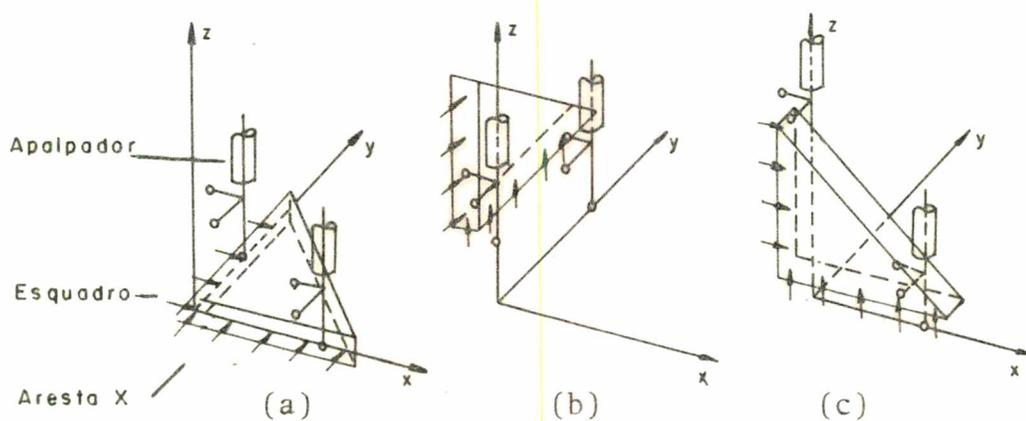


FIGURA 26 - Posicionamento do esquadro na medição do erro de retilidade.

O esquadro utilizado tem como arestas: 150 mm e 220 mm; e a base plana circular, um diâmetro útil de 200 mm.

Os detalhes desta medição podem ser visualizados pela figura 27.

4.1.3 - Medição do erro angular (medição direta)

Para a medição de ângulos, utilizam-se diversos instrumentos tais como os níveis eletrônicos e os autocolimadores.

O princípio de funcionamento do nível eletrônico [7], po-

de ser compreendido com o auxílio da figura 28 onde é mostrado um pêndulo em um sistema indutivo.

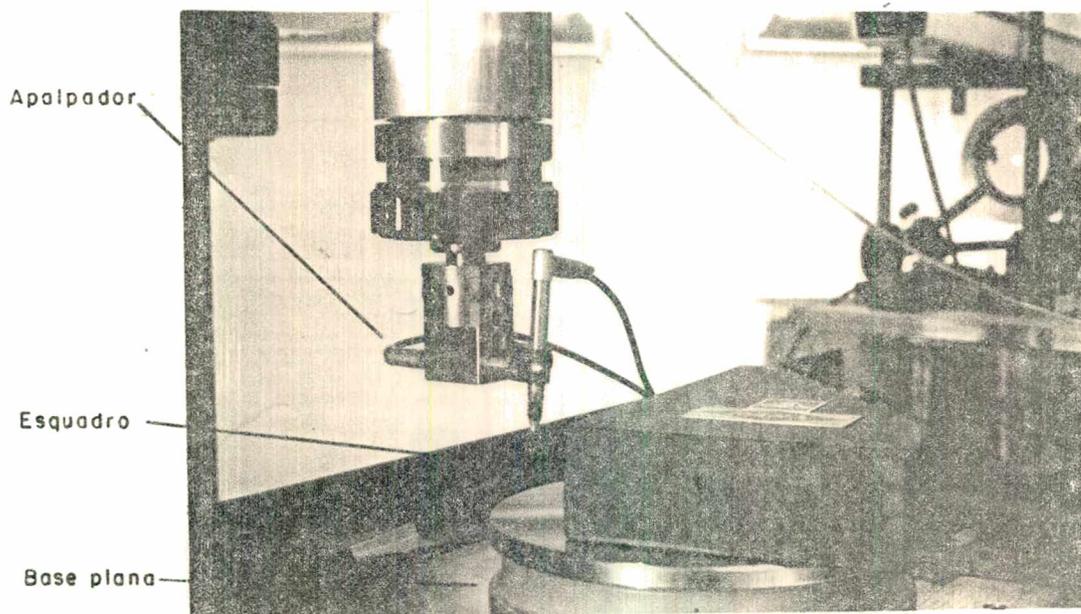


FIGURA 27 - Detalhes do posicionamento do esquadro e da base plana. (Os apalpadores foram deslocados de sua posição real para melhor visibilidade).

Com a inclinação α , da base de assentamento, o pêndulo desloca-se de um lado para outro, variando o sinal elétrico, proporcional a inclinação registrada pela base.

Devido a sua sensibilidade à aceleração não é possível utilizá-lo em movimentos que introduzam aceleração ao pêndulo e na determinação de erros angulares em torno do eixo da aceleração da gravidade.

O autocolimador, por sua vez, é utilizado na medição de pequenos deslocamentos angulares, apresentados pela superfície em teste, como pode ser observado na figura 29.

No autocolimador, um feixe de luz colimada projeta a imagem de um alvo sobre o prisma semi-refletor. Esta imagem é projetada sobre o refletor fixo, passando antes pela objetiva fixa. Posteriormente, ela retorna sensibilizando a fotocélula.

Quando, no ensaio, o refletor sofre uma inclinação devido a inclinação da superfície em teste, a imagem que é projetada ao refletor é deslocada da posição inicial.

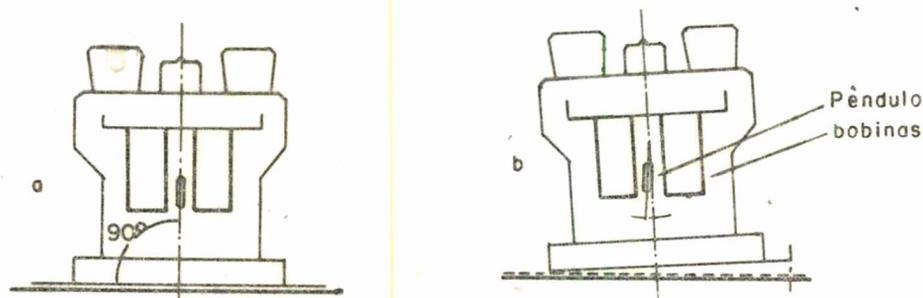


FIGURA 28 - Princípio de funcionamento do nível eletrônico.

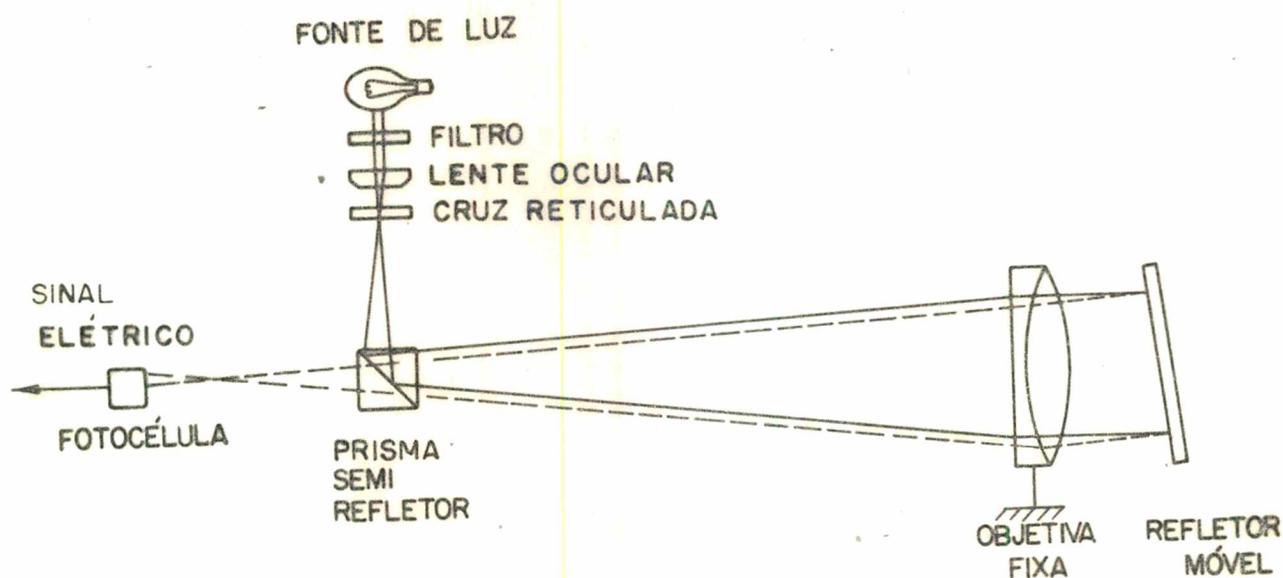


FIGURA 29 - Princípio de funcionamento do autocolimador.

Com isto, a imagem que sensibiliza a fotocélula também é deslocada, proporcionalmente a inclinação da superfície, sendo este deslocamento, transformado em sinais elétricos e mensurado.

Neste trabalho, o erro angular, dA , foi medido com a utilização de um nível eletrônico, e os erros angulares dB e dC medidos com a utilização do sistema laser autocolimador [8].

O princípio de funcionamento do laser-autocolimador é semelhante ao autocolimador descrito, substituindo-se a luz colimada pelo laser e colocando um fotodetector, sensível para deslocamentos em dois eixos, como elemento sensor.

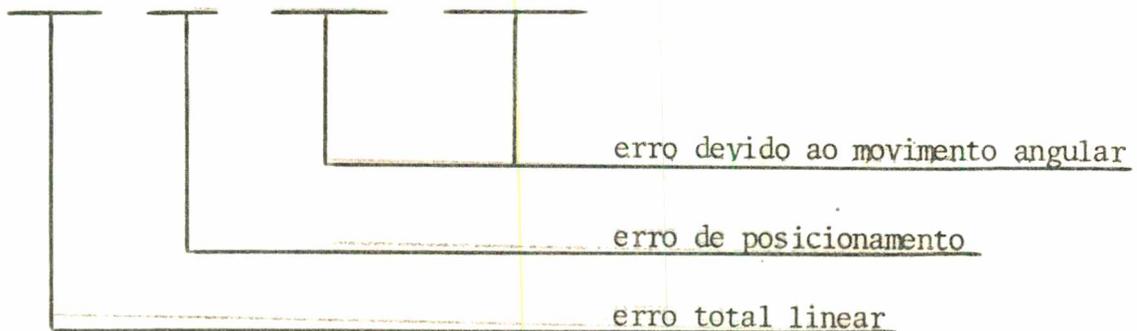
A montagem do laser autocolimador para a medição dos erros dB e dC podem ser visualizados na figura 30.

4.1.4 - Determinação do erro angular pela medição do erro de posicionamento e retilidade em dois planos diferentes

Para a determinação do erro angular, pelo método indireto, foram repetidos os processos de medição do erro, de posicionamento e de retilidade, em dois planos distintos; a primeira, definida por $z = 100$ mm, na parte inferior próxima a mesa, e a segunda para $z = 400$ mm.

Observa-se, pela figura 9 e pelo quadro da figura 10, que na medição do erro de posicionamento ou retilidade sobre um dos eixos, estarão incluídos tanto estes erros quanto os erros de efeito dos movimentos angulares, resultando, por exemplo, para a medição do erro de posicionamento no eixo x, em:

$$dx(x) = dx_x + dx(Bz)_x + dx(Cy)_x$$



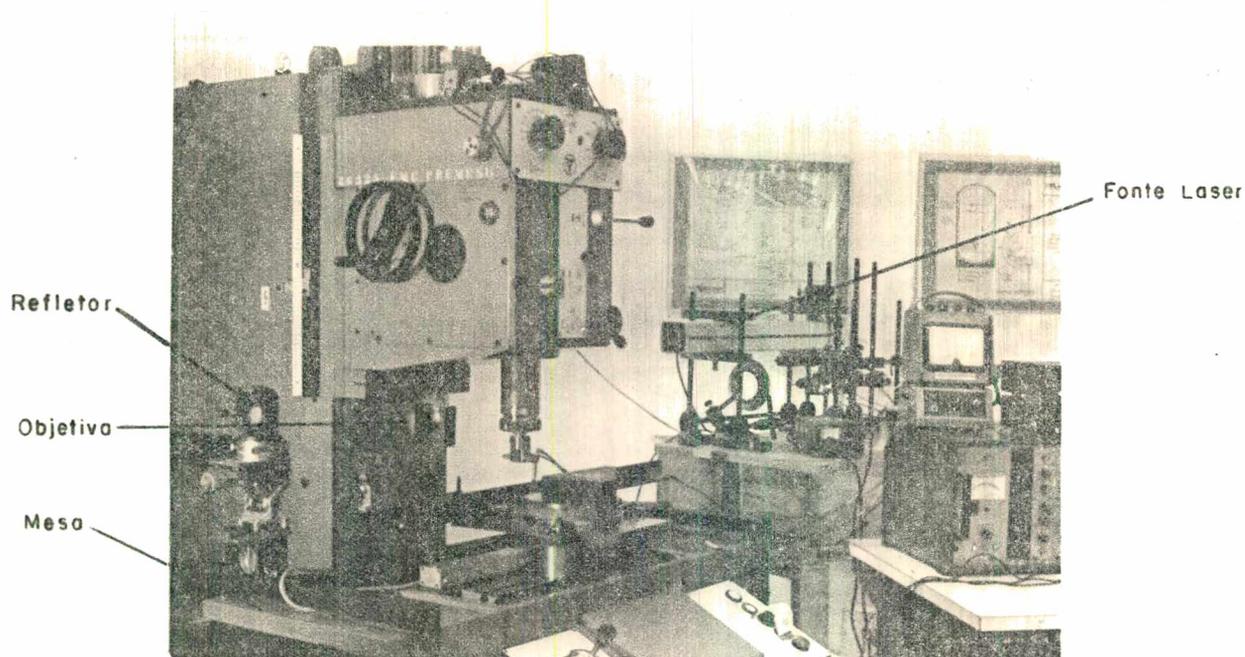


FIGURA 30 - Posicionamento do laser autocolimador para a medição dos erros angulares δB e δC .

Com isto, medindo-se o erro total linear $dx(x)$, em dois níveis, e, considerando idêntico o erro de posicionamento nesses dois níveis, ter-se-ia somente a variação dos efeitos do erro angular, como pode-se observar pela figura 9.

Exemplificando o processo acima; efetuando-se as medições em $z = 100 \text{ mm}$ e $z = 400 \text{ mm}$, e considerando somente a existência do erro $dx(Bz)$, desde que o valor de y foi mantido constante, ter-se-ia numericamente:

$$\text{em } z = 100 \text{ mm } dx(x)_2 = 1 \mu \text{ m}$$

$$\text{em } z = 400 \text{ mm } dx(x)_1 = 4 \mu \text{ m}$$

Com isto, finalmente, obtem-se o valor de dBx

$$dBx = \text{arc tg } \frac{dx(x)_1 - dx(x)_2}{z_1 - z_2}$$

$$dBx = \text{arc tg } \frac{4 - 1}{400 - 100} 10^{-3}$$

$$dBx = 2,0''$$

O processo acima corresponde na figura 8, do capítulo 2 deste trabalho, a determinação do ângulo ΔB pela medição de dx em dois planos distintos determinados por h .

4.2 - Metodologia de obtenção e apresentação dos resultados

Os métodos de medição, apresentados nos itens anteriores, podem ser resumidos no esquema da figura 31, para o deslocamento da mesa sobre o eixo x . Nesta figura, os equipamentos e os métodos estão relacionados, respectivamente, por caracteres numéricos e alfabéticos, na seguinte forma:

A - medição do erro de posicionamento, utilizando a coluna micrométrica. Transdutor de deslocamento nº 6.

B - medição dos erros de retilidade, utilizando a base plana para o eixo z e o esquadro de granito, para o eixo y . Transdutores de deslocamento, nº 1 e nº 2.

C - medição do erro angular, utilizando o nível eletrônico para dAx ; e o laser autocolimador para dBx e dCx . Transdutores

nº 5, nº 3 e nº 4, respectivamente.

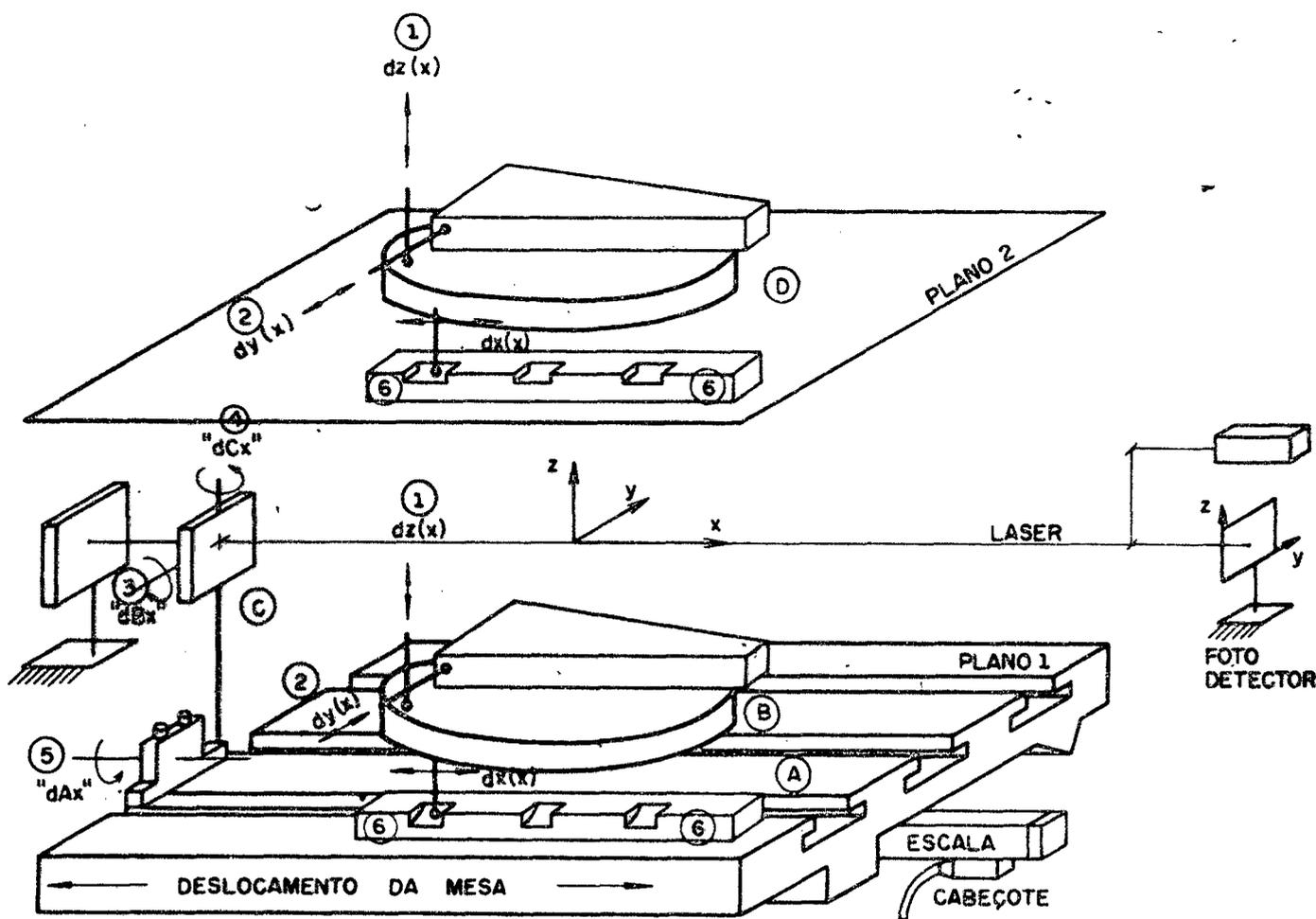


FIGURA 31 - Esquema completo da medição dos erros.

D - medição do erro angular, indiretamente, pela medição dos erros de posicionamento e retilineidade em dois planos distintos. Repetição dos itens A e B em dois planos distintos.

Observa-se, pelo esquema da figura 31, que a medição do erro de posicionamento, com a utilização da coluna micrométrica é um processo discreto (medições feitas a cada passo da coluna), sendo diferente das medições dos outros erros, que podem ser tomadas tanto discretamente, quanto continuamente.

A metodologia de medição ideal, nestes casos é a tomada conjunta e discreta dos erros, o que corresponderia ao caso real da medição de uma grandeza, definida pelo passo da coluna micrométrica.

trica.

No entanto, como a metodologia da medição discreta demanda grande quantidade de tempo (6 transdutores, com 5 repetições em 15 pontos para o movimento de ida e volta em um tecto de 150 mm, totaliza 900 leituras), mediu-se, discretamente, o erro de posicionamento em etapa distinta da medição dos outros erros, tomadas contínuas e simultaneamente.

Pelas características das medições de múltiplas grandezas (leitura de 5 transdutores em pelo menos 10 pontos), não somente em estado estacionário, ou discreto, como também em dinâmico, ou contínuo (um registro por segundo), verifica ser apropriada a utilização de um sistema de aquisição de sinais SAS [9], [10].

Neste caso, o SAS atua como uma interface universal entre os transdutores do banco de provas e o computador na forma da figura 32. O seu relacionamento com a medição pode ser resumido da seguinte forma:

1º) - O deslocamento da mesa em uma direção escolhida, movimentada a escala, que aciona o seu respectivo contador. Esta indicação é recebida pelo computador através da interface BCD;

2º) - Nas posições ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) determinadas pela programação, o SAS adquire os sinais analógicos dos transdutores. Estes estão ligados a uma unidade de adaptação (fontes amplificadoras) e uma chave seletora que por sua vez está ligada a um voltímetro que transforma os sinais analógicos em digitais;

3º) - Este sinal digital é levado ao computador através da interface HP/IB.

O SAS adquire os dados brutos apresentados pelos transdutores (por exemplo, voltagens) e, pelo processamento com o computador, obtém-se resultados dos deslocamentos, média dos valores, retas de regressão, desvios, etc.

A programação elaborada pelo LABMETRO - UFSC [11], para a obtenção e análise dos dados do banco de testes da figura 31, es-

tã esquematizada nos fluxogramas da figura 33 e figura 34, sendo que a primeira corresponde a aquisição dos dados, e a segunda ao processamento dos dados. A função dos passos indicados pode ser assim resumida:

1º) - Início do programa com a definição do eixo de movimento (x, y ou z) e o passo da medição (coordenadas em que serão registrados os valores dos transdutores.

2º) - Definição do movimento de ida ou de volta da mesa.

3º) - Nas coordenadas desejadas, determinadas pela leitura da escala, são registrados os valores dos transdutores.

4º) - Estes valores são corrigidos pelos fatores de calibração, sendo posteriormente armazenados e plotados simultaneamente ao ensaio, em gráficos, na forma exemplificada na figura 35, para fins de acompanhamento.

Nestes gráficos, os valores armazenados são plotados na ordenada, caracterizando o valor com o número do transdutor.

5º) - Após o armazenamento, se a mesa atingiu a coordenada final estabelecida, para-se a mesma. Caso contrário, continua-se o movimento. Além disto, se o movimento interrompido for de ida, define-se o movimento de volta e procede-se ao deslocamento da mesa.

6º) - Caso o movimento interrompido seja o de volta, verifica-se a imposição da repetição, ou não, do processo acima.

Esta repetição é necessária para a determinação do erro aleatório da medição, pois esta poderá apresentar-se instável ou apresentar valores dentro de uma faixa de dispersão, em torno de um valor médio. Nestes casos o erro será dado de uma forma completa por:

= erro sistemático = média das medidas - valor efetivo

= incerteza da medição $\leq \pm 2 \sigma$ (P = 99,4%, n repetições)

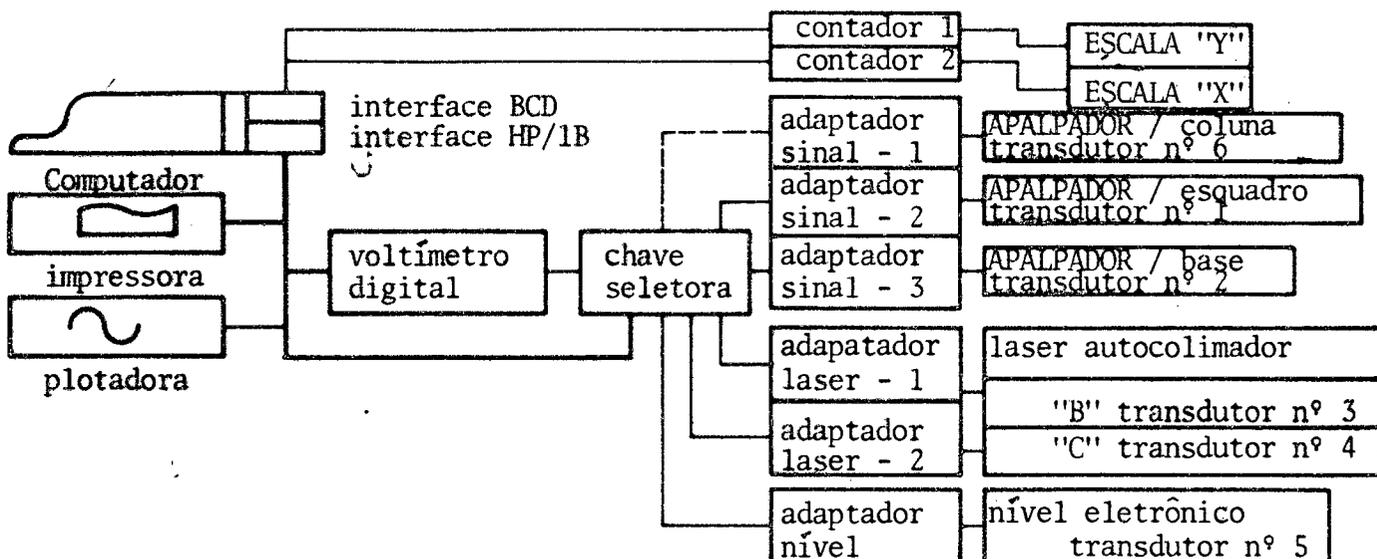


FIGURA 32 - Posição do SAS na medição.

Após a realização da coleta, já com os valores armazenados e selecionando um dos transdutores, inicia-se o processo dos dados segundo o fluxograma da figura 34, assim resumido:

1º) - Cálculo da média dos n valores lidos, para cada coordenada. Estes valores poderão ser plotados, como exemplificado na figura 36, traçando-se uma curva dos valores médios para cada transdutor.

2º) - Supondo que para estas curvas, o ideal seria o traçado de uma reta, representando guias sem erros, traça-se uma reta ideal, como na figura 38(a), através de métodos de regressão [12].

Na figura 38(a), a curva e a reta ideal para o movimento de ida foram deslocados de forma a posicionar a reta sobre o eixo central.

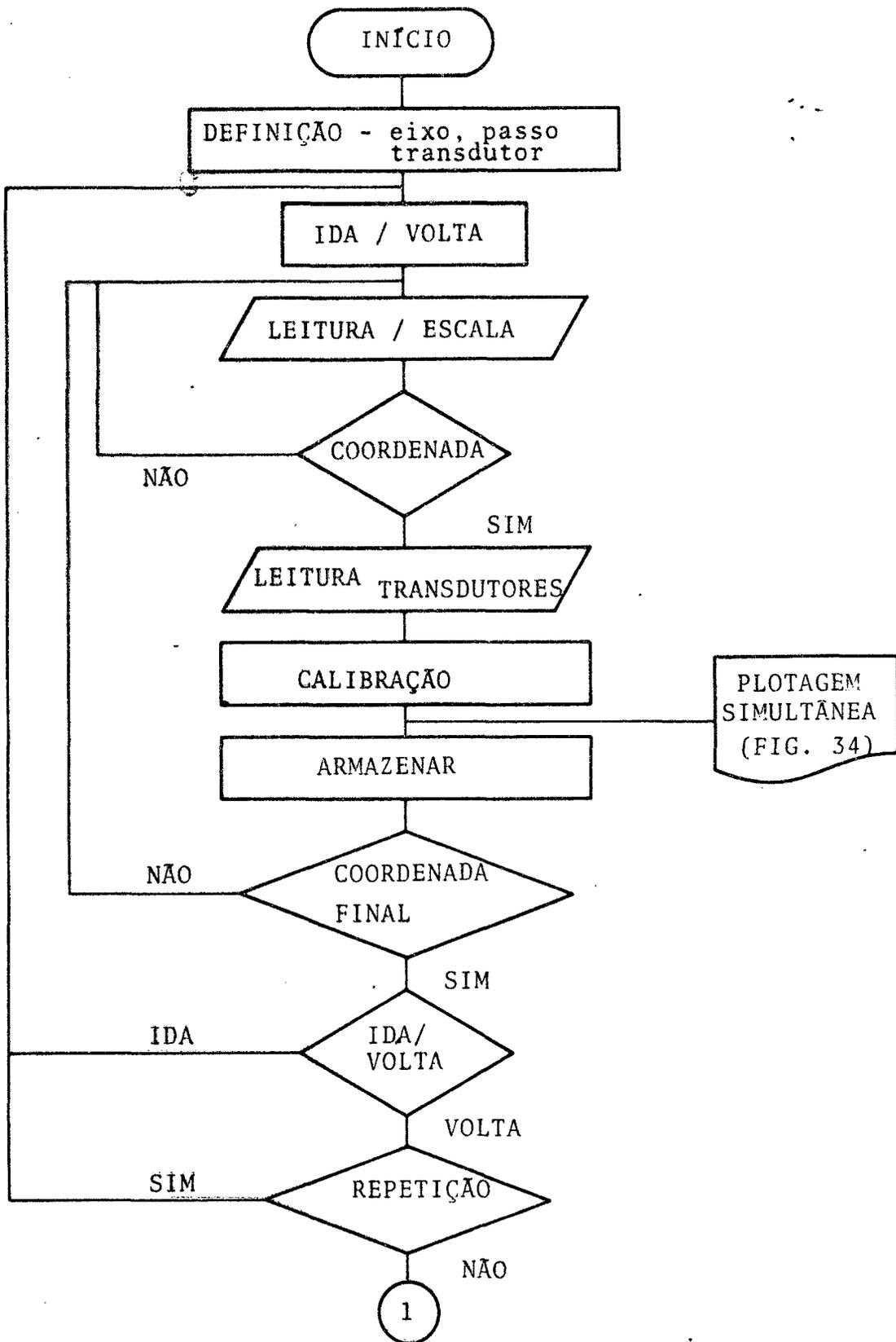


FIGURA 33 = Fluxograma para a aquisição dos dados brutos.

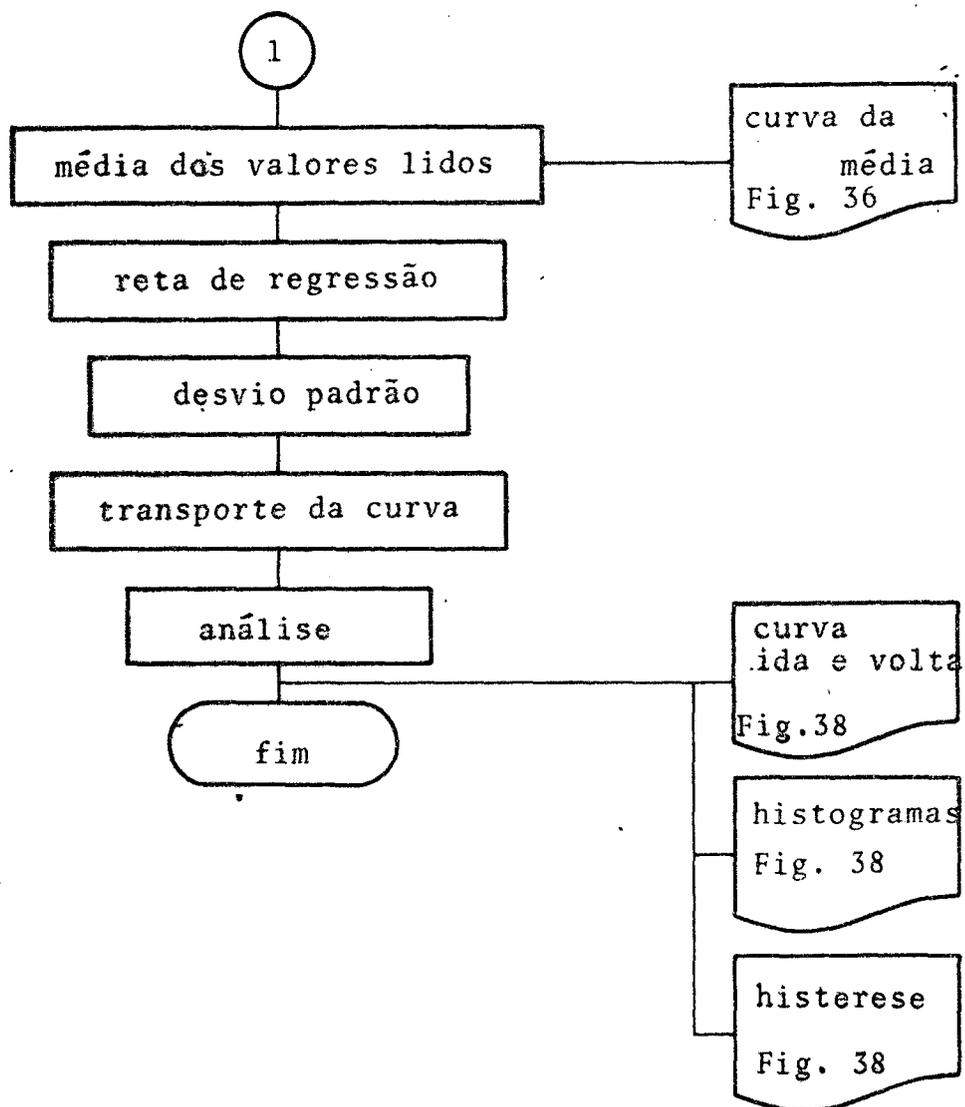


FIGURA 34 - Fluxograma para o processamento dos dados.

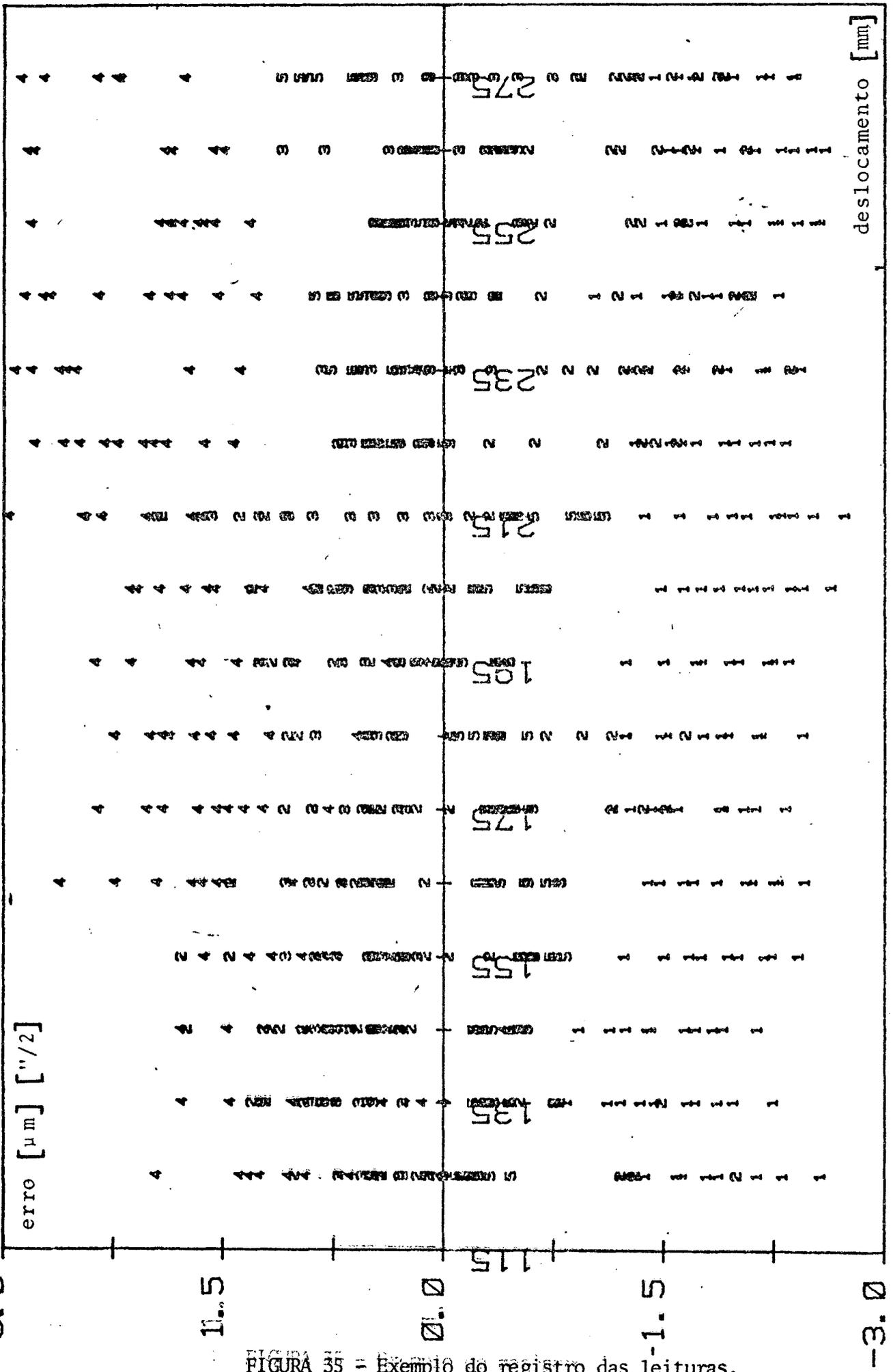


FIGURA 35 - Exemplo do registro das leituras.

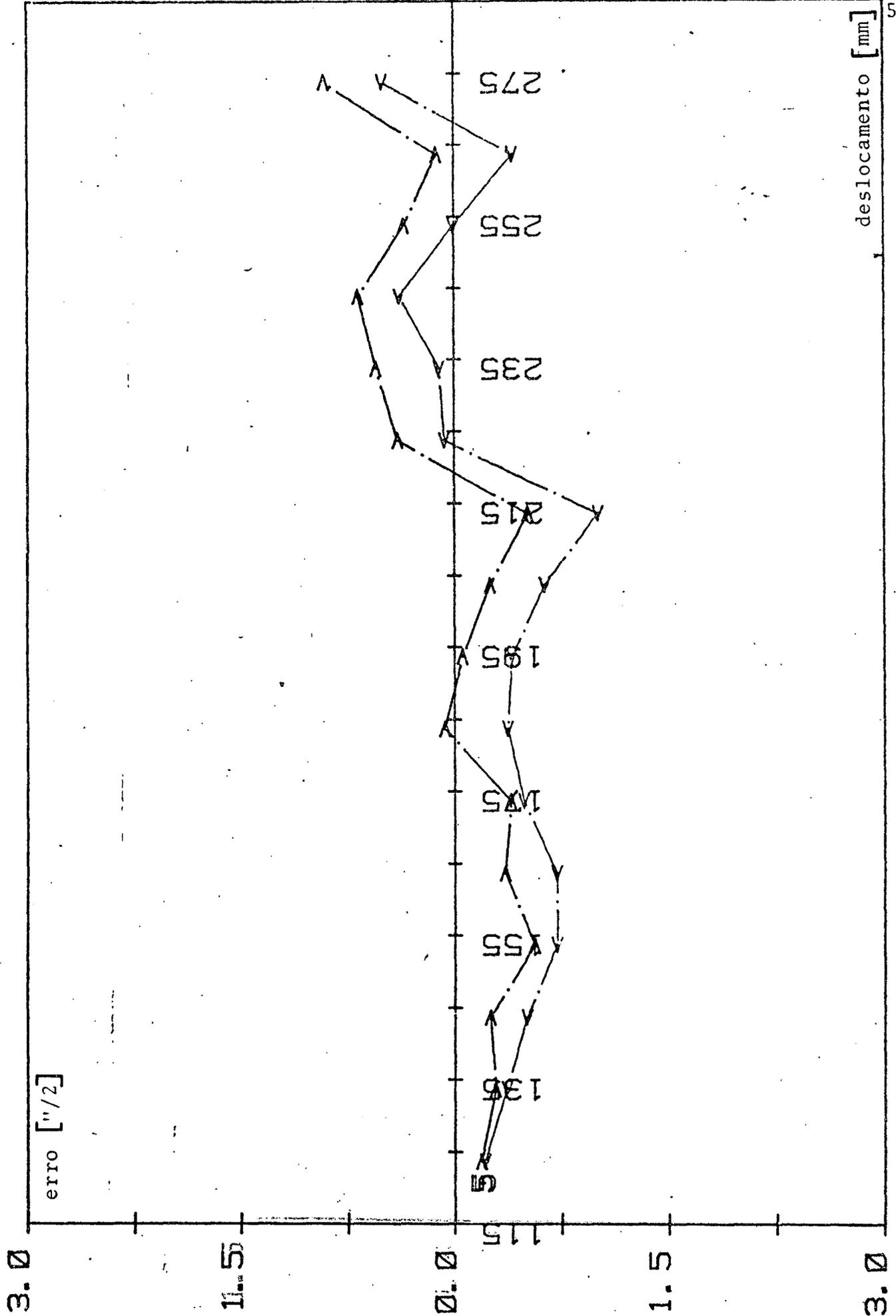


FIGURA 36 - Curva dos valores médios da leitura do transdutor nº 5 (nível eletrônico), após medições com 5 repetições.

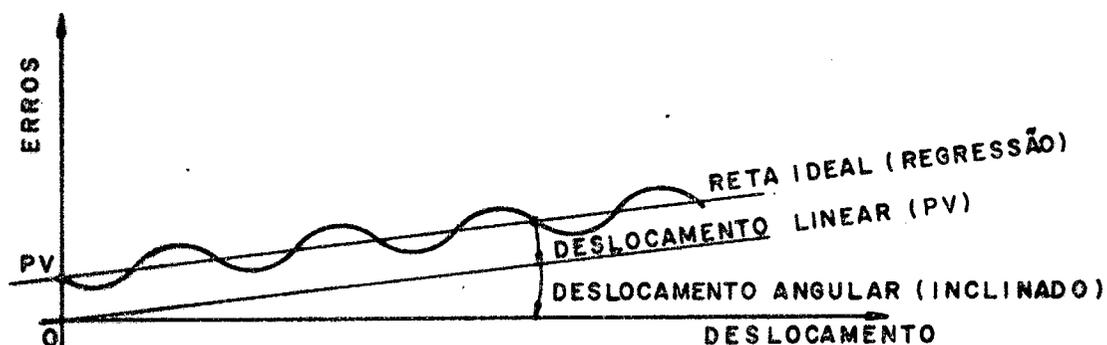


FIGURA 37 - Esquema das correções sobre o gráfico dos resultados.

Para a execução deste artifício geométrico, determina-se analiticamente, a equação da reta de regressão na forma equacionada abaixo:

$$y = (PV) + (INCL) x$$

Utilizando os valores de PV (intersecção da reta com a ordenada) e INCL (inclinação da reta), leva-se a reta de regressão a coincidir com o eixo central, na forma da figura 37. Nela, a reta ideal é deslocada linearmente de PV e angularmente de INCL, mantendo a diferença entre a curva e a reta quando transportada para a nova posição:

3º) = A curva para o movimento da volta também é desloca-

da. No entanto, o método difere do adotado para o deslocamento da curva de ida.

Neste caso, calcula-se a relação existente entre a curva de ida e de volta.

Após o deslocamento da curva de ida, a relação anteriormente calculada é mantida traçando-se a curva de volta.

Com isto, mantêm-se por exemplo a histerese existente mesmo com a correção da curva ($1,96 \mu$ e $0,55 \mu$); fig. 38(a) e a inclinação da reta ideal para a volta, em relação ao eixo horizontal (que corresponde a reta ideal para o movimento de ida).

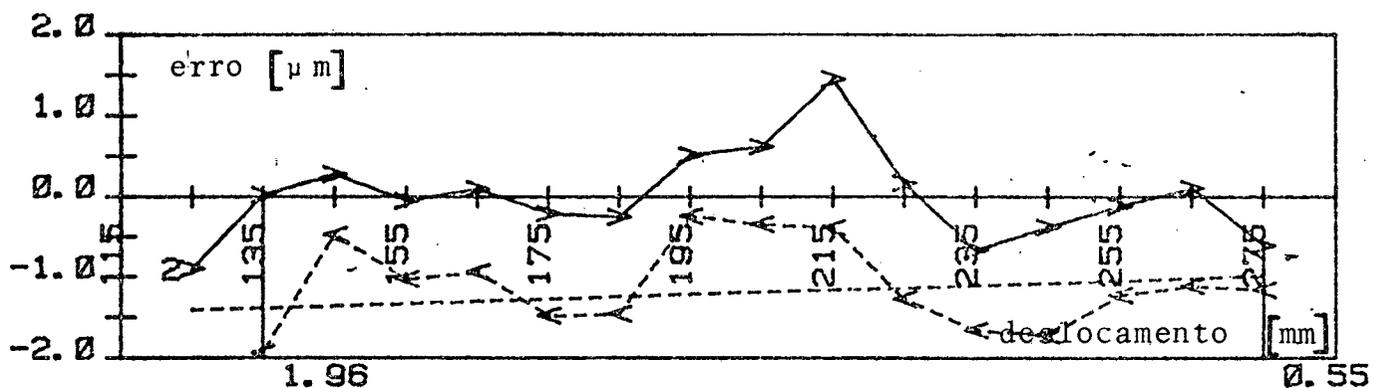
4º) - No caso das medições do erro de posicionamento e retilineidade a figura 38(a) representa o próprio valor dos erros, supondo a inclinação e o deslocamento ser resultante da inclinação e deslocamento do padrão retilíneo sólido em relação ao seu posicionamento inicial.

5º) - Nas medições dos ângulos, o padrão é posicionado em relação a guia e mede-se o ângulo de movimento da mesa em relação ao padrão, que é igual ao ângulo de movimento da mesa em relação a guia, pois mesmo que o padrão esteja inicialmente deslocado, ele permanece fixo em relação a guia.

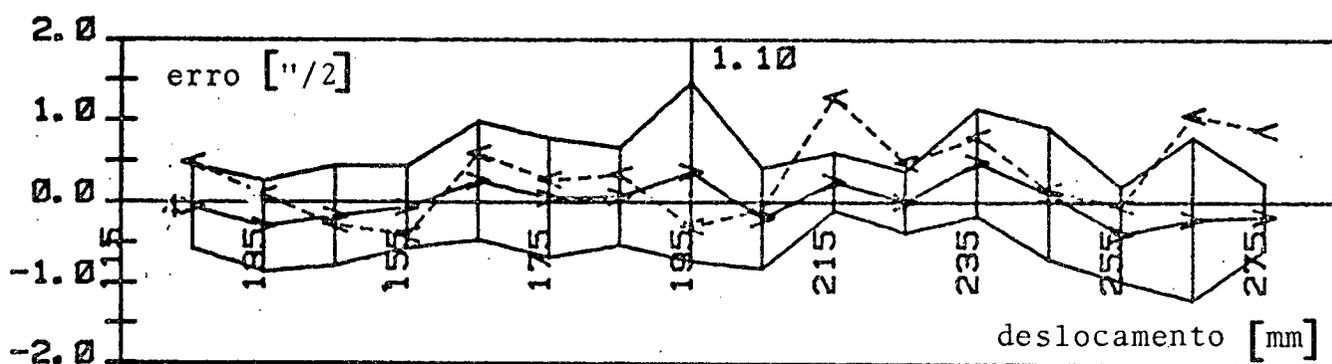
Com isto, estes valores da inclinação e do ponto de intersecção não podem ser eliminados, pois qualquer indicação é proveniente da medição e não do posicionamento do padrão, como no caso linear.

Os valores da inclinação da reta de regressão e o ponto de intersecção foram listados separadamente como na figura 38(b), para correção dos resultados.

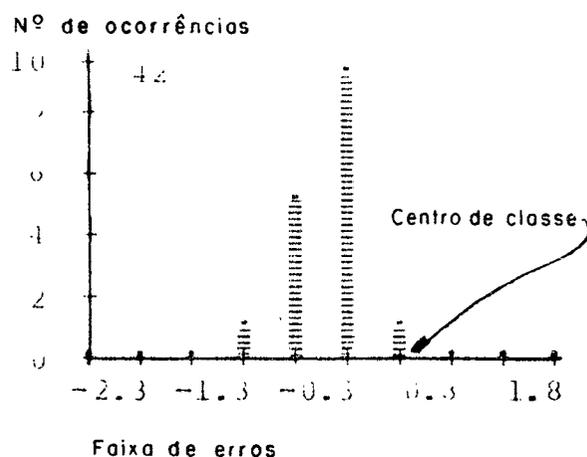
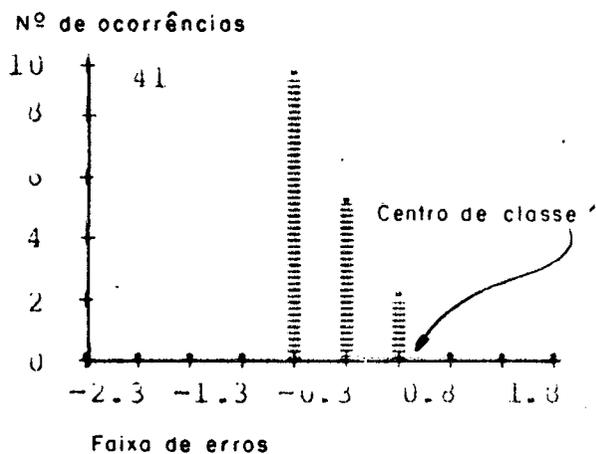
6º) - O programa calcula e indica o desvio padrão como na figura 38(b), onde se verifica o valor do desvio máximo ($1,10''$) e o traçado da curva do desvio padrão, (curva contínua em torno da curva contínua central), sendo que, para obter o valor do desvio basta subtrair o valor da curva de contorno da curva central, em cada posição:



a - traçado dos valores registrado pelo transdutor nº 2 (apalpador/esquadro).



b - traçado dos valores registrado pelo transdutor nº 4 (laser "C").
Inclinação = 0,0113 PV = 0,06.



c - histogramas transdutor nº 4 (41 - ida; 42 voltas).

FIGURA 38 - Exemplos de gráficos traçados pelo computador com auxílio do S.A.S.

79] - O programa calcula e apresenta um histograma dos resultados da medição, como na figura 38(c).

Este histograma representa uma análise estatística dos gráficos, por exemplo da figura 38(a).

Neste caso, divide-se as indicações dos erros em faixas e verifica-se o número de permanência da curva dentro de cada uma destas faixas.

Este número de permanência ou de coincidências é colocado sobre o centro de classe de cada faixa de erros, na forma de pequenos traços superpostos.

Através deste gráfico, obtém-se uma análise clara do comportamento geral estatístico das curvas dos erros.

4.2.1 - Calibração dos instrumentos

Para uma correta utilização dos sistemas de medição, nos ensaios, é necessário que os mesmos passem por um processo de calibração, envolvendo os sinais de entrada (deslocamento padrão) e os de saída (leituras e gráficos) [13].

A calibração corresponde, portanto, a determinação da correção efetiva entre a medida indicada pelo transdutor e, o valor (convencionalmente correto) da grandeza a medir.

Neste trabalho, foram calibrados os seguintes transdutores:

1) - Apalpadores nº 1 e nº 2; de contato da base plana e do esquadro de granito, respectivamente.

Características:

: marca TESA - GT 21

: deslocamento longitudinal

- . leitora TESA
- . divisão de escala de $0,1\mu\text{m}$
- . repetibilidade de leitura $\pm 0,1\mu\text{m}$ ($\pm 2\sigma$)

2) - Apalpador nº 3; de contato da coluna micrométrica.

Características:

- . marca TESA - GT 30
- . deslocamento transversal
- . leitora TESA
- . divisão de escala de $0,1\mu\text{m}$
- . erro máximo apresentado $\pm 0,2\mu\text{m}$

3) - Nível eletrônico.

Características:

- . marca TAYLOR HOBSON |7|
- . divisão de escala 2"
- . erro máximo apresentado $\pm 0,5''$

4) - Laser autocolimador |8|

Características:

- . faixa de operação 0" a 10"
- . erro máximo 1"
- . resolução 1"

Como padrões, foram considerados:

1º) - Blocos padrões

Características:

- . marca MATRIX PITZER
- . grau ZÉRO = tolerância de comprimento $\pm 0,05\mu\text{m}$

2º) - Base plana

Características:

- . marca RAHN
- . diâmetro útil - $L = 200 \text{ mm}$
- . planicidade total $(10 + \frac{L}{100}) \mu\text{m}$
- . faixa utilizada = 150 mm
- . planicidade da faixa = $2 \mu\text{m}$ (parabólica)

3º) - Esquadro de granito

Características:

- . marca RAHN
- . arestas $150 \times 220 \text{ mm}$
- . planicidade total $(4 + \frac{L}{250}) \mu\text{m}$
- . faixa utilizada = 150 mm
- . planicidade da faixa $2,2 \mu\text{m}$ (parabólica)

4º) - Coluna micrométrica

Características:

- . marca PVE
- . comprimento útil de 250 mm
- . passo de 25 mm
- . precisão $\pm 0,1 \mu\text{m}$

5º) - Coluna de calibração do apalpador com relógio comparador

Características:

- . marca TESA
- . divisão de escala = $1 \mu\text{m}$
- . repetibilidade de leitura $0,5 \mu\text{m}$

6º) = Mesa de senos

Características:

- . marca PITTER GAUGE & TOOL CO TLD.
- . comprimento entre apoios = 250 mm
- . repetibilidade de leitura = $0,1 \mu\text{m}$

O processo de calibração estática envolvendo os equipamentos acima citados, obedeceu as seguintes etapas:

1) - Ajustagem

a) - Ajustagem dos apalpadores, analogicamente nos equipamentos. Para isto, posicionou-se o apalpador na coluna de calibração, em contato com o conjunto de blocos padrões, caracterizados acima.

Aumentando ou diminuindo a dimensão do conjunto, gradativamente em padrões conhecidos, lê-se o valor indicado no visor do equipamento, procedendo-se as correções em relação ao valor de entrada conhecido.

b).- Ajustagem do nível eletrônico posicionado sobre uma mesa de senos.

Com blocos padrões, inclina-se a mesa, gradativamente, sendo esta inclinação obtida, analogicamente, nos visores dos equipamentos, procedendo-se as correções desta leitura.

2) - Calibração

a) - Calibração dos valores obtidos utilizando-se dos gráficos traçados pela plotadora e da listagem fornecida pela impressora.

Procede-se identicamente a 1a. e 2a. etapa de calibração, com os transdutores acoplados ao SAS. Desta vez, são analisados os valores registrados no gráfico e na listagem, procedendo-se a calibração dos seus valores em relação ao padrão de entrada conhecidos.

As figuras 39 e 40, exemplificam esta etapa de calibração com a calibração do laser autocolimador (transdutor nº 4) com o

uso do transdutor nº 2, já calibrado.

- a - Fixação do retrorefletor do laser autocolimador sobre a mesa de senos zerando a sua leitura ($\alpha = 0$);
- b - Posicionamento do apalpador, ortogonalmente a esta mesa de senos zerando a sua leitura;
- c - Variação sequencial, do ângulo da mesa, com a utilização dos blocos padrões;
- d - Obtenção de um gráfico de leitura do apalpador (nº 2), já calibrado, e do laser (nº 4), a calibrar na forma da figura 38; com as dimensões do bloco padrão na ordenada e os valores dos deslocamentos na abcissa;
- e - Determinação do deslocamento padrão da mesa de senos, pela relação geométrica contida na figura 39, onde:

$$\alpha = \text{arc sen } \frac{x}{\ell}$$

onde " ℓ " é o comprimento definido pela mesa de senos ($\ell = 250 \text{ mm}$).

Neste caso, para $x = 5 \mu\text{m}$, obtém-se a partir da relação acima:

$$\alpha = \text{arc sen } \frac{5}{250} 10^{-3}$$

$$\alpha = 4''$$

e, identicamente, para $x = 10 \mu\text{m}$

$$\alpha = 8''$$

Estes valores (4" e 8"), convencionalmente corretos, deveriam ser indicados no gráfico da figura 40, pela curva do transdutor nº 4 (laser autocolimador) que no entanto apresenta:

dimensões do bloco padrão na horizontal

}	$x = 5\mu\text{m},$	$\alpha = 2''$	}	indicação do transdutor na vertical
	$x = 10\mu\text{m},$	$\alpha = 4''$		

Portanto, o gráfico da figura 40 está indicando a metade do valor convencionalmente correto do ângulo, e, para que o mesmo seja considerado correto, introduz-se o fator calibração:

$$K = 2$$

que posiciona a curva do transdutor nº 4 no local convencionalmente correto.

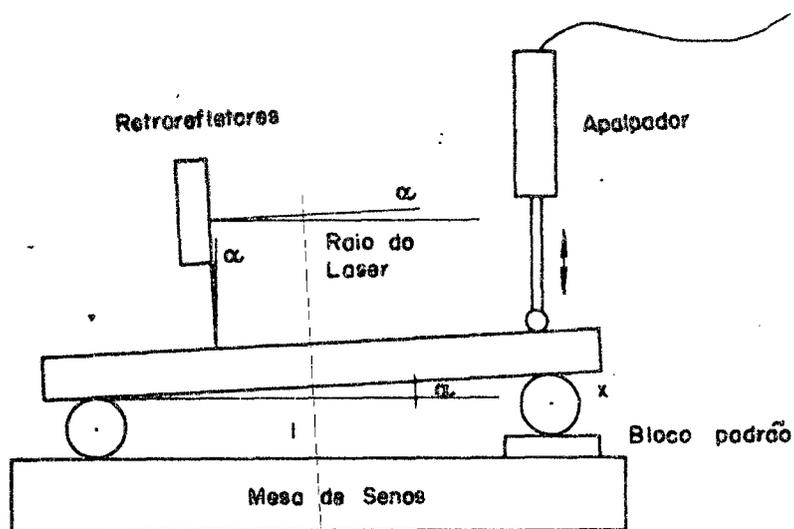


FIGURA 39 - Esquema de calibração do laser autocolimador.

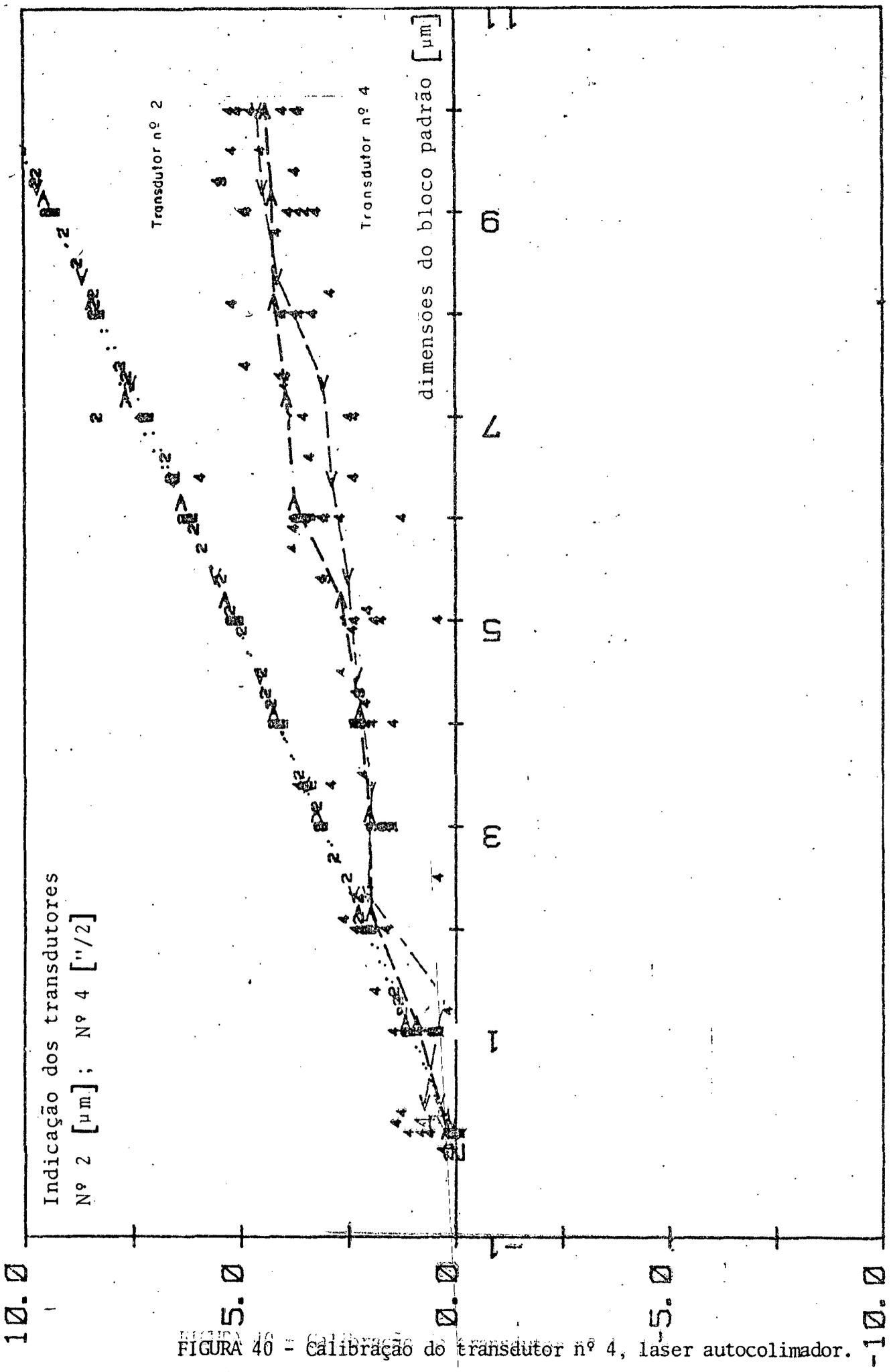


FIGURA 40 - Calibração do transdutor nº 4, laser autocolimador.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E ANÁLISES

Como o trabalho prático envolvido nesta medição foi bastante extenso e a inclusão de todos os resultados aumentaria consideravelmente o volume do trabalho, tornando tediosa a sua leitura, além de ser relevante somente a análise interpretativa dos resultados, neste capítulo serão apresentados somente os gráficos e tabelas elucidativas para a compreensão do texto.

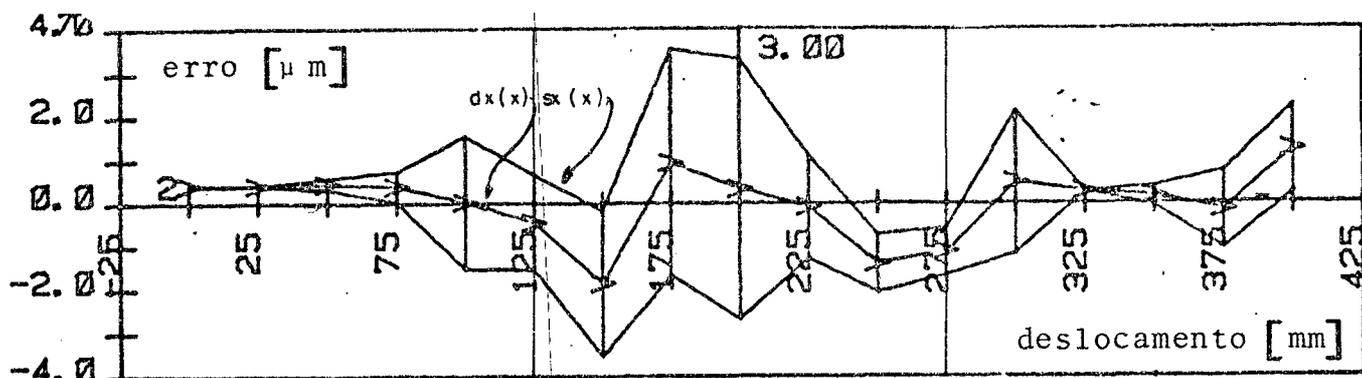
Os resultados das medições e as análises apresentadas a seguir, referem-se a um trecho de medição sobre o eixo x, curso de 125 mm a 275 mm, em dois planos definidos por: z1, igual a 100 mm e z2 igual a 400 mm.

5.1 - Erro sistemático de posicionamento e retilineidade

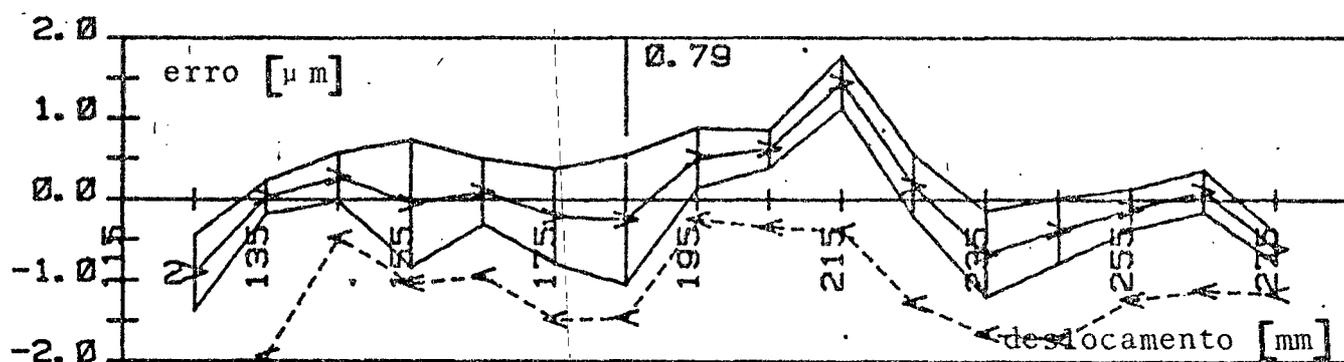
Chamando de $dx(x)$ erro sistemático de posicionamento, e de $dy(x)$ e $dz(x)$ os erros sistemáticos de retilineidade para a movimentação sobre o eixo x, segundo a nomenclatura adotada no item 4.1.4, obtém-se o valor dos mesmos utilizando-se os gráficos da figura 41.

Exemplificando o procedimento para $x = 175$ mm, quando do deslocamento da mesa no trecho $125 \leq x \leq 275$, mantendo $y = 125$ mm, e $z = 100$ mm, constantes, tem-se, pela diferença entre a linha contínua interna e o eixo horizontal central, que:

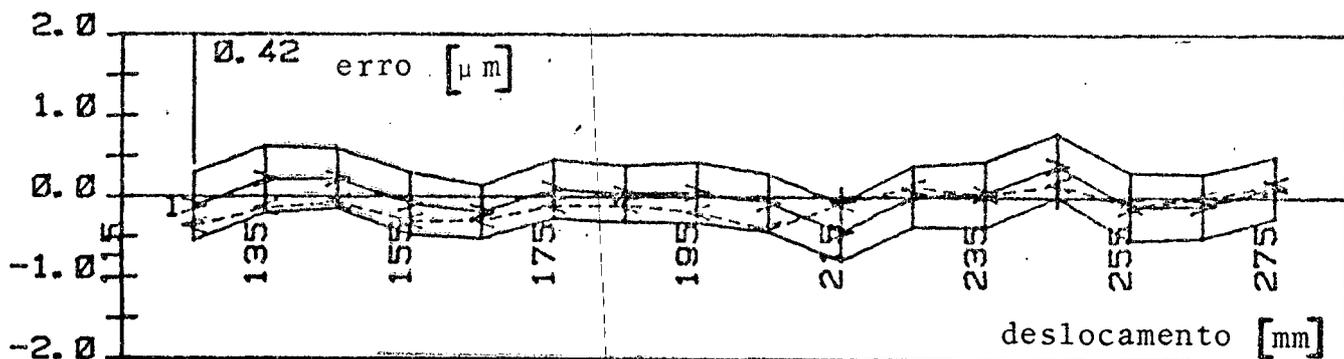
$$dx(x) = 1,0 \mu\text{m} \text{ (erro de posicionamento) figura 41(a).}$$



(a) - erro sistemático e aleatório de posicionamento; $dx(x)$, $sx(x)$.

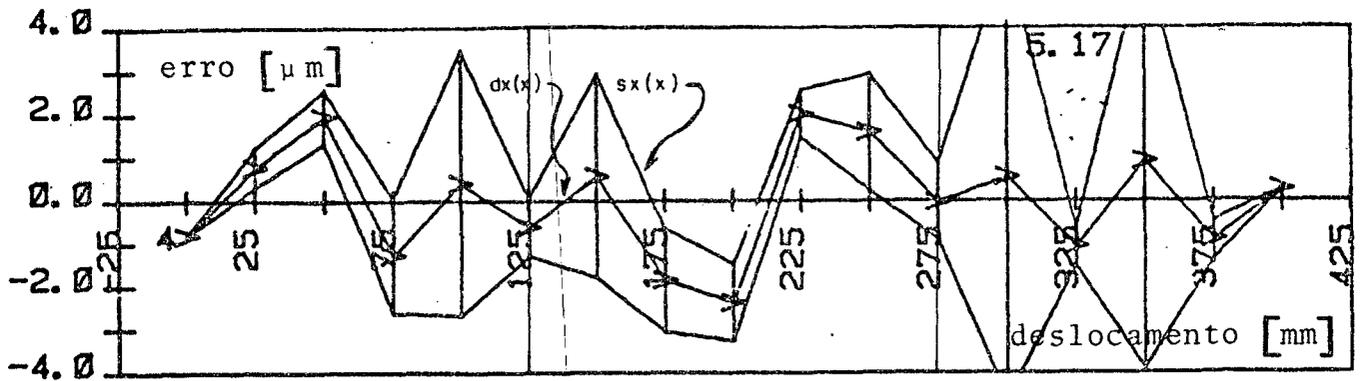


(b) - erro sistemático e aleatório de retilidade na direção y; $dy(x)$, $sy(x)$.

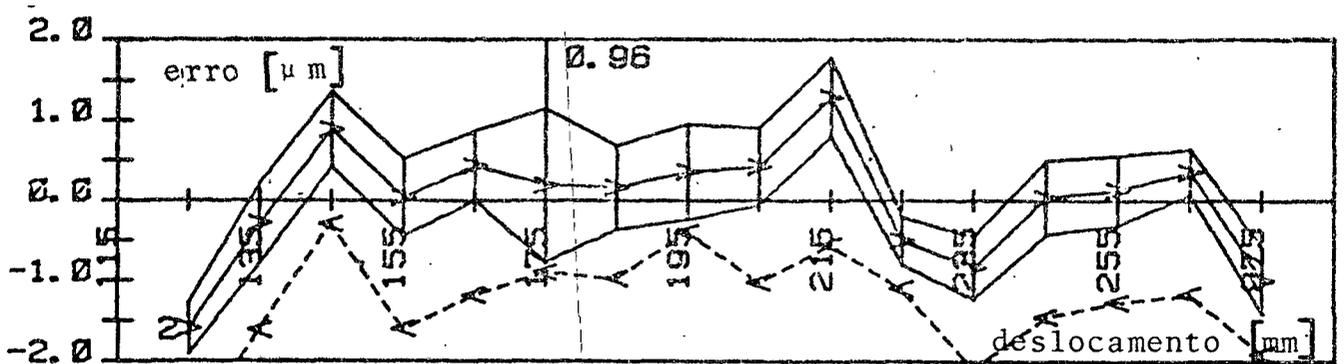


(c) - erro sistemático e aleatório de retilidade na direção z; $dz(x)$, $sz(x)$.

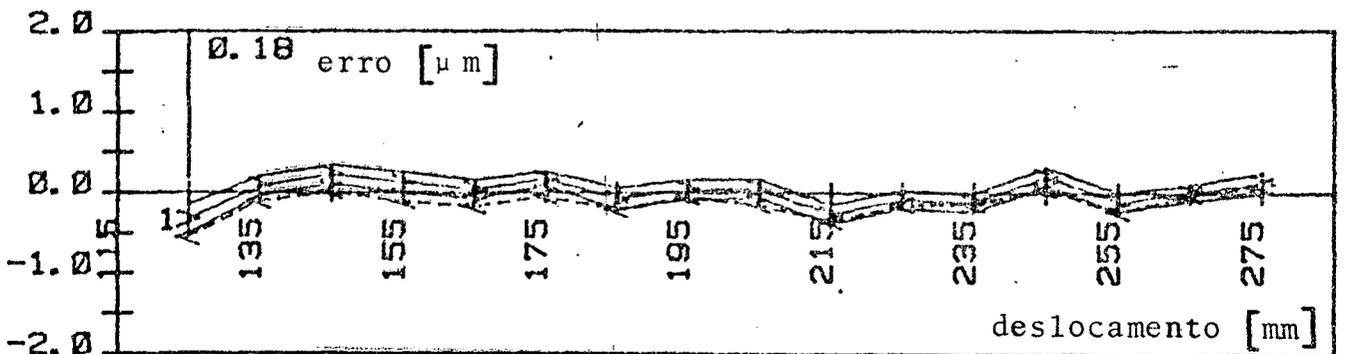
FIGURA 41 - Gráfico dos erros sistemáticos e aleatórios de posicionamento e retilidade, para a movimentação da mesa no eixo x, coordenadas $z = 200 \text{ mm}$ e $y = 125 \text{ mm}$ constantes.



(a) - erro sistemático e aleatório de posicionamento; $dx(x)$, $sx(x)$.



(b) - erro sistemático e aleatório de retilidade na direção y ; $dy(x)$, $sy(x)$.



(c) - erro sistemático e aleatório de retilidade na direção z ; $dz(x)$, $sz(x)$.

FIGURA 42 - Gráfico dos erros sistemáticos e aleatórios de posicionamento e retilidade; para a movimentação de mesa do eixo x , coordenadas $z = 500$ mm e $y = 125$ mm constantes.

$$dy(x) = 0,5 \mu\text{m} \text{ (retilineidade) figura 41 (b)}$$

$$dz(x) = 0,1 \mu\text{m} \text{ (retilineidade) figura 41(c)}$$

Além disto, obtêm-se os erros sistemáticos máximos, para as mesmas condições, a partir dos mesmos gráficos da figura 41, por idêntico processo; tendo-se:

$$dx(x)_{\text{max}} = - 2,0 \mu\text{m} \quad \text{em } x = 150 \text{ mm}$$

$$dy(x)_{\text{max}} = 1,5 \mu\text{m} \quad \text{em } x = 125 \text{ mm}$$

$$dz(x)_{\text{max}} = - 0,5 \mu\text{m} \quad \text{em } x = 215 \text{ mm}$$

5.2 - Erros sistemáticos angulares do movimento na direção x

Os erros sistemáticos angulares do movimento na direção x são obtidos dos gráficos apresentados na forma da figura 43.

Exemplificando o procedimento, para a movimentação da mesa sobre o eixo x, mantendo $y = 125 \text{ mm}$, e, $z = 100 \text{ mm}$, constantes e utilizando os valores das correções apresentadas a seguir, tem-se:

1º - Valores das correções

a - inclinação

$$\text{INCLI } 5 = - 0,0075''/\text{mm}$$

$$\text{INCLI } 4 = - 0,0113''/\text{mm}$$

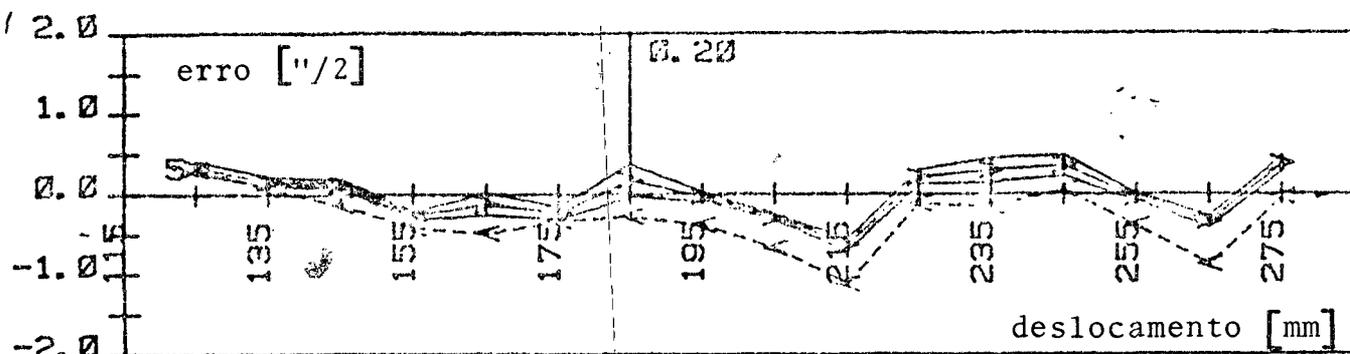
$$\text{INCLI } 3 = - 0,0047''/\text{mm}$$

b - intersecção

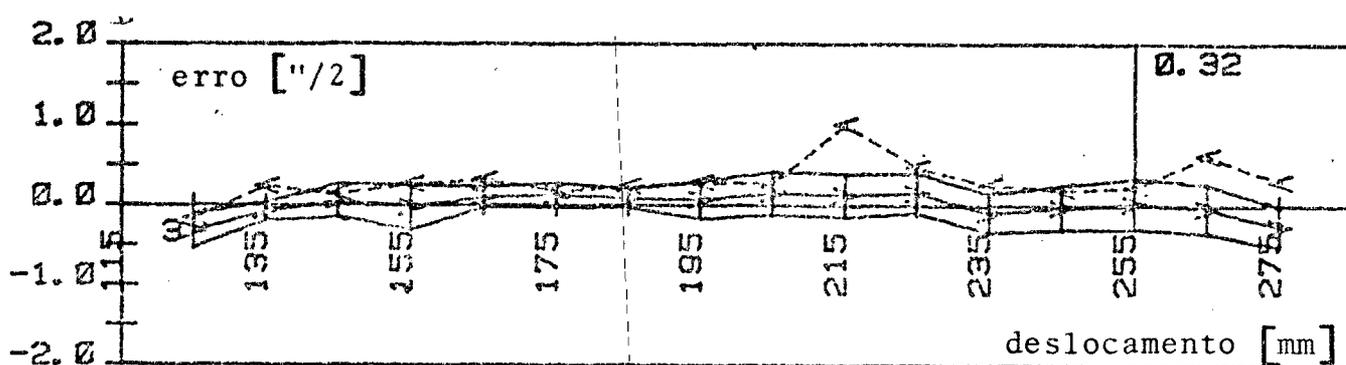
$$\text{PV } 5 = -0,33''$$

$$\text{PV } 4 = 0,06''$$

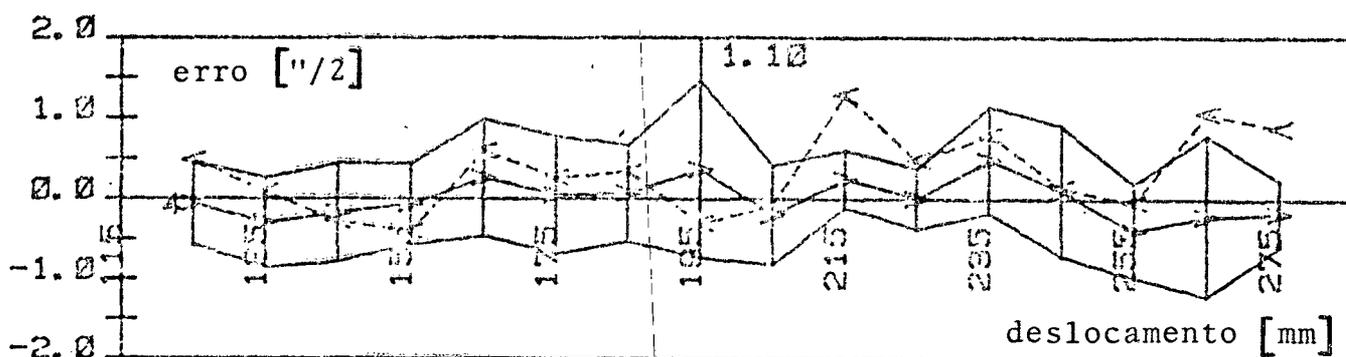
$$\text{PV } 3 = 0,33''$$



(a) - erro sistemático e aleatório angular $dA(x)$ e $sA(x)$. INCL = - 0,0075;
PV = - 0,33.



(b) - erro sistemático e aleatório angular $dB(x)$ e $sB(x)$. INCL = + 0,0047;
PV = + 0,33.



(c) - erro sistemático e aleatório angular $dC(x)$ e $sC(x)$. INCL = - 0,0113;
PV = + 0,06.

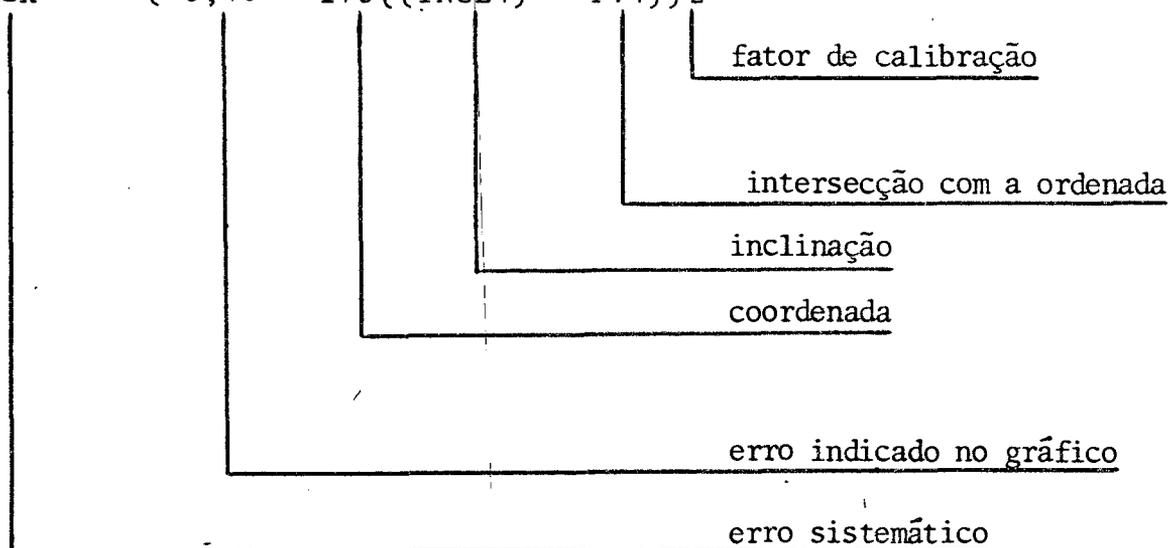
FIGURA 43 - Gráfico dos erros sistemáticos e aleatórios angular, para movimentação da mesa no eixo x .

2º - Resultados: exemplificando o erro sistemático para $x = 175 \text{ mm}$

$$dAx = (-0,50 + 175((INCL5) + PV5))^2$$

$$dBx = (0,30 + 175((INCL3) + PV3))^2$$

$$dCx = (0,40 + 175((INCL4) + PV4))^2$$



Substituindo os valores de "INCL" e "PV" obtêm-se os valores do erro sistemático do movimento angular.

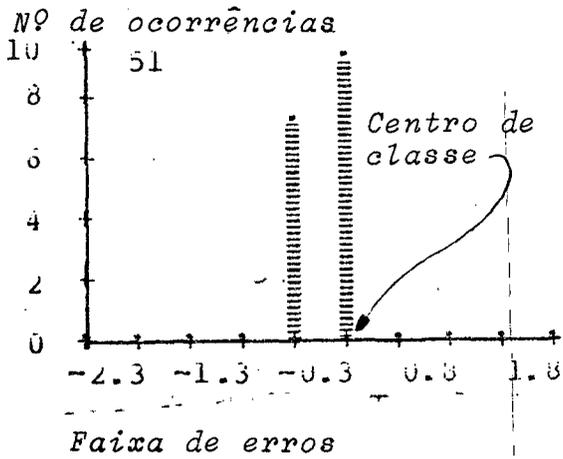
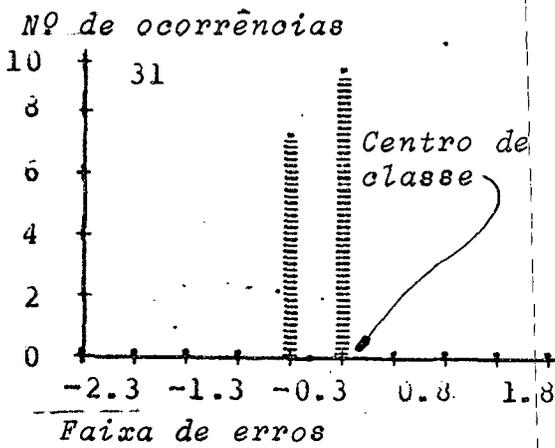
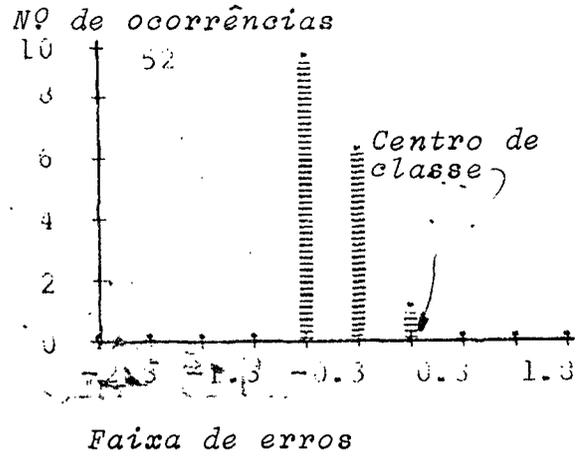
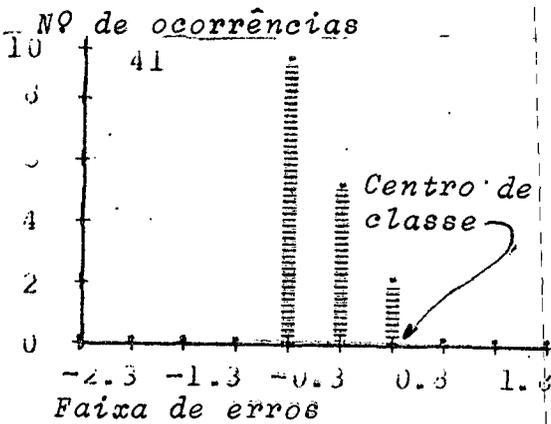
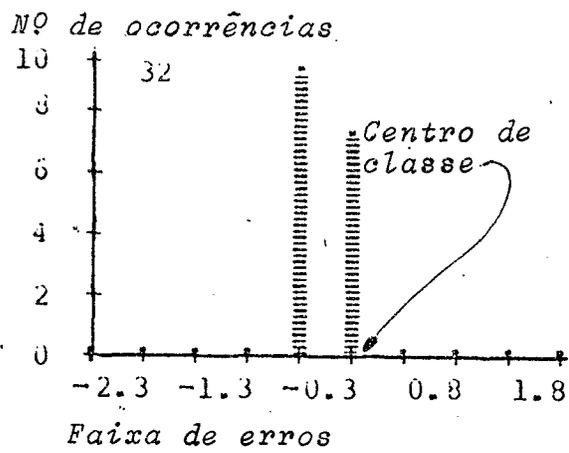
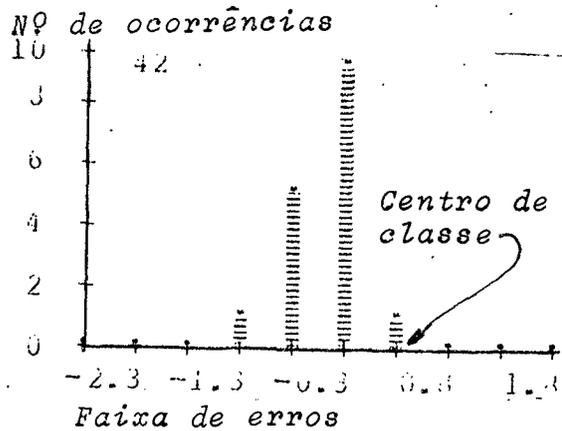
$$dAx = - 4,3''$$

$$dBx = + 2,9''$$

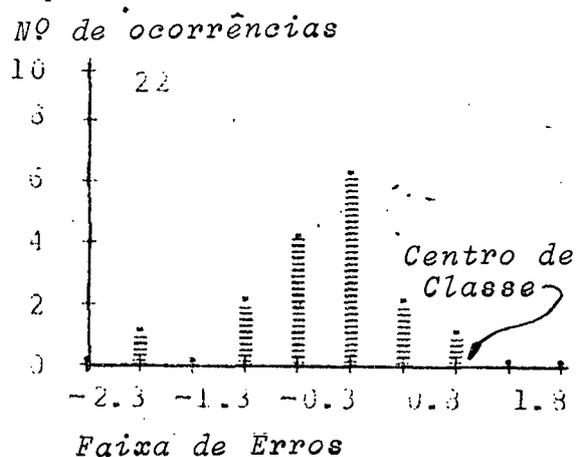
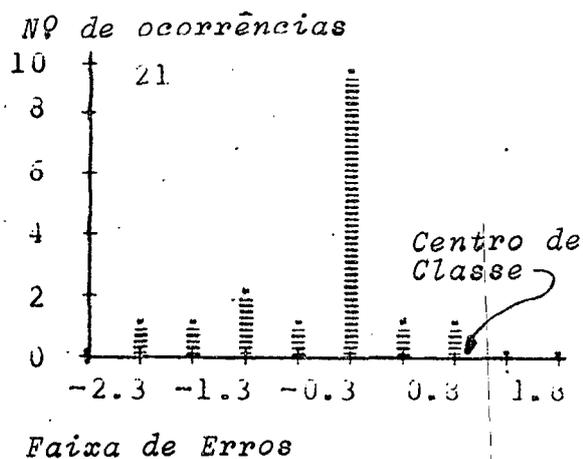
$$dCx = - 3,0''$$

5.3 - Erro aleatório da medição

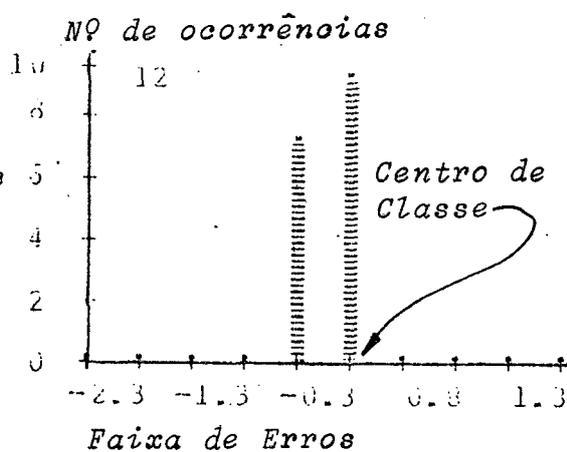
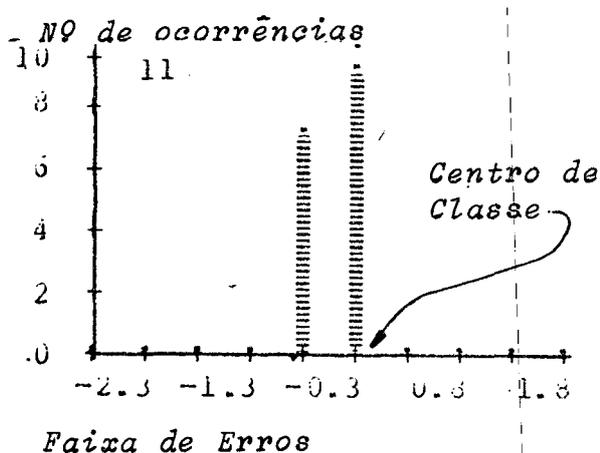
Utilizando a notação: $s_x(x)$ e $s_y(x)$, para o erro aleatório da medição dos movimentos lineares nas direções x , y e z , quando do deslocamento da mesa no eixo x , pelos gráficos da figura 41, tem-se:

(a) - histograma do erro de medição $dA(x)$ (b) - histograma do erro de medição $dB(x)$ (c) - histograma do erro de medição $dC(x)$ FIGURA 44 - Histogramas correspondentes a $dA(x)$, $dB(x)$ e $dC(x)$.

(nº 31 - transdutor nº 3 - ida; nº 32 - transdutor nº 3 - volta;
 nº 41 - transdutor nº 4 - ida; nº 42 - transdutor nº 4 - volta;
 nº 51 - transdutor nº 4 - ida; nº 52 - transdutor nº 5 - volta).



(a) - histograma do erro de medição $dy(x)$.



(b) - histograma do erro de medição $dz(x)$.

FIGURA 45 - Histogramas correspondentes a $dy(x)$ e $dz(x)$, erros de retificação (nº 11 - transdutor nº 1 - ida; nº 12 - transdutor nº 1 - volta; nº 21 - transdutor nº 2 - ida; nº 22 - transdutor nº 2 - volta).

Erro aleatório máximo

$$\text{Incerteza} = \pm 2\sigma$$

$$s_x(x)_{\max} = \pm 3,0 \times 2 = 6,0 \mu\text{m} \quad (P = 95,0\%, n = 5) \text{ em } x = 200 \text{ mm}$$

$$s_y(x)_{\max} = \pm 0,8 \times 2 = 1,6 \mu\text{m} \quad (P = 95,0\%, n = 5) \text{ em } x = 185 \text{ mm}$$

$$s_z(x)_{\max} = \pm 0,5 \times 2 = 1,0 \mu\text{m} \quad (P = 95,0\%, n = 5) \text{ em } x = 125 \text{ mm}$$

Para o erro aleatório de medição dos movimentos angulares, utilizando a notação: $s_A(x)$, $s_B(x)$ e $s_C(x)$, estes são obtidos por processos semelhantes, utilizando os gráficos da figura 43, por:

$$s_A(x)_{\max} = 0,4 \times 2 = 0,8'' \quad (P = 95,0\%, n = 5) \text{ em } x = 185 \text{ mm}$$

$$s_B(x)_{\max} = 0,6 \times 2 = 1,2'' \quad (P = 95,0\%, n = 5) \text{ em } x = 225 \text{ mm}$$

$$s_C(x)_{\max} = 2,2 \times 2 = 4,4'' \quad (P = 95,0\%, n = 5) \text{ em } x = 195 \text{ mm}$$

5.4 - Determinação do ângulo pelo método indireto

Para a determinação do ângulo, pelo método indireto, compara-se os gráficos da figura 41 e 42, obtidos em dois planos definidos pela coordenada z , mantendo a coordenada y , constante ($x = 125 \text{ mm}$).

A figura 41, corresponde aos resultados das medições para $z = 100 \text{ mm}$, próxima a guia, e, na figura 42, estão apresentados os resultados da medição para o segundo plano definido por $z = 400 \text{ mm}$.

Exemplificando a determinação do erro angular pelo método indireto, tem-se:

Para $x = 175$ mm

$$dx(x) = + 1,0\mu\text{m para } z = 100 \text{ mm}$$

$$dx(x) = - 2,0\mu\text{m para } z = 400 \text{ mm}$$

Utilizando a equação do ítem 4.1.4:

$$dBx = \text{arc tg } \frac{dx(x)_1 - dx(x)_2}{z_1 - z_2}$$

tem-se, finalmente:

$$dBx = \text{arc tg } \frac{- 3,0}{300} 10^{-3}$$

$$dBx = 2,0''$$

5.5 - Quadro dos resultados das medições

Baseados nos gráficos e nos cálculos apresentados nos ítems anteriores, pode-se tirar alguns valores característicos dos erros.

Para a movimentação da mesa sobre o eixo x , foram escolhidos, os erros das coordenadas $x = 135$ mm, $x = 175$ mm, $x = 215$ mm e $x = 255$ mm, sendo os mesmos apresentados nas tabelas da figura 46 e 47.

A tabela da figura 47 corresponde aos erros sistemáticos e aleatórios dos movimentos angulares $dA(x)$, $dB(x)$ e $dC(x)$ pela medição direta, pelos equipamentos anteriormente citados; pelo método analítico, citado no capítulo 2; e, pelo método indireto, citado no capítulo 4 deste trabalho.

Ao valor médio corresponde a média dos erros absolutos medidos nas coordenadas especificadas.

E R R O		COORDENADAS				VALOR MÉDIO	VALOR MÁXIMO	OBSERVAÇÕES
		x = 135 mm	x = 175 mm	x = 215 mm	x = 255 mm			
		Nível de medição z = 200 mm em (μm)	POSIC dx(x) RETIL dy(x) RETIL dz(x)	- 1,0 0,0 0,2	1,0 0,5 - 0,1			
Nível de medição z = 400 mm em (μm)	POSIC dx(x) RETIL dy(x) RETIL dz(x)	0,0 - 0,2 0,1	- 2,0 0,5 0,2	- 1,0 1,5 - 0,2	2,0 - 0,2 0,0	1,2 - 0,6 0,1	2,0 - 1,5 - 0,2	erro sistemático
Nível de medição z = 200 mm em (μm)	sx(x) sy(x) sz(x)	2,0 0,7 0,5	2,5 0,7 0,5	2,5 0,5 0,5	1,5 0,5 0,5	2,1 0,6 0,5	3,0 0,8 0,5	erro aleatório (σ)
Nível de medição z = 400 mm em (μm)	sx(x) sy(x) sz(x)	1,0 0,5 0,2	1,0 1,0 0,3	0,5 0,5 0,5	0,5 0,5 0,3	0,7 0,6 0,4	5,2 1,0 0,2	erro aleatório (σ)

FIGURA 46 - Quadro demonstrativo dos resultados da medição (componente linear).

E R R O	COORDENADAS				VALOR MÉDIO	UNIDADE	OBSERVAÇÕES
	x = 135 mm	x = 175 mm	x = 215 mm	x = 255 mm			
1.º) ângulos medidos (em segundos)	dA(x)	- 2,2	- 4,3	- 3,5	- 4,1	segundo	erro sistemático
	dB(x)	1,7	+ 2,8	2,5	+ 2,8		
	dC(x)	- 3,5	- 3,0	- 3,5	- 6,0		
2.º) ângulos determinados indiretamente (em segundos)	dA(x)	- 0,1	1,0	0,0	0,5	segundo	erro sistemático
	dB(x)	1,0	- 2,0	- 1,0	2,0		
	dC(x)	0,0	- 2,0	4,0	- 4,0		
3.º) ângulos determinados analiticamente (em segundos)	dA(x)	0,0	- 0,1	0,5	- 0,5	segundo	erro sistemático
	dB(x)	- 0,5	0,5	0,2	- 0,7		
	dC(x)	0,0	- 0,2	0,5	0,2		
4.º) ângulos medidos (em segundos)	sA(x)	0,1	0,2	0,2	0,2	segundo	erro aleatório (σ)
	sB(x)	0,2	0,4	0,6	0,6		
	sC(x)	0,5	2,0	1,0	1,6		

FIGURA 47 - Quadro demonstrativo dos resultados da medição (componente angular).

5.6 - Análise dos erros em relação a geometria da máquina

Analisando os pontos de apoios da mesa, na forma descrita na figura 23 item 3.4, cujos principais valores ($l_{fxA} = 300$ mm, $l_{fxB} = 400$ mm e $l_{fxC} = 200$ mm) foram listados, verifica-se que:

$$l_{fxC} < l_{fxA} < l_{fxB}$$

Ou seja, o vínculo ao movimento na direção C é menor que na direção A e que por sua vez é menor que na direção B.

Analisando por sua vez os valores dos erros obtidos (figura 47, valores médios) verifica-se que:

$$d_{Cx} > d_{Ax} > d_{Bx}$$

ou seja, o movimento de torção é maior que o de tombamento que por sua vez é maior que o de rolamento.

Isto mostra o relacionamento inverso dos erros em relação aos vínculos, ou seja, quanto maior o vínculo, menor o movimento naquela direção.

5.7 - Análise comparativa dos erros

5.7.1 - Análise dos erros angulares

Considerando que a tolerância de retilineidade pode ser definida para uma máquina na forma

$$g_{xB} \cong g_{xA} \cong g_{xC} = g$$

tem-se que:

$$dA_x = \frac{g_{xA}}{\ell_{fxA}} = \frac{g}{300}$$

$$dB_x = \frac{g_{xB}}{\ell_{fxB}} = \frac{g}{400}$$

$$dC_x = \frac{g_{xC}}{\ell_{fxC}} = \frac{g}{200}$$

Relacionando dA_x , dB_x , dC_x tem-se

$$\frac{dA_x}{dB_x} = \frac{400}{300} = 1,33$$

$$\frac{dC_x}{dB_x} = \frac{400}{200} = 2,0$$

Por outro lado, considerando os valores medidos e listados na coluna "média dos valores" da figura 47, tem-se:

$$\frac{dA_x}{dB_x} = \frac{3,15}{2,18} = 1,44$$

$$\frac{dC_x}{dB_x} = \frac{4,00}{2,18} = 1,83$$

Os valores apresentados entre os valores médios teóricos e medidos, mostram:

- 1 - A validade da teoria apresentada relacionando os erros com as grandezas da máquina.
- 2 - A boa qualidade da máquina cujos erros apresentados estão dentro de uma faixa desejável.

5.7.2 - Análise dos erros de retilidade

Os erros de retilidade dy_x e dz_x estão relacionados segundo as equações da figura 12, respectivamente com

$$\begin{aligned} dy_x & \text{ relacionado com } (dAx, a_{lx}Az) \text{ e } (dCx, a_{lx}Cy) \\ dz_x & \text{ relacionado com } (dBx, a_{lx}Bz) \text{ e } (dAx, a_{lx}Ay) \end{aligned}$$

onde para esta medição a distância da guia ao ponto de medição pode ser definido por:

$$\begin{aligned} a_{lx}Az & = 200 \text{ mm} & a_{lx}Cx & = 100 \text{ mm} \\ a_{lx}Bz & = 100 \text{ mm} & a_{lx}Zy & = 150 \text{ mm} \end{aligned}$$

Com isto, relacionado os valores de dy_x e dz_x tem-se (substituindo os valores de dAx e dBx e dCx da figura 47):

$$\frac{dy_x}{dz_x} = \frac{2 \frac{dAx}{dBx} + \frac{dCx}{dBx}}{1 + 1,5 \frac{dAx}{dBx}} \cong 2,58$$

Por outro lado, o relacionamento entre dy_x e dz_x com os valores medidos diretamente, tem-se:

$$\frac{dy_x}{dz_x} \cong 3$$

Estes resultados mostram mais uma vez a estreita ligação entre os erros lineares e angulares.

5.7.3 - Análise dos erros de posicionamento

Semelhante comparação, aos itens anteriores, foi adotada para o erro de posicionamento relacionando-o com o ângulo médio medido dBx .

Neste caso:

$$dBx \approx 2,18'' \text{ (valor médio)}$$

Por outro lado, medindo dxx em dois níveis distintos ($z = 200 \text{ mm}$ e $z = 500 \text{ mm}$) e calculando:

$$dBx \approx 0,1''$$

Estes dois valores mostram a incompatibilidade entre o método de determinação do erro de posicionamento medido e o calculado.

Este fato pode ser justificado pelos grandes erros aleatórios que surgem no processo de medição (veja sxx da figura 46) cujo valor médio é praticamente o dobro do valor do erro sistemático devido ao tipo de medição discreto feito na medição do erro de posicionamento.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos, conclue-se que:

1º) - A estrutura básica da fresadora mandriladora e seus elementos de movimentação, juntamente com as escalas eletroópticas mostraram as possibilidades de operação como uma M3D.

2º) - A metodologia empregada na determinação das características da máquina, cumprindo os passos:

- a - análise da forma geométrica;
- b - análise dos erros (avaliação analítica);
- c - seleção do local de posicionamento das escalas eletroópticas;
- d - medição dos erros.

Mostrou-se válida, pois os resultados das medições correspondem aos valores calculados analiticamente.

3º) - Os resultados da medição dos erros sistemáticos (faixa $< 5\mu\text{m}$) apresentados pelos movimentos relativos entre o apalpador e a mesa, podem ser considerados suficientemente pequeno em relação aos erros de outras máquinas, mostrando a capacitação desta fresadora mandriladora a funcionar como M3D. Estes resultados mostram a validade da procura de aproximação da guia e do instrumento de medição da linha de medição.

CAPÍTULO VII

RECOMENDAÇÕES

A ênfase dos estudos realizados, leva a sugerir algumas recomendações, quais sejam:

1º) - A construção do sistema de medição, para o eixo z, segundo o projeto desenvolvido no ítem 3.3.3, deste trabalho;

2º) - A realização dos ensaios para toda a máquina, discreta e simultaneamente, incluindo a movimentação sobre o eixo z, com o intuito de determinar a característica, total da M3D.

3º) - A determinação da relação entre a medição contínua e a discreta;

4º) - A determinação da influência da mudança do plano nas características da medição, com a análise da influência (peso) do mecanismo, de sustentação e de mudança dos planos, nos resultados;

5º) - O estudo dos erros apresentados pelos instrumentos de medição;

6º) - A verificação do comportamento da M3D, com o decorrer do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- |1| SCHNEIDER, C.A. Máquinas de medir. Publicação interna LABMETRO - UFSC, 1981.
- |2| DIETZSCH, M., et LANG, H. Komparatorfehler bei mehrkoordinaten meßgeräten. Wtz. ind Fertigung, 67, p. 277-281, 1977.
- |3| VEB MIKROMAT DRESDEN, Instrucciones de servicio; taladradora por coordenadas de um solo montante, BKOE 315 x 500. Dresden, 1969.
- |4| HEINDENHAIN, J. Heidenhain 5041, Numerische Positionsanzeige, Bundersrepublik Deutschland, 1977.
- |5| HEINDENHAIN, J. Mounting Instructions, LS 701, Sealed, incremental length measuring systems, West Germany, 1978.
- |6| BREYER, K.H., et LENZ, K.J., Genauigkeit Von Drei Koördinaten Meßgeräten, Werkstatt und Betrieb, 112, p. 673-680, 1979.
- |7| RANK PRECISION INDUSTRIES LTD. "Optical Alignment". Leicester. England, 1973.
- |8| LÜCKE, H.A.H., Laser autocolimador. Publicação Interna LABMETRO - UFSC, 1981.
- |9| LÜCKE, H.A.H., SCHNEIDER, C.A. Emprego de sistemas de aquisição de sinais. COBEM, 1979.

- [10] LÜCKE, H.A.H., SCHNEIDER, C.A. Aplicação de um sistema de aquisição de sinais para a calibração dos transdutores, COBEM, 1979.

- [11] LÜCKE, H.A.H. Programação para SAS. Publicação interna LABMETRO - UFSC, 1981.

- [12] NEVILLE, A.M., et KENNEDY, J.B. Basic statistical methods for engineers and scientists. International textbook company. USA, 1964.

- [13] SCHNEIDER, C.A., et LÜCKE, H.A.H. Curso de metrologia. Publicação interna LABMETRO - UFSC, 1981.