

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

ENSAIOS GEOMÉTRICOS DE PEÇAS E MÁQUINAS
- UMA METODOLOGIA AUTOMATIZADA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

ALEXANDRE DIAS DA SILVA

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1984

ENSAIOS GEOMÉTRICOS DE PEÇAS E MÁQUINAS

- UMA METODOLOGIA AUTOMATIZADA -

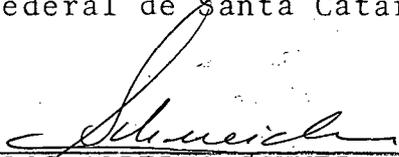
ALEXANDRE DIAS DA SILVA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de:

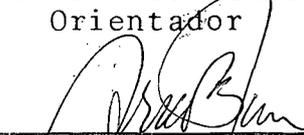
"MESTRE EM ENGENHARIA"

Especialidade ENGENHARIA MECÂNICA - área de concentração FABRICAÇÃO
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
da Universidade Federal de Santa Catarina.



PROF. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr.-Ing.
Orientador



PROF. ARNO BLASS, Ph. D.
Coordenador do Curso

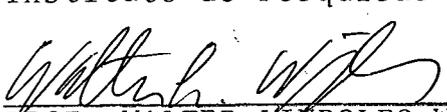
Apresentada perante a banca examinadora composta por:



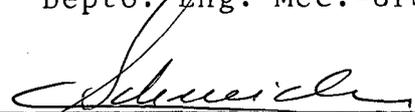
PROF. NELSON BACK, Ph. D.
Depto. Eng. Mec.-UFSC



WALTER LINK, Eng. Mec.
Diretor da Divisão de Engenharia Mecânica do
Instituto de Pesquisas Tecnológicas.



PROF. WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER, Dr.-Ing.
Depto. Eng. Mec.-UFSC



PROF. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr.-Ing.
Depto. Eng. Mec.-UFSC

Aos meus pais
Aos meus padrinhos
À minha esposa
Ao meu filho

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Alberto Schneider pela orientação e dedicação na realização deste trabalho;

Aos engenheiros Reinaldo Stuart Júnior, Lúcio João Marcon e Luiz Veriano Oliveira Dalla Valentina e ao acadêmico Ilmar Borchardt pela valiosa ajuda na parte experimental;

À Suêd Nazaré dos Santos pela datilografia, Elizabete Vieira de Andrade, Dietmar Kiefer, Günter Pfeiffer e José G. Nunes Costa pela confecção das figuras e montagem deste trabalho;

Ao pessoal do LABMETRO, que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho;

Aos pós-graduandos que passaram pelo LABMETRO no mesmo período em que este trabalho foi desenvolvido, pelo coleguismo ;

Aos colegas de curso Álisson Rocha Machado, Américo Scotti e Luiz Airton Consalter, pelo companheirismo;

À Faculdade de Engenharia de Joinville, pelo apoio para conclusão deste trabalho;

À Comissão Nacional de Energia Nuclear CNEN, pela concessão da bolsa.

ÍNDICE

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
GLOSSÁRIO	iii
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - A precisão geométrica	1
1.2 - Verificação de máquinas	4
1.2.1 - Verificação pelo método da peça padrão.	4
1.2.2 - Verificação pelos ensaios geométricos..	6
1.3 - Proposta do trabalho	7
2 - OS ENSAIOS GEOMÉTRICOS	8
2.1 - Classificação geral	8
2.2 - Retilidade	9
2.2.1 - Retilidade de uma linha	9
2.2.2 - Retilidade de uma trajetória	14
2.3 - Circularidade	18
2.4 - Posicionamento	20
2.5 - Inclinação	23
2.6 - Ensaio de elementos através de combinações de ensaios básicos de sub elementos	25
2.6.1 - Planicidade	25
2.6.2 - Cilindricidade e esfericidade	27
2.7 - Posição relativa de elementos	28
2.7.1 - Paralelismo	28
2.7.2 - Alinhamento	30
2.7.3 - Ortogonalidade	32
2.7.4 - Equidistância	35
3 - METODOLOGIA AUTOMATIZADA PARA ENSAIOS GEOMÉTRICOS....	37
3.1 - Diretrizes gerais	37
3.2 - Critérios de escolha do sistema computacional .	38
3.3 - Estrutura global do programa	40
3.4 - Etapa de definição do trabalho	40
3.5 - Controle do ensaio e aquisição de dados	44

3.5.1 -	Leitura e indicação contínua	44
3.5.2 -	Parâmetros referentes ao sistema de medição	44
3.5.3 -	Aquisição simultânea	46
3.5.4 -	Registro e verificação da coerência das medidas	47
3.5.5 -	Armazenamento dos dados	47
3.6 -	Processamento básico	48
3.6.1 -	Valor médio	48
3.6.2 -	Variação	48
3.6.3 -	Incerteza do resultado	49
3.7 -	Processamento específico	50
3.7.1 -	Ensaio de retilineidade	50
3.7.2 -	Ensaio de posicionamento	55
3.7.3 -	Ensaio derivados da retilineidade	56
3.7.4 -	Recursos especiais	57
3.8 -	Documentação	62
3.8.1 -	Memorial de ensaio	62
3.8.2 -	Dados brutos e processados	62
3.8.3 -	Documentação específica	63
3.9 -	Aspectos operacionais	66
4 -	APLICAÇÕES	69
4.1 -	Trajetória da ferramenta em uma fresadora mandriladora de precisão	69
4.2 -	Ensaio de planicidade de um desempenho	76
4.3 -	Movimentos em um torno com CN	79
4.4 -	Ensaio de retilineidade com superposição	86
4.5 -	Alinhamento de barras	87
4.6 -	Retilineidade de uma régua padrão	90
5 -	CONCLUSÕES	92
6 -	REFERÊNCIAS	97

RESUMO

Através da sistematização das etapas de aquisição, processamento e documentação dos dados relativos aos ensaios geométricos, estabeleceu-se um procedimento automatizado, que reduz ou elimina fatores responsáveis pela morosidade na realização convencional dos ensaios, os quais são: o levantamento dos dados e a complexidade do processamento e da documentação dos resultados. O excessivo tempo de execução e conseqüentemente elevado custo constitui até o presente a maior restrição às aplicações práticas dos ensaios geométricos apesar da reconhecida validade das informações por eles gerados. A metodologia desenvolvida e implantada em um minicomputador de processo soluciona o problema e permitindo inclusive a realização simultânea de diversos ensaios, reduzindo ainda mais o tempo de execução e aumentando a capacidade de identificação de causas de erros.

Aplicações práticas apresentadas para o sistema, mostram que a automatização dos ensaios geométricos eleva significativamente a potencialidade dos mesmos, no que concerne a capacidade de qualificação de máquinas-ferramenta, máquinas de medir, dispositivos, bem como de componentes mecânicos que exigem uma geometria com pequenas tolerâncias de forma.

ABSTRACT

Through the systematization of the stages of data acquisition, processing and documentation related to the geometrical tests, an automatized procedure was set up. This procedure reduces or eliminates the factors responsible for the slowness in the conventional accomplishment of the tests that are: the data gathering and the complexity of the processing and documentation of the results. The excess time of execution and consequently high cost constitutes up to now the major restriction to the practical applications of the geometrical tests, no matter the acknowledged validity of the information that they generate. The methodology used and introduced in a process microcomputer solves the problem and even allows for the simultaneous accomplishment of several tests, thus reducing even more the time of execution and increasing the errors' source identifying capacity.

Practical applications presented to the system show that the automation of the geometrical tests increases significantly their potential concerning the qualification capacity of machine tools, measuring machines, devices, as well as mechanic components which require a geometry with small tolerances of shapes.

G L O S S Á R I O

AFASTAMENTO: distância (ou variação da distância) entre o elemento sob ensaio e um padrão, em dada posição de medição.

ALINHAMENTO: ensaio geométrico que determina os erros de posição de elementos em relação a uma reta de referência.

CICLO DE MEDIÇÃO: corresponde a um conjunto de leituras/medidas obtidas nas posições de medição ao longo do elemento sob ensaio, posições estas, alcançadas numa seqüência pré-definida, inclusive quanto ao sentido de aproximação ao ponto de medição.

CILINDRICIDADE: ensaio geométrico que determina os erros de um elemento em relação a forma cilíndrica.

CIRCULARIDADE: ensaio geométrico que determina os erros de um elemento em relação a forma circular.

DADOS BRUTOS: conjunto de todas as leituras obtidas em um ensaio, isentas de um processamento relativo ao ensaio.

DADOS PROCESSADOS: conjunto de valores resultantes de um processamento, obtidos a partir dos dados brutos.

EIXO: elemento geométrico estabelecido por pontos particulares (centro de furo, ponto de simetria) de componentes de um sistema mecânico.

ELEMENTO: unidade geométrica (linha, eixo, trajetória, etc.) associada ao corpo/sistema, cuja forma/comportamento geométrico real deve ser determinado através do ensaio.

EQUIDISTÂNCIA: ensaio geométrico que determina a variação do afastamento entre pontos de medição correspondentes de dois elementos.

ERRO: diferença entre o valor da grandeza (medida) e o valor ideal da mesma (medida ideal).

ERRO GLOBAL: parâmetro que indica o máximo erro de geometria do elemento.

ESFERICIDADE: ensaio geométrico que determina os erros de um elemento em relação a forma esférica.

GUINAMENTO: movimento angular de um corpo em torno do eixo normal ao plano em que a base do mesmo se movimenta.

HISTERESE: diferença entre as medidas determinadas na aproximação em sentido decrescente e crescente a uma posição de medição.

INCLINAMENTO: ensaio geométrico que determina as variações angulares de um corpo em movimento.

LEITURA: valor fornecido pelo sistema de medição, correspondente a um valor da grandeza a medir.

LINHA: elemento definido pela intersecção da superfície de uma peça com um plano qualquer.

MEDIDA: valor obtido pela aplicação dos parâmetros do instrumento à leitura e expresso por um número acompanhado da unidade da grandeza a medir.

PADRÃO: elemento geométrico (reta, plano, circunferência, etc.) estabelecido pelo sistema de medição para comparação com o elemento sob ensaio.

PARALELISMO: ensaio geométrico que determina os erros de posição paralela entre dois ou mais elementos.

PLANICIDADE: ensaio geométrico que determina os erros de um elemento em relação a forma plana.

POSICIONAMENTO: ensaio geométrico que determina os erros de posição entre as posições de medição de um elemento. Em geral o ensaio determina os erros de posição do ponto em um corpo segundo a direção de sua trajetória.

REFERÊNCIA: elemento com a forma geométrica ideal (reta, plano, círculo, etc) ao qual são referenciados os erros atribuídos ao elemento.

RETILINEIDADE: ensaio geométrico que determina os erros de um elemento em relação a forma reta.

ROLAMENTO: movimento angular de um corpo em torno do eixo transversal à direção do movimento e contido no plano de movimento da base deste.

SENTIDO CRESCENTE/DECRESCENTE. sentido de medição ao longo de um elemento de acordo com valores coordenados crescentes/decrecentes do sistema de coordenadas adotado.

TOMBAMENTO: movimento angular de um corpo em torno do eixo dada pela direção do movimento.

TRAJETÓRIA: elemento geométrico definido pelas posições ocupadas por um corpo em movimento no espaço.

VARIAÇÃO: valores que acrescidos ao valor base dão a faixa de valores em que se encontra, o valor verdadeiro da grandeza a medir.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - A precisão geométrica

O desenvolvimento e aperfeiçoamento dos processos de usinagem é decorrência da necessidade de se obter peças com dimensões, formas e acabamento superficial, dentro de faixas de tolerâncias cada vez mais estreitas, para garantir maior segurança e rendimento aos sistemas mecânicos. Para que as exigências de projeto sejam garantidas, faz-se necessária a verificação das peças produzidas, antes porém, é importante assegurar a qualidade dos sistemas produtivos.

A usinagem é um processo de larga utilização na geração de componentes mecânicos, para o qual são utilizadas máquinas-ferramenta, que devem, cada vez mais, associar alta produtividade com qualidade de fabricação. A verificação da máquina, quanto ao seu comportamento geométrico deve ser realizada para confirmação de sua qualidade.

O processo de usinagem é caracterizado, de um modo geral pelo movimento relativo entre peça e ferramenta de corte. Um ponto, aresta ou superfície de referência da ferramenta percorre, portanto, uma trajetória dentro do campo de trabalho da máquina. Caso exista uma diferença entre a trajetória real e a ideal, provoca-se sobre a peça um erro geométrico.

Segundo a figura 1.1, o erro da trajetória em um ponto qualquer será caracterizados pelos desvios lineares dx , dy , dz e pelos desvios angulares $d\alpha$, $d\beta$ e $d\gamma$ [1].

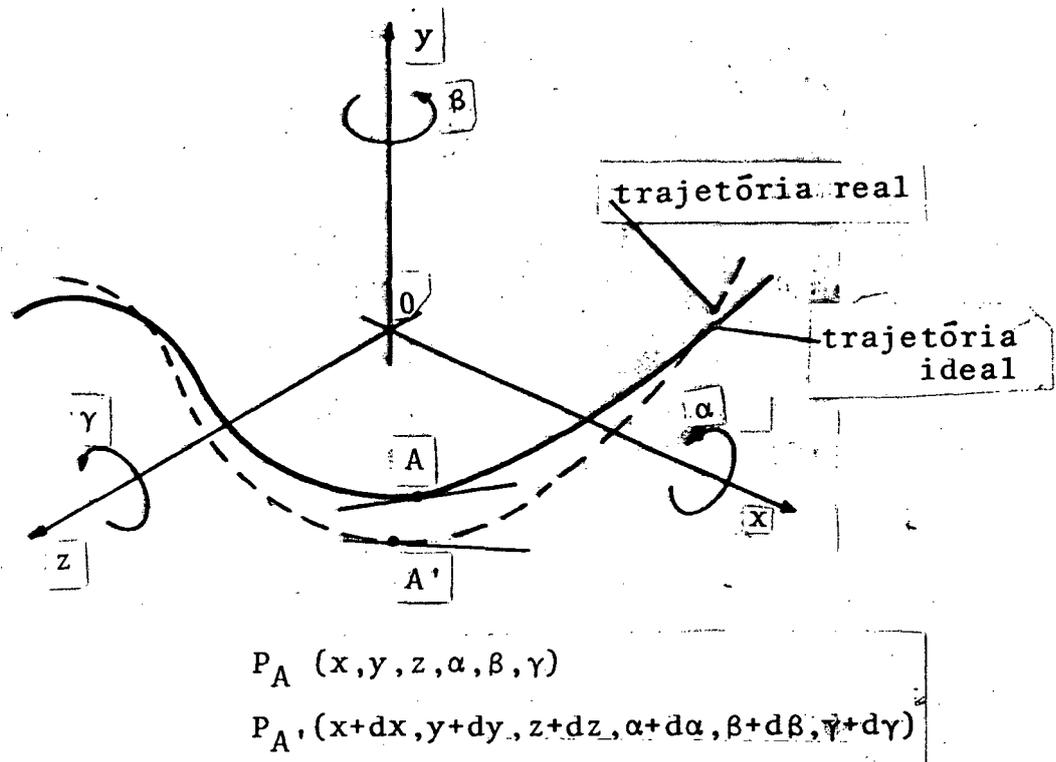


FIG. 1.1 - Componentes do erro de um ponto de uma trajetória no espaço.

A figura 1.2 representa o mecanismo de movimento de uma máquina-ferramenta segundo um de seus eixos [2]. Além do erro de posicionamento na direção de movimento, o elemento que se desloca pode sofrer movimentos indesejáveis segundo os outros eixos. Estes erros podem surgir por falhas existentes nas guias, na posição relativa entre superfícies das guias, por folgas entre componentes que participam do deslocamento ou acionamento, por deformações mecânicas causadas por forças (de corte, peso próprio, peso das peças) ou também por deformações térmicas.

Tem-se assim, para cada eixo de movimento da máquina, seis componentes de erros. Para o caso particular da figura 1.2 são:

- d_x - erro de deslocamento na direção x (posicionamento)
- d_z - deslocamento na direção horizontal (retilíneidade)

d_y	- deslocamento na direção vertical	(retilineidade)
d_α	- deslocamento angular em torno do eixo x	(tombamento)
d_β	- deslocamento angular em torno do eixo y	(guinamento)
d_γ	- deslocamento angular em torno do eixo z	(rolamento)

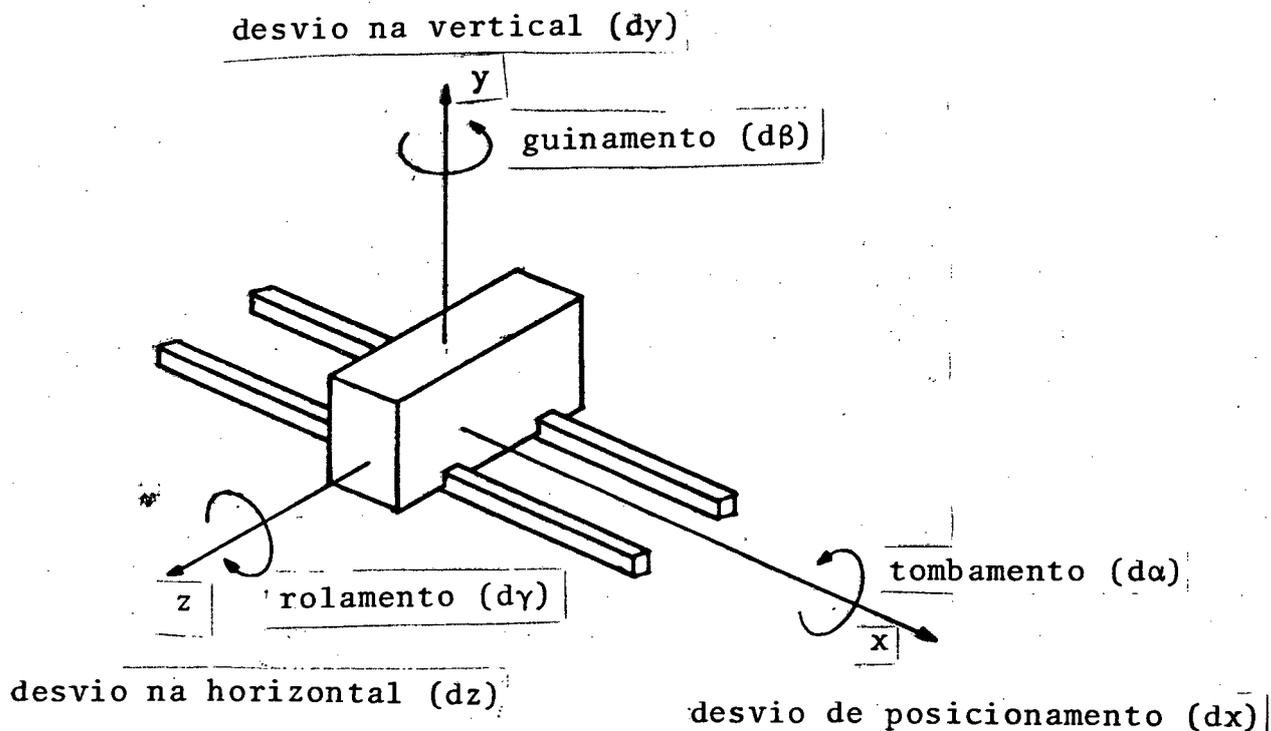


FIG. 1.2 - Erros para o deslocamento na direção x.

As guias de um torno (fig. 1.3), por exemplo, devem possuir superfícies de elevada planicidade (retilineidade), alinhadas segundo a direção de deslocamento do carro e paralelas entre si, bem como, satisfazer outras exigências, para que a trajetória da ferramenta corresponda a trajetória ideal. Estas exigências devem garantir que os erros de movimento da ferramenta estejam em faixas de tolerância inferiores às tolerâncias das peças que serão produzidas.

tipo e geometria da ferramenta, condições de corte, dispositivos de fixação e especialmente das técnicas de medição. A figura 1.4a mostra uma peça padrão, para aplicação do método a um torno, onde através das medições da peça nas posições indicadas na figura 1.4b, pode-se avaliar, por exemplo, o comportamento da máquina quanto ao posicionamento da ferramenta, bem como, quanto a retilidade e/ou ortogonalidade de suas trajetórias.

Este método pode apresentar dificuldades em correlacionar os erros da peça com os erros da máquina e também, por razões econômicas, a verificação é restrita a uma parte do campo de trabalho da máquina, o que, no entanto, não é desvantagem quando se trata de uma máquina-ferramenta dedicada. (exemplo: torno automático).

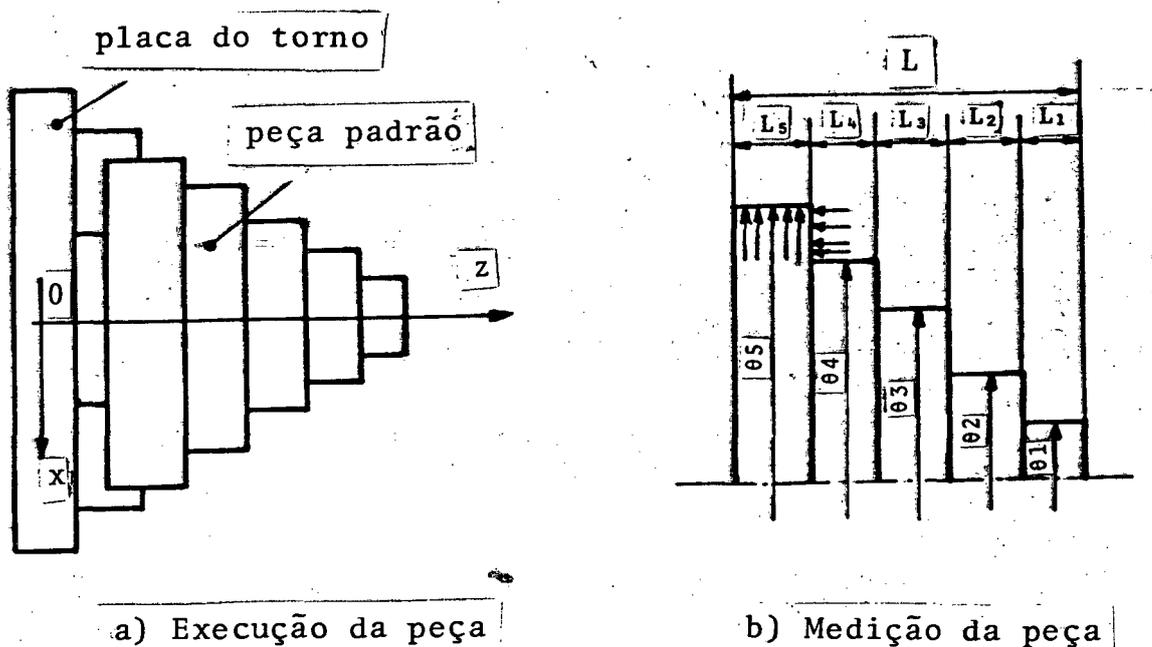


FIG. 1.4 - Verificação de máquina pelo método da peça padrão.

1.2.2 - Verificação pelos ensaios geométricos

A verificação de máquinas ferramenta por este método consiste em prever o desempenho da máquina através do controle de forma e dimensão de seus componentes durante a fabricação e montagem, e, principalmente, no controle dos movimentos executados pela peça e/ou ferramenta no campo de trabalho da máquina.

Durante a fabricação de uma máquina-ferramenta, ensaios geométricos dos componentes são realizados individualmente e a máquina é ensaiada durante e ao final da montagem. Máquinas de médio e grande porte, geralmente necessitam ser, em parte, desmontadas para facilitar o transporte e novamente montadas em seus locais definitivos de trabalho, exigindo novos ensaios. Uma vez entregue e instalada realiza-se o teste de recepção da máquina, para que haja uma confirmação das características especificadas pelo fabricante. Os ensaios geométricos devem também ser repetidos periodicamente para verificação da qualidade geométrica da máquina em função de possíveis ocorrências de desgastes, deformações permanentes nas partes mais solicitadas da máquina, alteração nas condições de apoio (fundamentos), etc. Os valores dos erros constatados podem ser utilizados na realização de ajustes e/ou compensação automática, melhorando a qualidade da máquina [1].

Os ensaios geométricos são realizados normalmente com a máquina em vazio, de modo que não se consideram as deformações e lásticas que os esforços de usinagem poderiam provocar durante uma operação. Estes esforços, em função do avanço e da profundidade de corte reduzidos, são menores na operação de acabamento, que define as dimensões e formas das peças, e por consequência são pequenas as deformações que podem afetar as características da máquina. Se necessário for, estas forças podem também ser simuladas durante os ensaios.

Em relação ao método da peça padrão, os ensaios geométricos apresentam a grande vantagem de possibilitar a medição em todo o campo de trabalho e permitir uma melhor identificação das fontes de erro da máquina, além da menor necessidade de material de consumo (material da peça padrão), porém apresentam a desvantagem da morosidade na etapa de preparação, em função da montagem

dos instrumentos de medição, na etapa de execução do ensaio, em função do grande número de dados a registrar, e na etapa de documentação em função da complexidade do processamento e da necessidade de documentação gráfica adequada para análise dos resultados.

1.3 - Proposta do trabalho

Através da automatização do procedimento de ensaio, pretende-se racionalizar a realização dos ensaios geométricos pelos métodos convencionais, reduzindo os fatores responsáveis pela morosidade e conseqüente elevação dos custos, que são o levantamento dos dados e a complexidade no processamento e documentação dos dados. Por um lado procurar-se-á reduzir o tempo de execução e por outro, através de recursos complementares, aumentar a potencialidade dos ensaios de peças e máquinas, elevando a capacidade de identificação de erros e suas causas. Para alcançar os objetivos, o plano de trabalho consta das seguintes etapas:

a) Estudo dos ensaios:

Através de um estudo detalhado dos ensaios geométricos, pretende-se observar aspectos semelhantes que eles apresentam entre si, em todas as suas etapas de execução, ou seja, na aquisição de dados, no processamento destes valores e na documentação dos dados brutos e processados.

b) Automatização:

Uma sistematização dos ensaios permitirá criar uma metodologia universal, possibilitando a automatização através de um sistema computacional.

c) Testes de aplicação:

Aplicações práticas do sistema desenvolvido serão realizadas para testar a metodologia proposta e avaliar as vantagens da automatização dos ensaios.

2 - OS ENSAIOS GEOMÉTRICOS

2.1 - Classificação geral

Por ensaios geométricos subentende-se a verificação da macrogeometria dos seguintes elementos:

- superfícies / linhas
- eixos
- trajetórias

Superfície é o limite físico de uma peça, que pode ser analisada como um todo ou apenas segundo uma ou mais linhas definidas pela intersecção desta superfície com elementos geométricos, em geral, um plano perpendicular a ela (ex.: linha sobre a superfície de trabalho de um desempenho, definida pela intersecção de um plano perpendicular).

Como eixo entende-se o elemento estabelecido por uma série de lugares geométricos de um sistema mecânico ou peça (ex.: centro dos mancais do bloco de um motor, ponta e contra-ponta de um torno), ou pelo lugar geométrico estabelecido pelo movimento de uma peça (ex.: eixo de rotação da placa de um torno).

Trajetoária é o elemento geométrico definido pelas posições ocupadas por um elemento físico em movimento no espaço (ex.: trajetória da ponta da ferramenta em um torno).

Os elementos mencionados podem ser ensaiados:

a) considerando-os quanto a:

- retilineidade
- circularidade
- planicidade
- cilindricidade
- esfericidade
- posicionamento
- inclinamento

b) considerando a posição relativa entre eles;

- paralelismo
- alinhamento
- ortogonalidade
- equidistância

Dentre os ensaios geométricos identificam-se ensaios básicos que são: retilineidade, circularidade, posicionamento e inclinação. Os demais ensaios podem ser derivados destes através de combinações sob condições especiais.

Os ensaios serão analisados e descritos neste capítulo com enfoque na verificação de componentes e movimentos de máquinas-ferramenta e considerando que os instrumentos de medição utilizados são ideais, ou seja, não apresentam erros, nem restrições operacionais.

A definição de cada parâmetro dos ensaios geométricos e a terminologia associada, serão apresentados na medida que forem sendo necessárias para a descrição dos mesmos, deixando-se, no entanto, de se rerepresentar os mesmos quando aplicáveis aos ensaios descritos subsequentemente.

Na medida do possível, quando existir disponibilidade, serão tomados como base os conceitos e parâmetros fixados pela norma ISO [4], ABNT [5] e também os explicitados em [6].

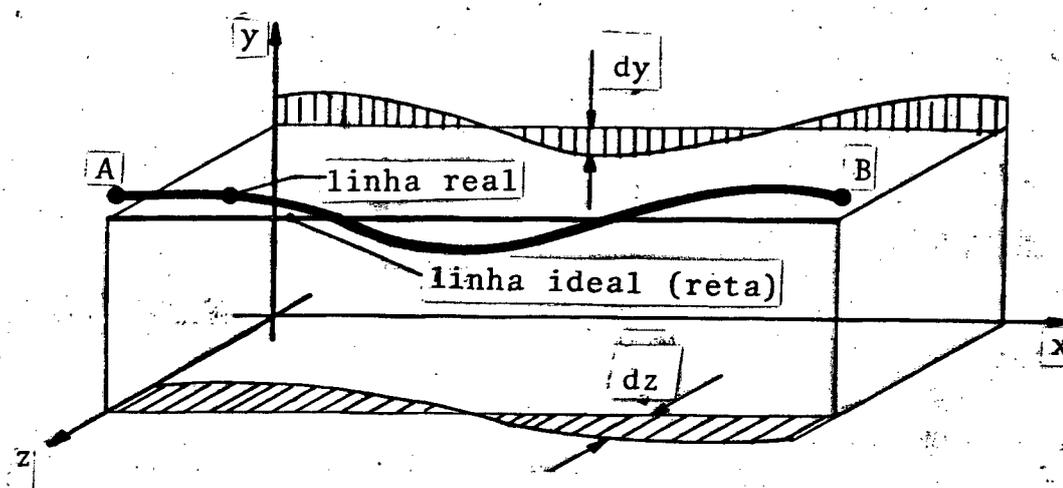
2.2 - Retilineidade

A distância de cada ponto de um elemento à sua posição ideal, caracterizada por uma reta, constitui o erro de retilineidade. O elemento considerado pode ser uma linha da superfície de uma peça ou trajetória de um ponto de um corpo em movimento.

2.2.1 - Retilineidade de uma linha

Os erros de retilineidade de uma linha são apresentados normalmente nas suas componentes segundo dois planos perpendiculares entre si e paralelos à direção da linha ideal (fig. 2.1), proporcionando uma perfeita caracterização da geometria real da linha analisada. Para facilidade de interpretação toma-se, normalmente, os planos horizontal e vertical e os erros são dados em relação a reta de referência (linha ideal) que pode ser escolhida de diferentes maneiras. Uma possibilidade é adotar a reta de regressão, ou seja, a que melhor se ajusta aos afastamentos medidos obtida segundo o método dos mínimos quadrados. Outra ma

neira é tomar como reta de referência a reta que passa por dois pontos conhecidos, como por exemplo, os pontos de apoio da peça onde arbitra-se como nulos os desvios, conforme mostra a figura 2.2.



dy - erro de retilidade na direção y
 dz - erro de retilidade na direção z

FIG. 2.1 - Componentes ortogonais de desvio da retilidade de uma linha

Tratando-se de peças, normalmente, define-se a reta de referência em relação a dois pontos; visto que desta forma consegue-se facilmente relacionar a estes pontos de referência, os erros determinados em outras posições. Em alguns casos adota-se para peças a reta de regressão como reta de referência.

Para a determinação dos erros de retilidade, são medidos os afastamentos relativos de pontos da linha a ser verificada a uma reta padrão, definida pelo sistema de medição utilizado. Existe uma não coincidência entre a posição da reta padrão e a reta de referência sendo esta diferença definida como erro de alinhamento do padrão, caracterizado pelos coeficientes angular $\text{tg}\theta$ e linear D (fig. 2.2).

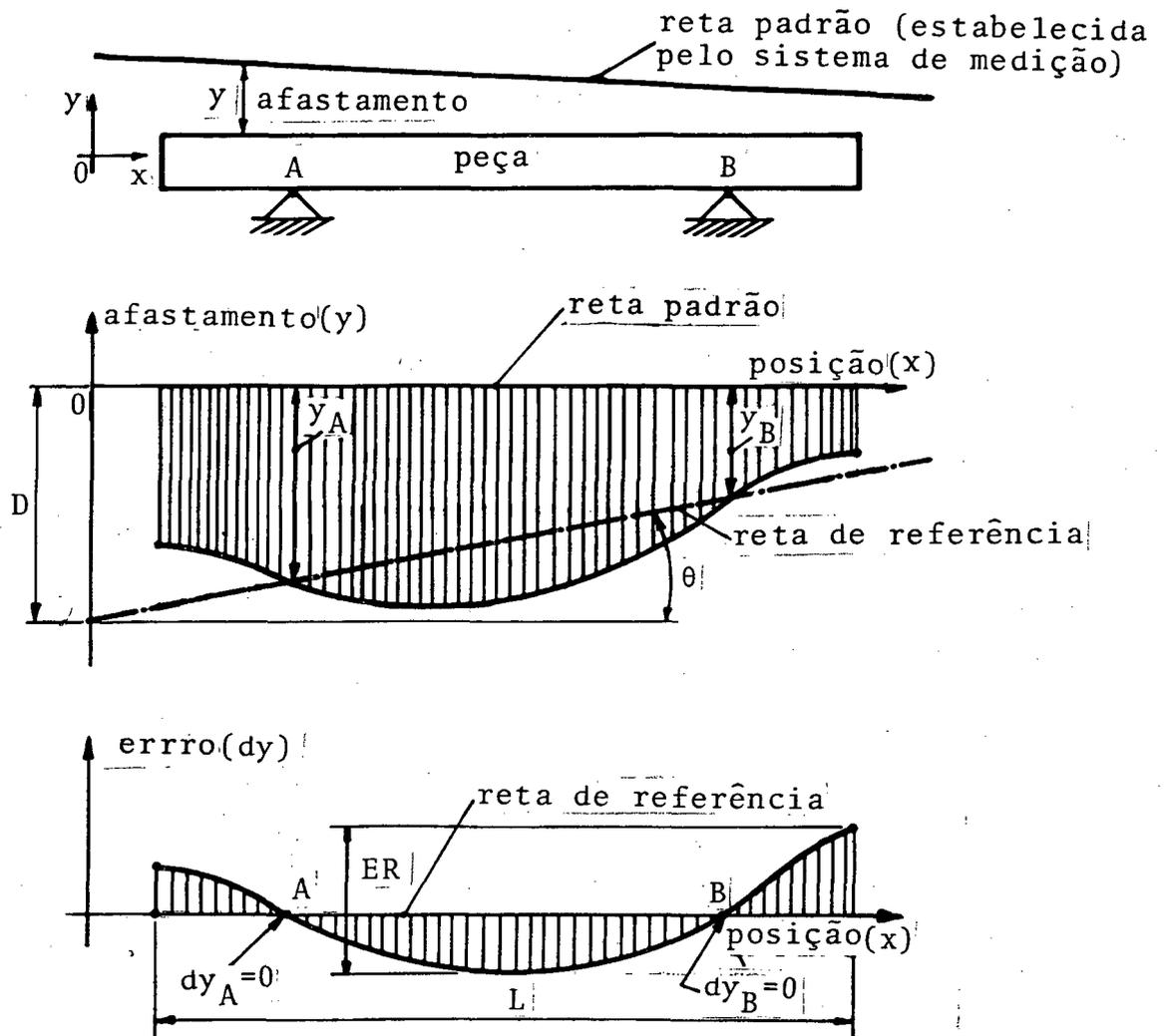


FIG. 2.2 - Erros de retilidade segundo um plano ortogonal à superfície da peça

Os erros de retilidade de uma linha são melhor apresentados de forma gráfica, por permitir maior facilidade de interpretação da forma da linha analisada. É necessário, porém, que o resultado do ensaio e/ou tolerâncias de fabricação possam ser apresentadas de forma reduzida, pelo erro global de retilidade que pode ser assim calculado:

a) método independente: é dado pela distância entre duas retas paralelas posicionadas de maneira que contenham todos os erros e que a distância entre elas seja a mínima possível. Este valor de ER é determinado por tentativa no gráfico dos afastamentos (fig. 2.3) e caracteriza-se por apresentar o menor valor de ER.

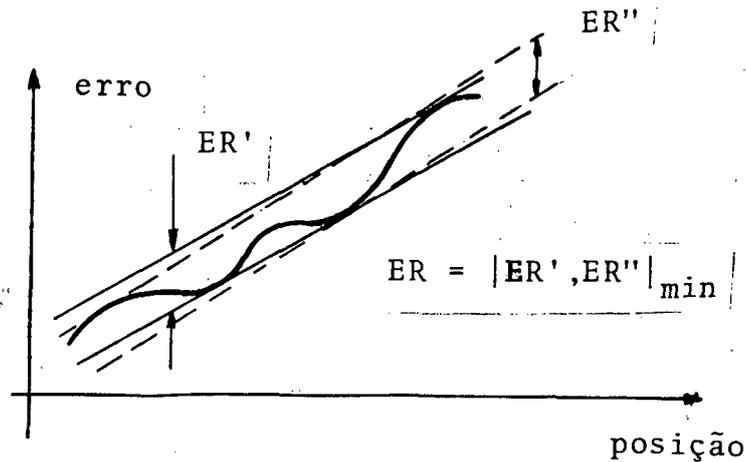


FIG. 2.3 - Determinação gráfica do erro global de retilidade - método independente

b) método dependente: é dado pela distância entre duas retas paralelas à reta de referência e tangentes aos desvios máximos. Neste método pode-se chegar a valores distintos para ER, dependendo da forma de definição da reta de referência (fig. 2.4). O erro global de retilidade pode ser subdividido nos erros máximos positivo (ER^+) e negativo (ER^-) que correspondem a distância da reta de referência à reta tangente aos erros máximos positivo e negativo, respectivamente.

O erro global de retilidade na forma reduzida só tem significado se é referido a um comprimento L de ensaio, ou seja:

$$\text{Erro de retilidade} = ER \text{ em } L$$

exemplo:

$$ER = 9 \text{ } \mu\text{m em } 1,5 \text{ m}$$

ou

$$ER^+ = 4 \text{ } \mu\text{m em } 1,5 \text{ m}; ER^- = -5 \text{ } \mu\text{m em } 1,5 \text{ m}$$

ou também por unidade de comprimento.

$$ER = 9 / 1,5 = 6 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Com ER tem-se apenas uma informação compacta sobre a retilidade do elemento verificado, não sendo possível identificar, por exemplo, as posições onde aparecem os erros máximos, ou a forma como se apresentam ao longo da linha. A tolerância de fabricação quanto a retilidade normalmente é dada apenas por

RR - reta de referência
 RR(mm_q) - obtida pelo método dos
 mínimos quadrados
 RR(2p) - definida por dois pontos

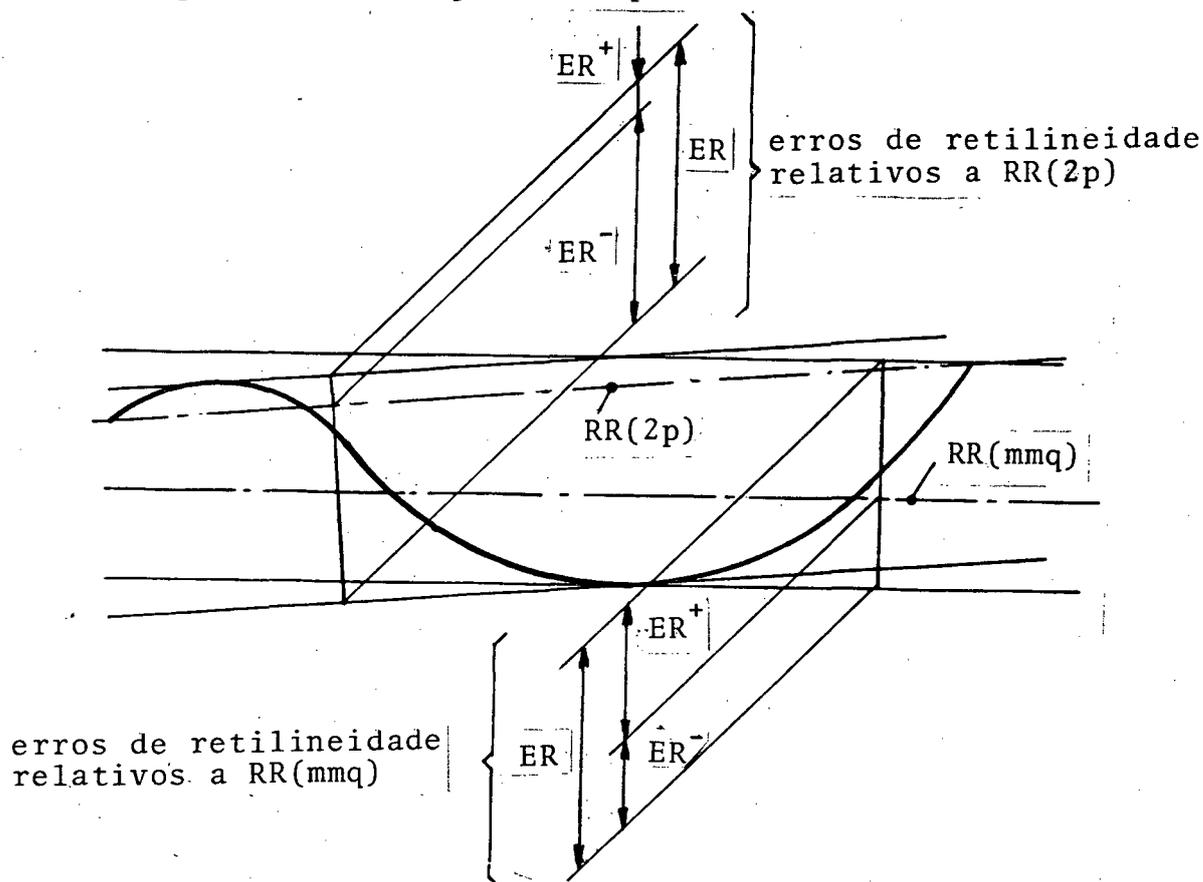


FIG. 2.4 - Determinação do erro global de retilinearidade método dependente

ER [4,5], porém, como se pode ver na figura 2.5, linhas significativamente diferentes podem apresentar o mesmo erro global de retilinearidade, em consequência, apresentarem um comportamento operacional bastante distinto [1, 7, 8]. Em função disto são importantes também, como informações sobre o erro da retilinearidade, parâmetros que dão o gradiente de variação dos erros, ou seja, as inclinações das tangentes à linha. Através da indicação do valor máximo, em módulo $|\rho_{\text{máx}}|$, e a média do módulo das inclinações $|\bar{\rho}|$ pode-se caracterizar em parte a forma das linhas. Na figura 2.5a por exemplo, a linha apresenta valores elevados para a inclinação máxima e média, enquanto que em 2.5b, que identifica de igual desvio da retilinearidade, mas como superfície bem mais regular, essas inclinações são menores. Já em 2.5c, a inclinação máxima é eleva

da e difere bastante da média, que é menor, indicando assim a existência de erros localizados.

As inclinações são determinadas em relação a reta de referência em cada posição de medição, ou seja, nas posições em que os desvios são medidos. A inclinação, ou seja, a tangente à linha, é calculada pela média das inclinações relativas as posições de medição anterior e posterior. Estas inclinações, por sua vez, são calculadas pela razão entre a variação do erro em posições consecutivas e a distância entre estas posições. São, em geral, indicadas em $\mu\text{m}/\text{m}$.

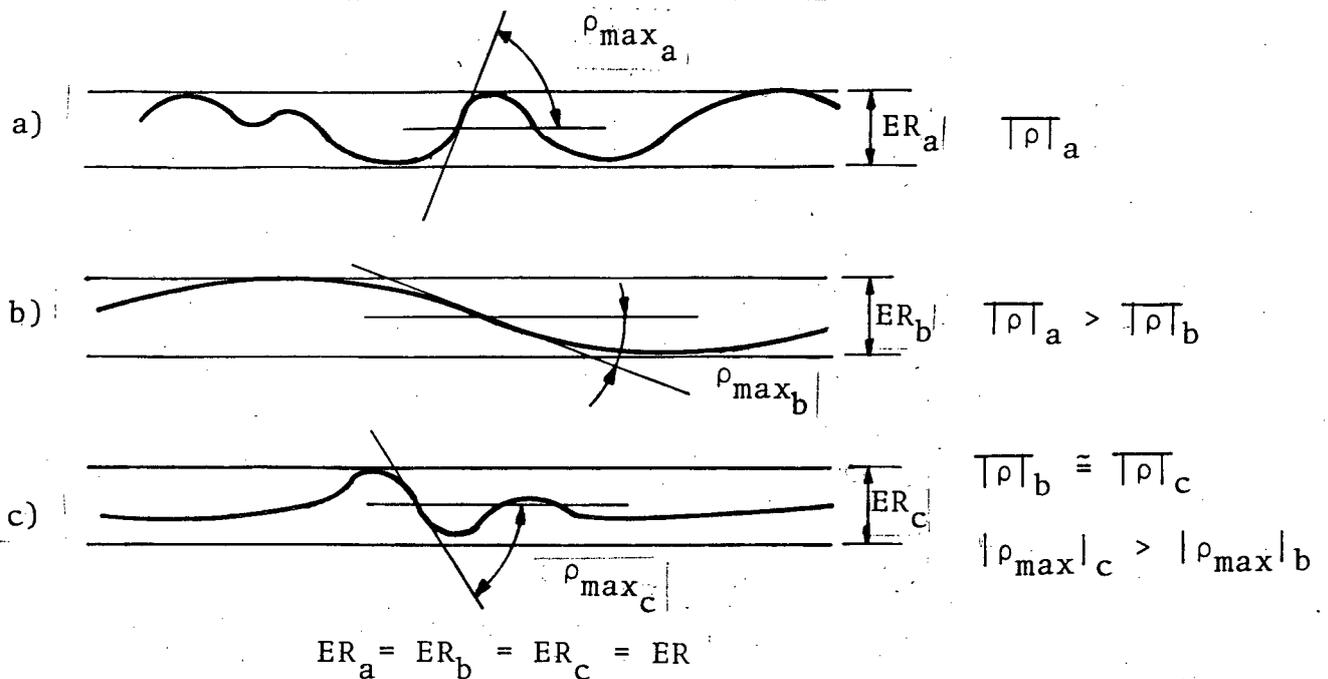


FIG. 2.5 - Inclinações no ensaio de retilidade

2.2.2 - Retilidade de uma trajetória

O erro da retilidade de uma trajetória observa-se preferencialmente em dois planos perpendiculares entre si. A figura 2.6 mostra a trajetória executada pela ponta da ferramenta de um torno em relação à reta padrão, registrando-se os afastamentos trajetória-reta padrão no plano horizontal.

Ao se repetir diversas vezes a medição dos afastamentos, observa-se que não há uma repetibilidade da trajetória em relação à reta padrão, em função de vibrações, deformações, variação de temperatura, etc. Também, quando a medição for realizada com o

movimento em uma determinada direção, poderá ser obtido resultados diferentes daqueles em que o movimento se dá na direção oposta. Com isso será caracterizada uma histerese, que é variável ao longo do trecho e que será função de diversos fatores, como: folga entre guias e carro, deformações distintas pela inversão de forças, etc.

Para a verificação de trajetórias, deve-se então fazer uma série de ciclos de medição para se determinar o erro sistemático (erro médio), o erro aleatório (variação) e a histerese.

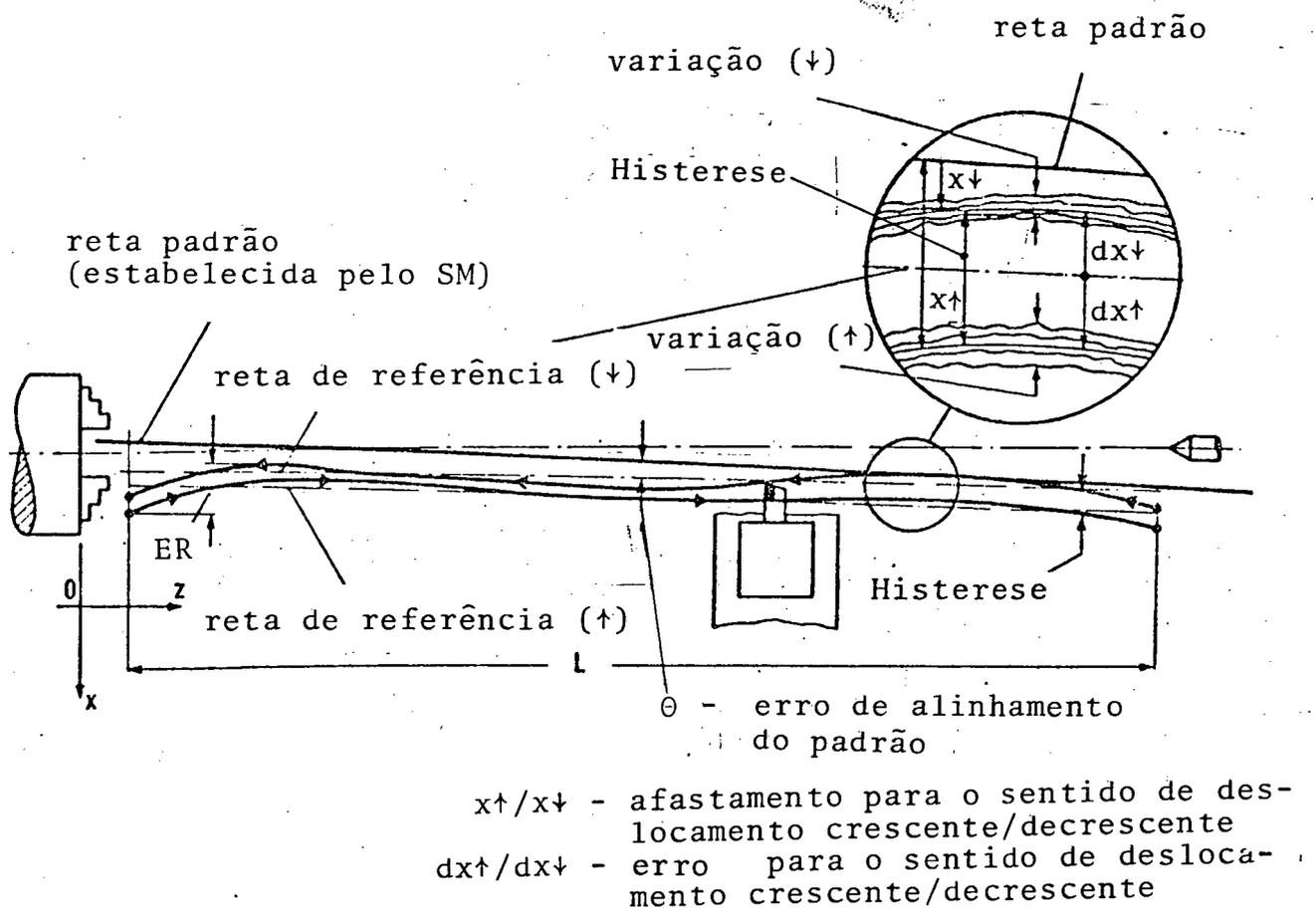


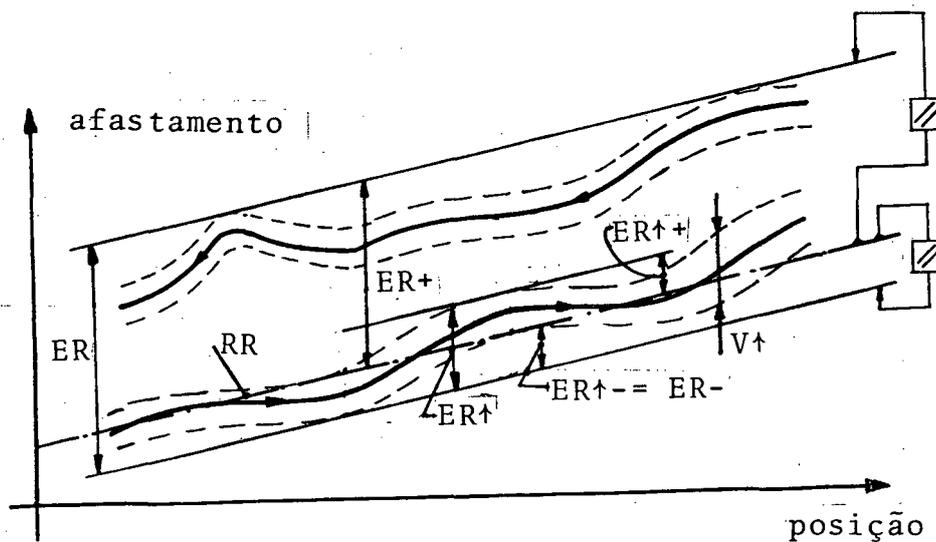
FIG. 2.6 - Erros de retilidade de uma trajetória

Um ciclo de medição compreende a medição em posições consecutivas, normalmente coincidente com o sistema de coordenadas da máquina, realizadas em um determinado sentido (valores coordenados crescentes) e a medição nas mesmas posições, porém em sentido contrário (valores coordenados decrescentes), e que será executado quando se deseja avaliar a histerese.

Assim, fica definido como histerese para cada posição, a diferença entre os erros médios medidos no sentido de deslocamento decrescente e crescente, respectivamente. Terá então valor positivo quando o erro no sentido decrescente for maior.

A reta de regressão relativa aos afastamentos medidos, calculada pelo método dos mínimos quadrados, é tomada em geral, como reta de referência para trajetórias. Esta reta pode ser estabelecida em função dos afastamentos medidos nas posições com valores coordenados crescentes (\uparrow) ou decrescentes (\downarrow), ou ainda, considerando todos os afastamentos medidos. Pode também considerar apenas parte do trecho analisado.

O erro global (ER), como já definido anteriormente, pode agora ser calculado para o sentido de deslocamento crescente ($ER\uparrow$) ou decrescente ($ER\downarrow$), que por sua vez também pode ser subdividido em função dos erros extremos em relação a reta de referência (fig. 2.7).



- RR - reta de referência em função dos afastamentos (\uparrow)
- ER - erro global de retilidade
- ER \downarrow /ER \uparrow - erro de retilidade máximo negativo/positivo
- ER \uparrow -/ER \uparrow + - erro de retilidade máximo negativo/positivo quando no sentido de posição crescente
- V \uparrow - variação

FIG. 2.7 - Retilidade de trajetórias

O erro de retilidade para trajetórias, pode ser definido também pelo método independente, ou seja, pelo afastamento entre duas retas paralelas que contenham todos os desvios, de forma que a distância entre estas retas seja a mínima possível. A análise poderá ser feita igualmente em conjunto, ou separando as direções do movimento.

Em todas as maneiras de determinação do erro de retilidade de trajetórias, deve ser incluído o erro sistemático, calculado pela média dos valores nos diversos ciclos mais a faixa de ocorrência dos erros aleatórios representada pela variação (V), que pode ser assim calculada:

a) A variação é considerada igual ao maior erro aleatório ocorrido no ensaio em uma dada posição de medição (j), ou seja:

$$V_j = \pm |d_{ji} - \bar{d}_j|_{\text{máx}}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

d_i : erros medidos

\bar{d} : erro médio

j : posição de medição

n : número de ciclos

b) A variação corresponde a uma faixa simétrica em torno da média que enquadra os erros aleatórios com probabilidade definida. A variação neste caso é calculada da seguinte forma:

$$V_j = \pm t \cdot S_j$$

onde S_j é o desvio padrão das medidas e t um fator que depende da probabilidade de enquadramento desejada (normalmente $P = 95\%$) e do número de medições realizadas, isto é, do número de ciclos (n) |9|.

No caso do ensaio de trajetórias, os gradientes de erro de retilidade (inclinações), são também importantes e a determinação dos parâmetros correspondentes é semelhante àquela descrita no ensaio de linhas.

2.3 - Circularidade

O erro de circularidade é verificado para linhas e trajetórias e definido como a distância radial entre estes elementos e a sua forma ideal estabelecida pela circunferência de referência (fig. 2.8), que não possui necessariamente o mesmo centro da circunferência padrão, utilizada para a medição, ocorrendo assim um erro de excentricidade. A circunferência de referência pode ser obtida através de uma das seguintes maneiras [10]:

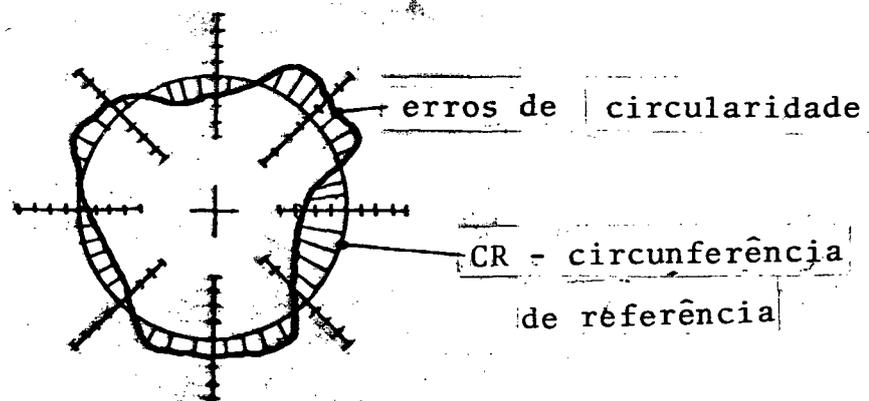


FIG. 2.8 - Circularidade

- a) mínima circunferência circunscrita à curva traçada pelos afastamentos medidos (fig. 2.9a).
- b) máxima circunferência inscrita à mesma curva (fig. 2.8b).
- c) circunferência média da mínima zona radial que contenham todos os pontos da curva (fig. 2.9c).
- d) circunferência definida pelo método dos mínimos quadrados (fig. 2.9d).
- e) circunferência média da mínima zona radial com centro pré-estabelecido (fig. 2.9e).

Os modos (a) e (b) são aplicados quando se tratar de linhas de superfícies de peças que estão em contato mecânico com outras superfícies em um mecanismo. A mínima circunferência circunscrita é definida, por exemplo, pelos pontos da linha de um ei

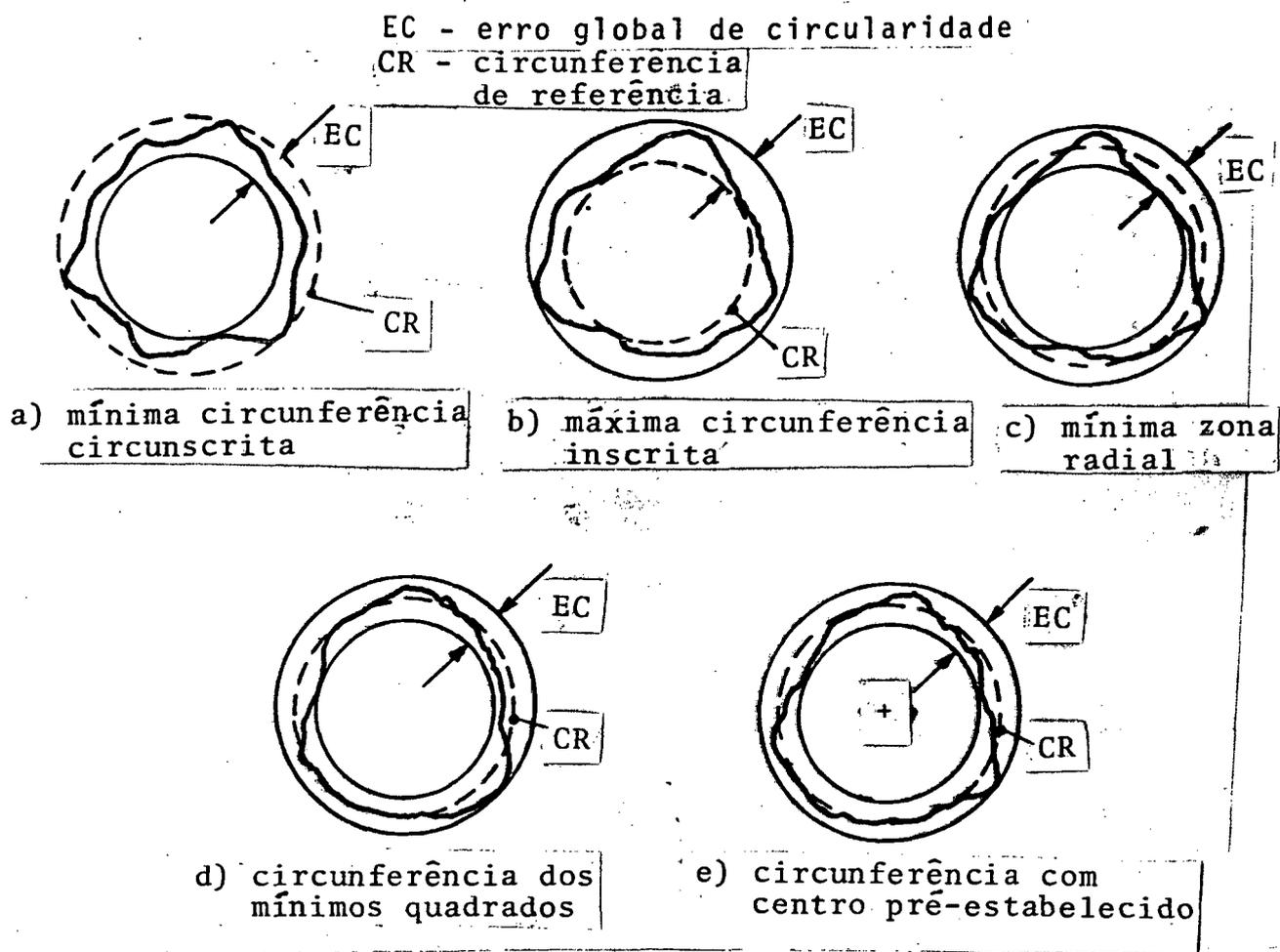


FIG. 2.9 - Determinação da circunferência de referência e do erro global de circularidade (EC)

xo que apresentam maior saliência e onde se dará o provável contato com o mancal. O desvio da circularidade do mancal, neste caso, deverá ser indicado com base na máxima circunferência inscrita à linha. A forma apresentada em (c) pode ser aplicada para simples verificação de tolerâncias de peças. Para circularidade de trajetórias, a circunferência de referência deve ser definida como apresentado em (d). Já o modo (e) aplica-se, por exemplo, a peças que devem ter o eixo de rotação no centro geométrico de sua seção.

A apresentação dos erros em um diagrama polar permite uma melhor análise do elemento sob ensaio, mas a indicação dos resultados pode também ser feita de forma reduzida através do erro global de circularidade (EC), definido pela distância radial entre duas circunferências concêntricas com a circunferência de referência e tangentes aos desvios extremos (fig. 2.9).

Para a circularidade de trajetórias, assim como visto para movimentos lineares, deve ser avaliada também a variação, bem como, a diferença entre os erros da circularidade obtidos com movimentos em sentidos opostos, como é exemplificado na figura 2.10, para a trajetória da ponta da ferramenta de uma mandriladora, com relação a uma circunferência padrão.

A determinação do erro global de circularidade para trajetórias deve incluir também as variações (erros aleatórios), e pode ser determinado com base nos movimentos nos dois sentidos ou no movimento em apenas um sentido, escolhido em função das características operacionais do objeto em teste.

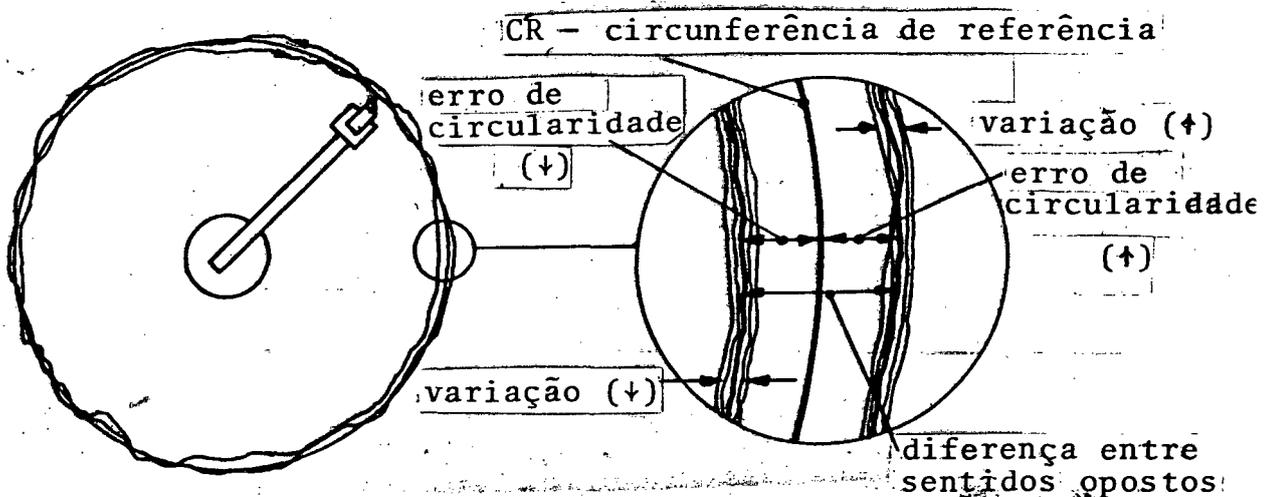


FIG. 2.10 - Circularidade da trajetória de um movimento

2.4 - Posicionamento

O ensaio de posicionamento em peças objetiva determinar os erros de posição de seus elementos (arestas, ressaltos, furos, rebaixos, etc.) em relação a um ponto de referência [6], ou seja, trata-se de uma verificação dimensional que foge ao escopo deste trabalho.

Os erros da trajetória de um ponto podem ser caracterizados segundo três componentes: os desvios transversais, a trajetória nas duas direções perpendiculares ao movimento, que foram ana

lisados em casos particulares de retilidade e circularidade e o erro segundo a direção do movimento, ou seja, o erro de posição. Logo, o ensaio de posicionamento objetiva determinar os erros na direção do movimento, ou seja, a diferença entre a posição efetiva e a ideal de um ponto ao longo de uma trajetória. Serão analisados os ensaios de posicionamento de movimentos lineares e angulares.

Na figura 2.11 é destacada a importância da realização deste ensaio em máquinas-ferramenta, onde o erro de posicionamento da ferramenta acarretará um erro de geometria na peça que está sendo usinada. Este ensaio tem especial importância nas máquinas com comando numérico [3, 11, 12]. Para a realização deste ensaio há necessidade de um padrão de deslocamento, o qual para efeitos de análise supõe-se disponível e isento de erros.

De forma semelhante ao que acontece com os desvios da re

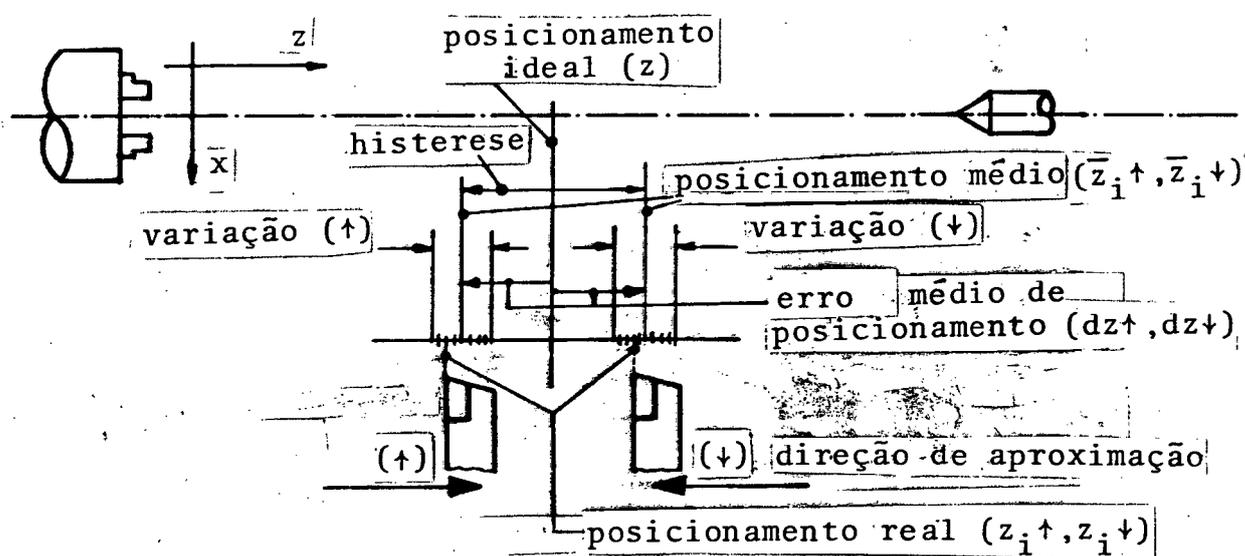


FIG. 2.11 - Erro de posicionamento da trajetória da ferramenta de um torno

tilidade, também os erros de posicionamento poderão assumir valores distintos quando a máquina se desloca em um ou outro sentido, caracterizando a histerese de posicionamento (fig. 2.11). Também no ensaio de posicionamento haverá uma variação dos desvios, ou seja, uma não repetibilidade, que em um sentido de movimento poderá ser distinto daquele registrado no sentido oposto, de forma que neste ensaio poderão também ser determinados

valores médios de desvio para cada sentido de movimento, a média dos valores nos dois sentidos e a variação (faixa de erros aleatórios).

O erro global de posicionamento, na forma reduzida (E_{Po}) é estabelecido como sendo a faixa de erros (sistemáticos e aleatórios) que ocorrem ao longo da trajetória verificada (fig. 2.12).

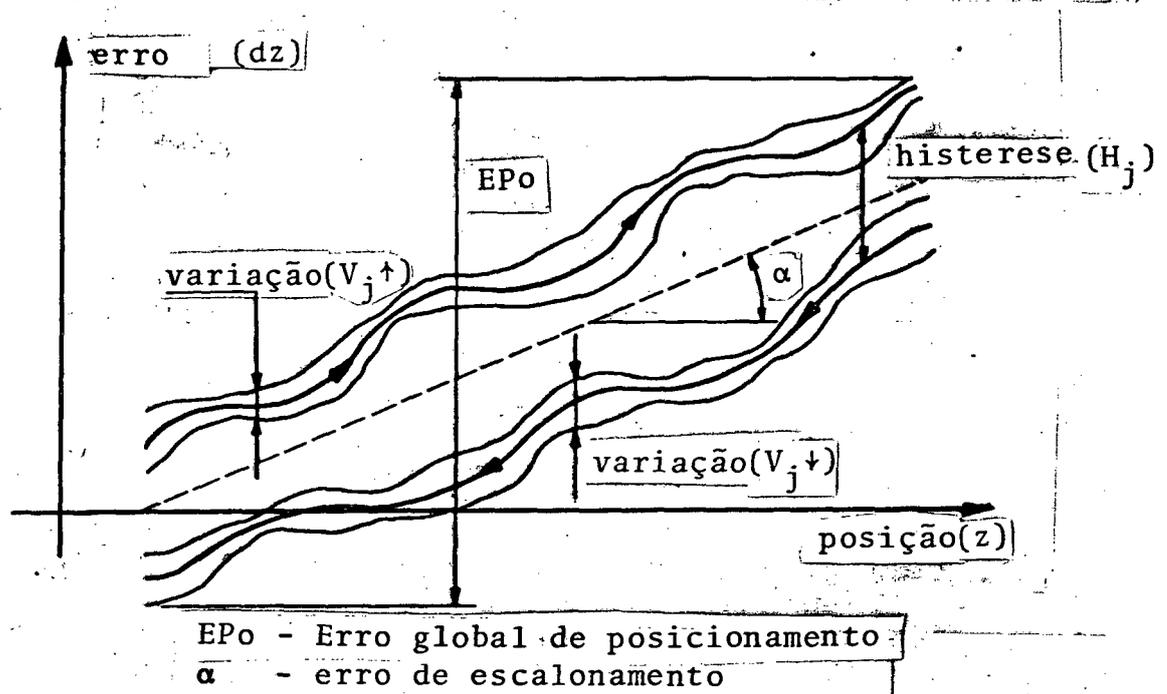


FIG. 2.12 - Parâmetros estabelecidos no ensaio de posicionamento

Quando da apresentação dos erros em forma gráfica, muitas vezes observa-se uma variação tipicamente linear crescente ou decrescente dos erros. Nestes casos a inclinação da reta de regressão (α) será outro parâmetro reduzido do ensaio, chamado erro de escalonamento por estar, em geral, relacionado com erros sistemáticos do sistema de medição de posição da própria máquina.

O posicionamento pode ser ensaiado também para trajetórias circulares (posicionamento angular), cujos parâmetros são calculados de maneira semelhante ao posicionamento linear.

O ensaio de giro [13], realizado em máquinas-ferramenta, é um caso particular de posicionamento em que se verifica a variação da posição da placa de fixação no sentido radial durante o seu movimento de rotação. O chamado ensaio de deslocamento axial periódico [7], é também um ensaio de posicionamento, onde a varia

ção de posição da placa no sentido axial é verificada para diferentes posições angulares.

O ensaio de transmissão é um caso particular de posicionamento que relaciona movimento lineares e/ou angulares [13], por exemplo, no ensaio da transmissão entre rotação da placa e avanço longitudinal do carro num torno para corte de roscas.

Considerando um dos posicionamentos como ideal (movimento de referência), os parâmetros de erro geométrico de transmissão são determinados como no ensaio de posicionamento (fig.2.13).

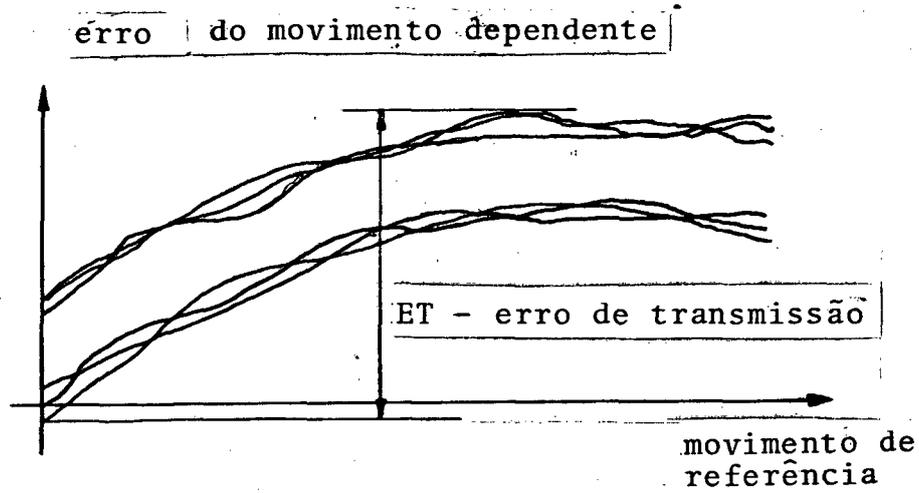


FIG. 2.13 - Erro de transmissão

2.5 - Inclinamento

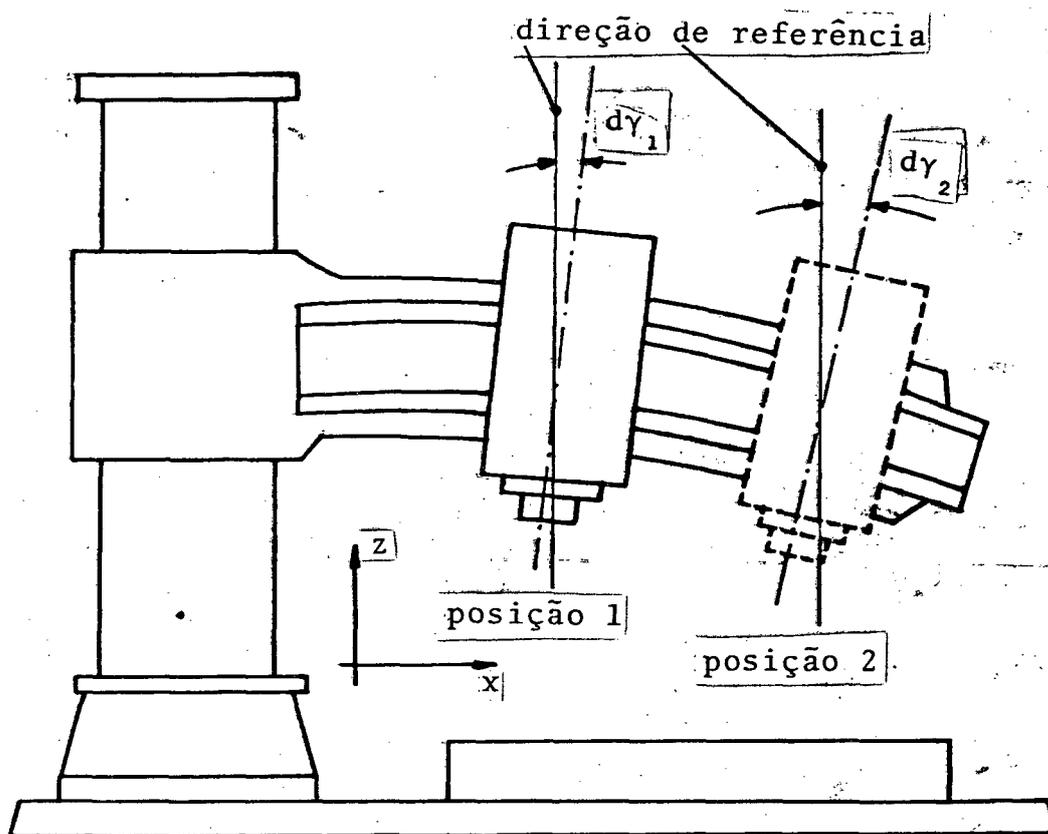
O ensaio de inclinamento em peças consiste na verificação dos erros angulares entre elementos associados (linhas ou superfícies), o que constitui um problema da metrologia dimensional (medição de ângulo) cujo estudo não será aqui aprofundado por não constituir diretamente o objetivo do trabalho.

Em máquinas, este ensaio corresponde a verificação dos desvios angulares de tombamento, guinamento e rolamento, conforme já mencionados no capítulo introdutório.

A figura 2.14 mostra um exemplo característico de erros de rolamento que normalmente ocorrem em uma furadeira radial

em função de deformações decorrentes do momento fletor variável causado pelo peso próprio do carro porta-ferramenta.

As inclinações que ocorrem em máquinas, além de serem consequência de deformações, podem ter origem em outras fontes, como folgas, erros de geometria, etc., o que estabelece a necessidade de determinar a histerese, variação e parâmetros reduzidos nos dois sentidos de movimento (\uparrow ou \downarrow).



dy_i - inclinação do porta ferramenta (rolamento)

FIG. 2.14 - Erro de rolamento em uma furadeira radial

Para o movimento na direção X, o erro global de inclinação (EI) terá as três componentes:

a) Erro global de inclinação quanto ao tombamento (EIT):

$$EIT = d\alpha_{\text{máx}} - d\alpha_{\text{mín}}$$

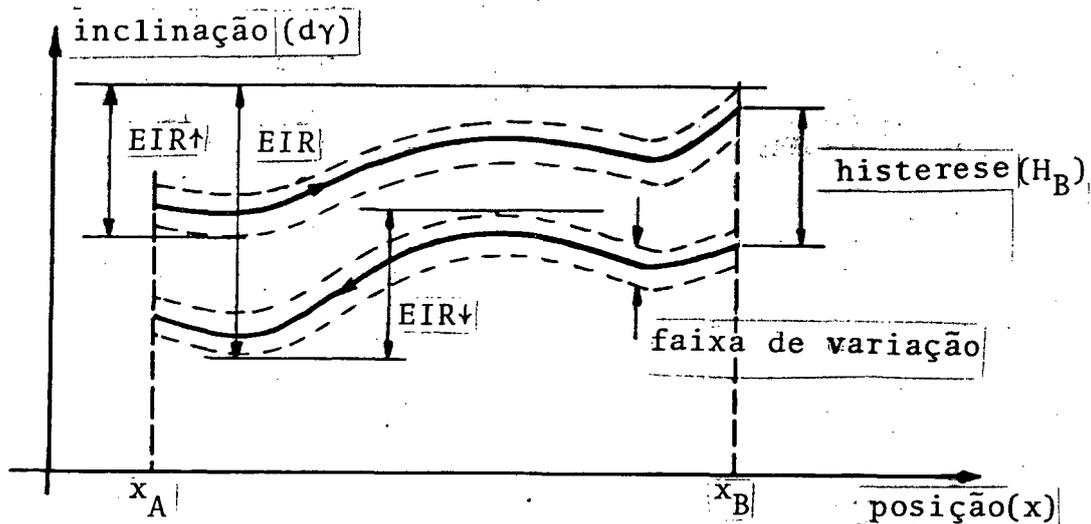
b) Erro global de inclinação quanto ao guinamento (EIG):

$$EIG = d\beta_{\text{máx}} - d\beta_{\text{mín}}$$

c) Erro global de inclinação quanto ao rolamento (EIR):

$$EIR = d\gamma_{\text{máx}} - d\gamma_{\text{mín}}$$

A figura 2.15 apresenta um exemplo de indicação gráfica dos erros de inclinação quanto ao rolamento.



$EIR\uparrow$	- Erro de inclinação (rolamento)	para o movimento crescente
$EIR\downarrow$	- Erro de inclinação (rolamento)	para o movimento decrescente
EIR	- Erro de inclinação (rolamento)	para o movimento

FIG. 2.15 - Erros de inclinações (rolamento)

2.6 - Ensaio de elementos através de combinações de ensaios básicos de sub elementos

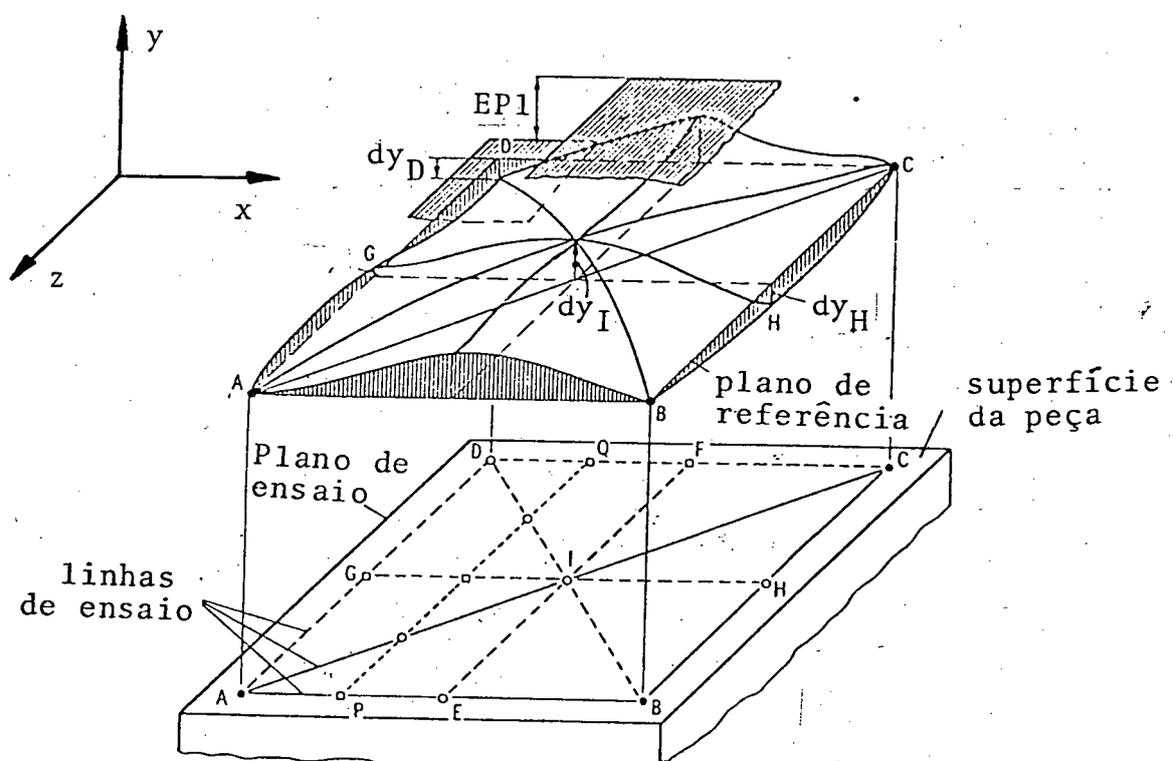
2.6.1 - Planicidade

O ensaio geométrico de planicidade visa determinar os desvios da superfície de uma peça ou desvios de trajetórias em relação a um plano de referência.

Considerando a dificuldade de se realizar o ensaio com um plano padrão [1, 13], pode-se fazer ensaios de retilinearidade

segundo várias linhas da superfície e posteriormente, através de processamento apropriado, as retas de referência destes ensaios são feitas coincidir com um plano de referência.

O plano de referência é definido, por exemplo, por três pontos, como nas posições A, B e C da figura 2.16, cujos erros são conhecidos ou considerados nulos. As medições dos erros de retilineidade das linhas \overline{AB} , \overline{AC} e \overline{BC} são básicas, ou seja, fornecem os valores de referência para associação dos valores das outras medições. Para se associar a reta de referência ao plano de referência, a linha de ensaio de cada medição deverá conter, no mínimo, duas posições com erros conhecidos, os quais poderão ser obtidos dos valores básicos ou de suas extrapolações. Assim, por exemplo, os erros nas posições B e I, onde $dy_B = 0$ e dy_I tem um valor que foi definido no ensaio da linha \overline{AC} , possibilitam determinar a linha de desvio \overline{BD} , enquanto que a linha \overline{AD} será de-



- Ponto de referência
- Ponto de erro pré-determinado
- Ponto com erro determinado por duas ou mais medições.

EP1 - Erro global de planicidade

dy_H - erro de planicidade no ponto H

FIG. 2.16 - Definição do plano de referência para determinação dos erros de planicidade

finida por dy_A e dy_D . A linha \overline{HG} poderá ser definida, em relação ao plano de referência, por dy_H e dy_I . Deste modo, o erro dy_G é estabelecido duas vezes, ou seja, pelas linhas \overline{HG} e \overline{AD} . Esta redundância possibilita uma confirmação dos resultados das medições realizadas.

Quando o plano de referência adotado inicialmente encontra-se em posição inclinada em relação a superfície, outro plano de referência pode ser obtido a partir dos desvios já medidos. O novo plano de referência poderá ser definido por outras três posições diferentes, ou mantendo-se os erros já medidos em duas posições e alterando o valor em uma terceira posição, provocando assim deslocamento angular do plano de referência inicial em torno de uma reta. O plano ajustado, ou seja, o plano que melhor define a forma do elemento, pode também ser adotado como plano de referência, utilizado geralmente na indicação da planicidade de trajetórias.

A indicação dos erros de planicidade é feita através de tabelas com a apresentação do erro em cada posição de medição, por meio de curvas de nível, ou com uma vista em perspectiva dos erros. Na forma reduzida, o erro global de planicidade, pode ser indicado com o erro máximo positivo ($EP1^+$) e negativo ($EP1^-$) em relação ao plano de referência, ou seja, pela distância ($EP1$) entre dois planos paralelos ao plano de referência que contenham todos os erros. Outra possibilidade é a determinação de $EP1$ pela distância mínima entre dois planos paralelos entre si e que contenham todos os erros. Cabe ressaltar que os valores de $EP1$ calculados de forma diferente, poderão ser distintos.

Para planicidade de trajetórias, deve-se considerar também a variação (erro aleatório) dos desvios. Quando, para trajetórias, os erros forem medidos em ambos sentidos do movimento, para determinação da histerese, a conexão entre os ensaios pode ser feita através dos erros médios totais, ou, se tomado os desvios medidos em um dos sentidos de movimento como referência, o mesmo procedimento deverá se suceder na conexão entre todos os ensaios de retilidade.

2.6.2 - Cilindricidade e esfericidade

Os ensaios de cilíndricidade e esfericidade são realizados de maneira semelhante ao ensaio de planicidade. A cilíndricidade pode derivar de ensaios de retilidade segundo uma ou várias linhas geratrizes do elemento cilíndrico e de ensaios de circularidade em uma ou mais secções do mesmo elemento. A esfericidade pode ser derivada de vários ensaios de circularidade.

2.7 - Posição relativa de elementos

Uma linha da superfície plana de uma peça, uma trajetória retilínea ou um eixo retilíneo, são caracterizados idealmente pela reta de referência na apresentação dos resultados do ensaio de retilidade, assim como superfícies planas de peças ou trajetórias planas de movimentos são caracterizados idealmente pelo plano de referência.

A posição relativa de elementos será analisada considerando apenas a posição relativa de suas retas ou planos de referência. Portanto, quando uma linha for analisada em relação a outro elemento, ela será representada por sua reta de referência.

2.7.1 - Paralelismo

O erro de paralelismo pode ser verificado entre retas, entre planos, ou entre retas e planos.

Para realizar um ensaio de paralelismo entre retas (linhas ou trajetórias), a condição necessária é que as retas padrão para os dois elementos sejam paralelas entre si, estabelecendo um padrão de paralelismo.

O erro global de paralelismo (EP) é dado pelo ângulo entre as retas de referência, o qual pode ser determinado a partir do erro de alinhamento do padrão em relação às duas retas, conforme mostra a figura 2.17:

$$EP = \text{tg}\theta_2 - \text{tg}\theta_1, \text{ em radianos ou } \mu\text{m/m}$$

EP pode ser também dado pela diferença entre a máxima e a mínima distância entre as duas retas num determinado comprimento L [4], calculado por:

- RP - reta padrão (estabelecida pelo sistema de medição)
 RR - reta de referência
 θ - erro de alinhamento do padrão
 EP - erro de paralelismo

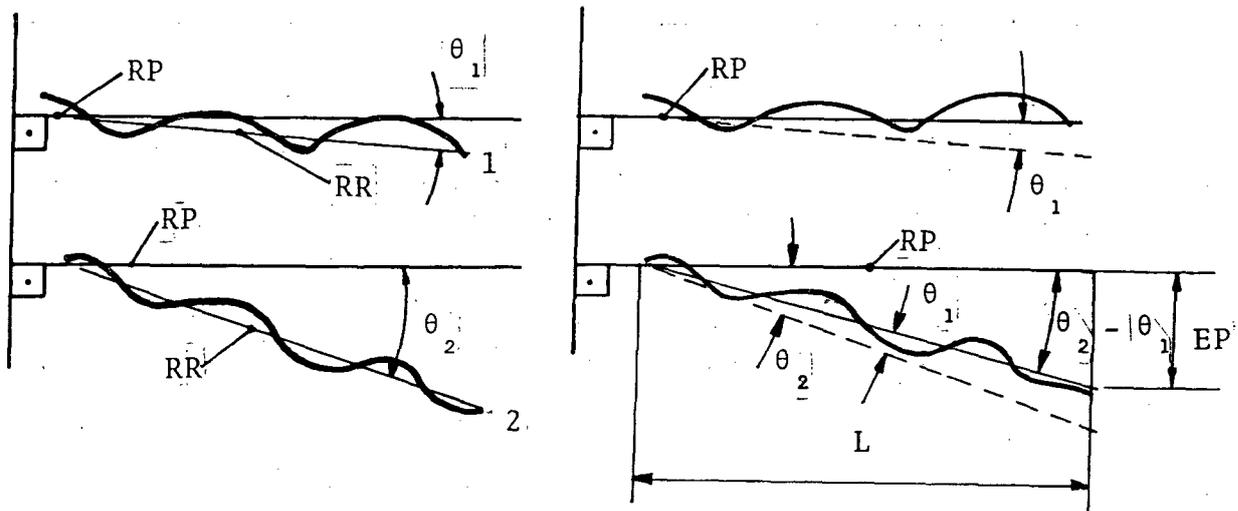


FIG. 2.17 - Determinação do erro de paralelismo entre retas

$$EP = (\operatorname{tg}\theta_2 - \operatorname{tg}\theta_1) L$$

O paralelismo entre elementos que sejam representados por uma reta e um plano, deve ser determinado entre a reta definida pela projeção da primeira no plano considerado, resumindo-se assim ao caso de paralelismo entre duas retas.

O paralelismo entre planos é determinado de maneira semelhante ao caso de paralelismo entre duas retas, ou seja, os planos padrão de cada elemento verificado devem ser paralelos. A figura 2.18 apresenta o erro de paralelismo entre dois planos, sendo o paralelismo indicado pelos ângulos λ_x e λ_y ou pela distância entre dois planos paralelos a um dos planos de referência, entre os quais devem ficar todos os pontos do outro plano de referência. O erro de paralelismo (EP) é, neste caso, definido em relação a um comprimento de referência em duas direções perpendiculares, L_x e L_z . Assim, tem-se:

$$EP = \operatorname{tg}\lambda_x \cdot L_x + \operatorname{tg}\lambda_z \cdot L_z$$

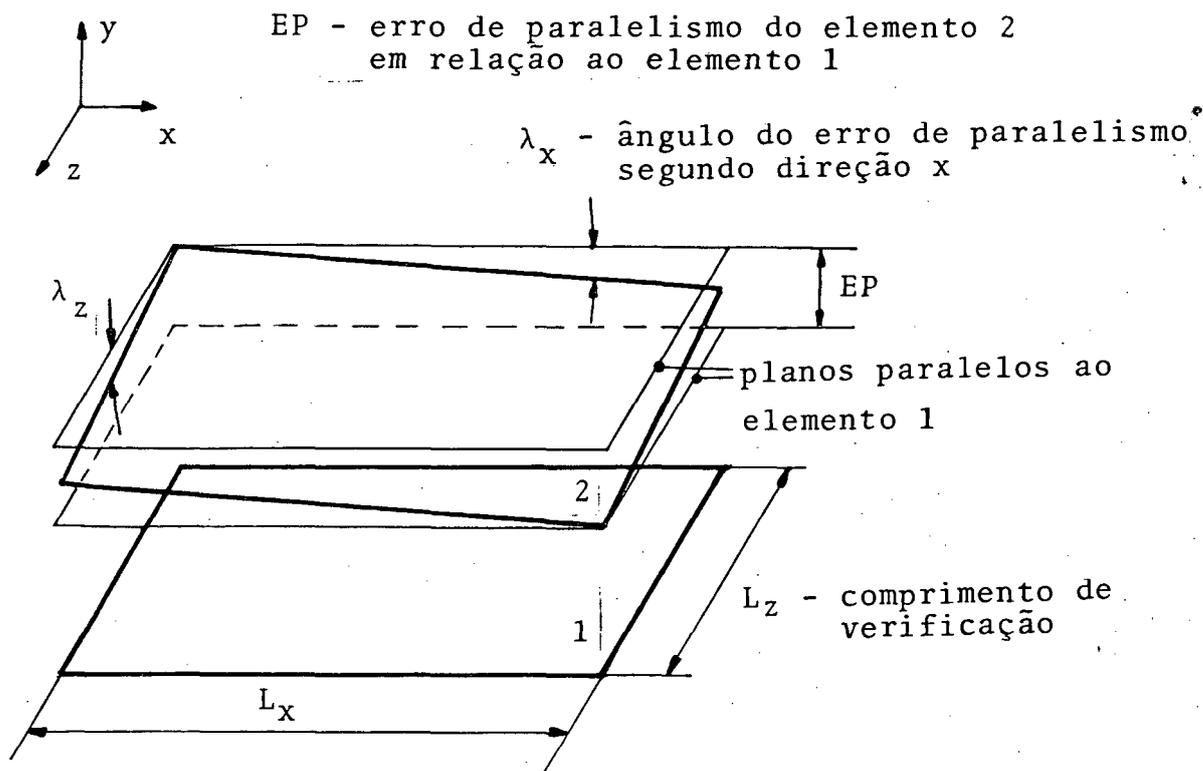


FIG. 2.18 - Determinação do erro de paralelismo entre planos

2.7.2 - Alinhamento

O ensaio de alinhamento é realizado entre dois ou mais elementos (linhas, trajetórias ou eixos). Assim como para todos os ensaios derivados da retitude, considera-se somente a reta de referência de cada elemento envolvido.

Considerando um dos elementos como referência (fig.2.19), o erro de alinhamento em relação a ele, para cada posição x do segundo elemento (de comprimento L_2), é determinado pelo afastamento inicial A e desvio angular ϕ :

$$EA_x = A + x \cdot \text{tg}\phi$$

O erro global de alinhamento (EA) entre estes elementos

será, então:

$$EA = |EA_x|_{\text{max}}$$

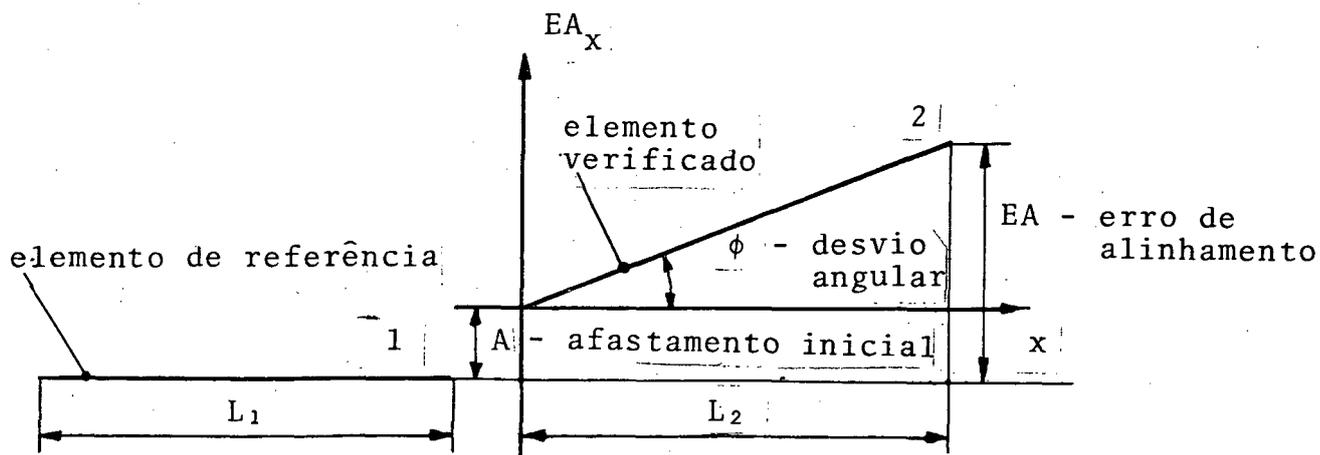


FIG. 2.19 - Determinação do erro de alinhamento

A figura 2.20 mostra um exemplo de alinhamento entre peças, onde a reta padrão é comum e o primeiro elemento é o de referência.

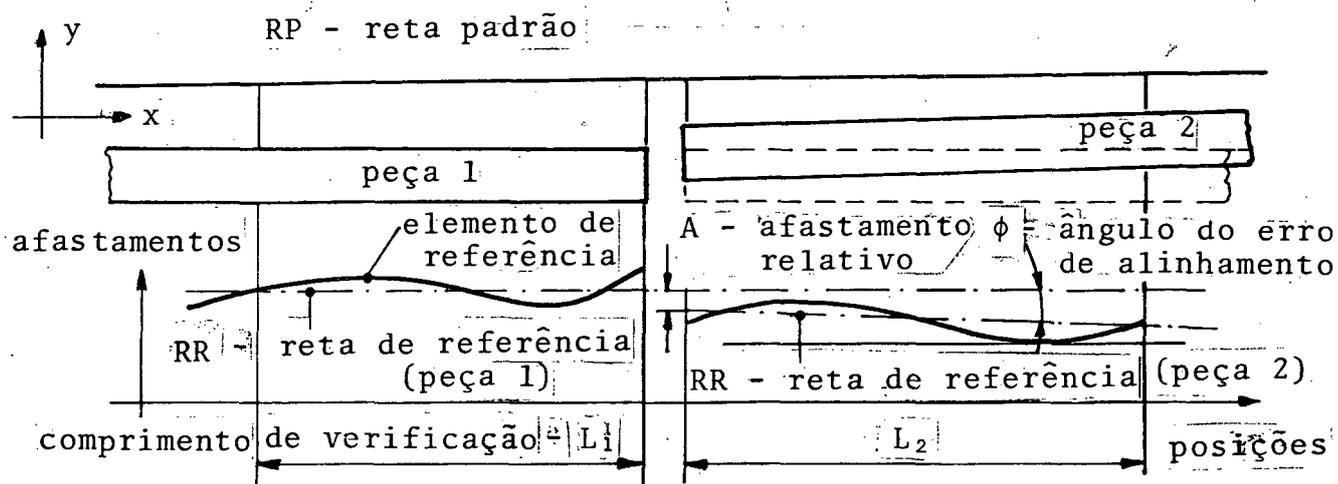


FIG. 2.20 - Verificação do alinhamento entre peças

O alinhamento é verificado também para elementos considerados pontos, como os mancais de um motor (fig. 2.21), onde cada elemento tem um desvio em relação a uma reta padrão e o erro de alinhamento (EA) é calculado da mesma maneira como visto para o erro de retilidade (ER), admitindo como reta de referência

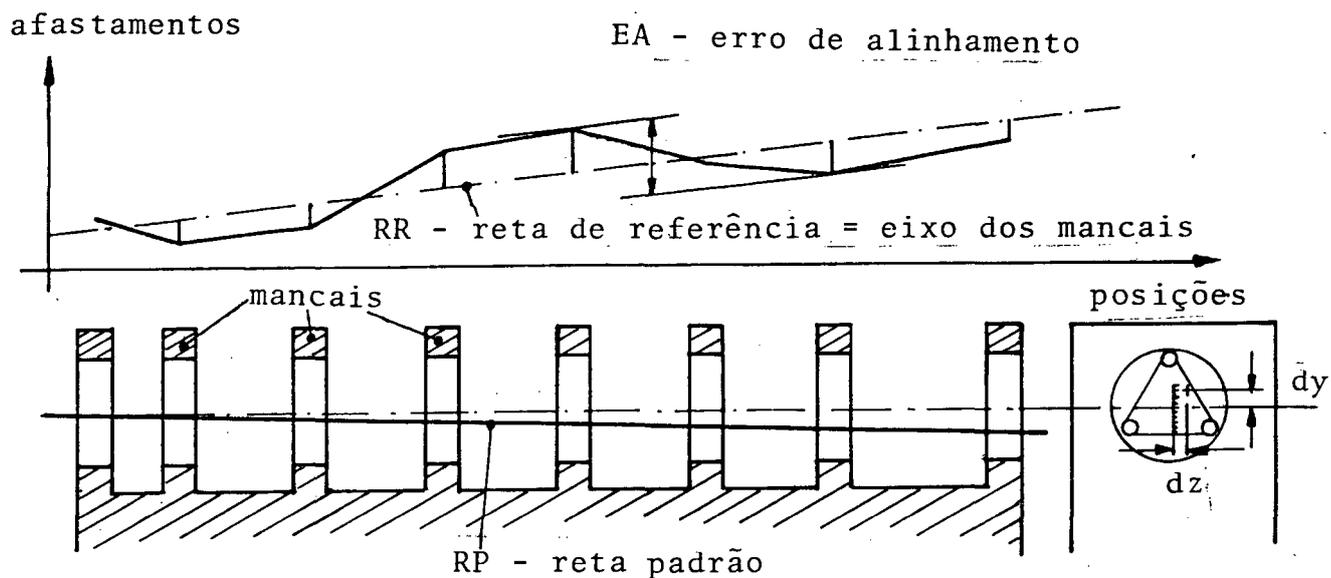


FIG. 2.21 - Alinhamento de elementos pontuais

(eixo dos mancais), a reta de regressão obtida pelo método dos mínimos quadrados ou a reta definida por dois pontos (dois mancais).

Os ângulos da poligonal estabelecida pelos erros (inclinações) tem relativa importância. No caso de mancais, uma mudança brusca destes ângulos implica em uma flexão do eixo, que sob rotação, poderá sofrer esforços cíclicos, reduzindo a vida útil do mesmo.

2.7.3 - Ortogonalidade

O ensaio de ortogonalidade pode ser realizado entre os mesmos elementos citados no ensaio de paralelismo. A diferença entre estes ensaios é somente o padrão utilizado, que neste caso deve estabelecer também um padrão de ortogonalidade.

A figura 2.22a mostra a verificação da ortogonalidade entre duas retas (linha, trajetória ou eixo), enquanto a figura 2.22b apresenta o gráfico com a correção do erro de alinhamento do padrão ortogonal em relação a direção de medição x. O erro de ortogonalidade (EO) é a diferença entre o ângulo formado pelas retas de referência e o ângulo do padrão, calculado através do erro de alinhamento do padrão nas duas direções ortogonais:

$$EO = \text{tg}\theta_y - \text{tg}\theta_x, \text{ em radianos ou } \mu\text{m/m}$$

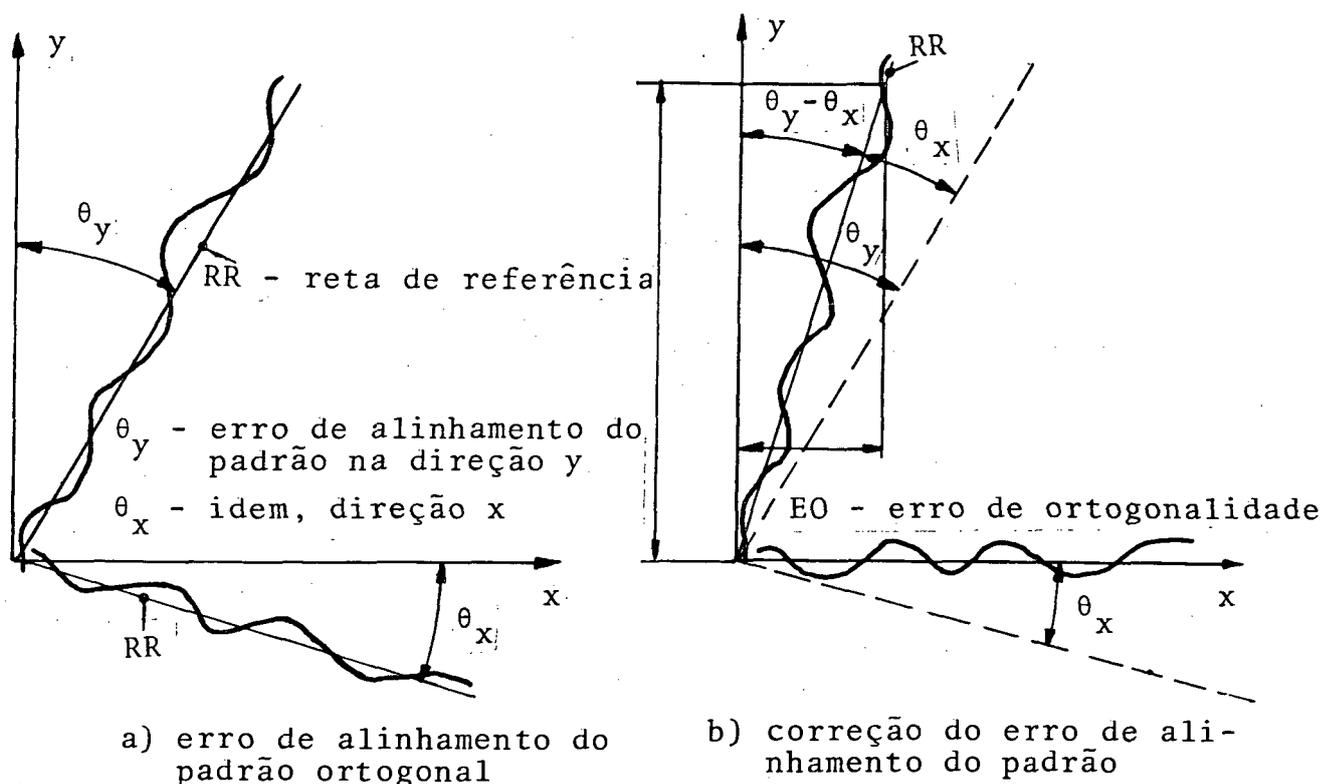


FIG. 2.22 - Determinação do erro de ortogonalidade entre retas

O erro de ortogonalidade pode também ser caracterizado pela distância entre duas retas paralelas que contenha a reta de referência em um determinado comprimento $|4|$:

$$EO = (\operatorname{tg}\theta_y - \operatorname{tg}\theta_x) \cdot L, \text{ em } \mu\text{m}$$

Segundo a regra dos esquadros $|14|$, toma-se L igual ao comprimento do elemento maior.

Entre planos, o erro de ortogonalidade é indicado pelos coeficientes angulares de um dos planos em relação ao plano ortogonal ao outro ($\operatorname{tg}\omega_x$ e $\operatorname{tg}\omega_z$ na figura 2.23) ou pela distância entre dois planos paralelos: ortogonais ao plano base e que contenham o plano de referência do outro; segundo a figura 2.23 tem-se:

$$EO = \operatorname{tg}\omega_x \cdot L_x + \operatorname{tg}\omega_z \cdot L_z$$

Entre reta e plano, a ortogonalidade pode ser calculada tomando-se como base o plano (plano de referência do elemento). Neste caso, o erro é indicado pelos ângulos ω_x e ω_z ou pelos parâmetros EO_x e EO_z , conforme mostra figura 2.24. Tomando-se como base a reta, ou seja, determinando a ortogonalidade do plano em

relação a reta (reta de referência do elemento), o erro é analisado como visto para o caso de ortogonalidade entre dois planos, admitindo-se a reta contida em um destes planos (fig. 2.23).

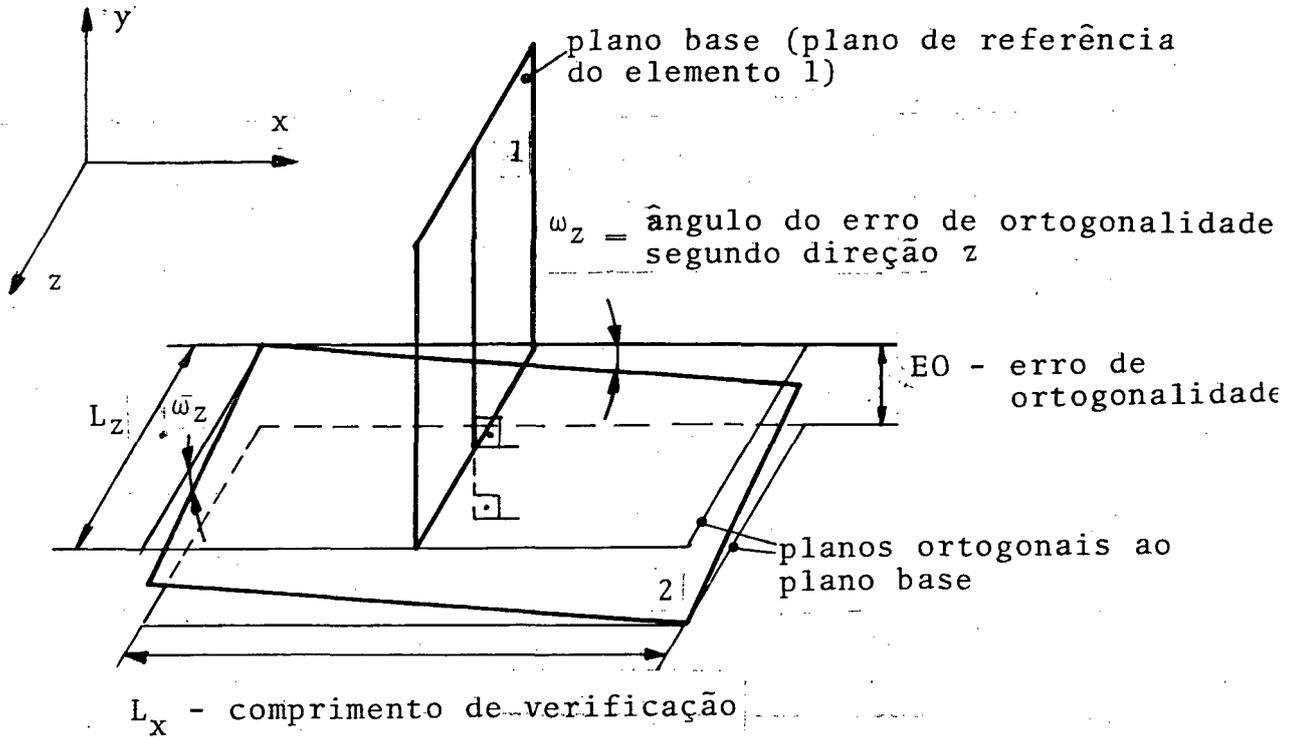


FIG. 2.23 - Determinação do erro de ortogonalidade entre planos

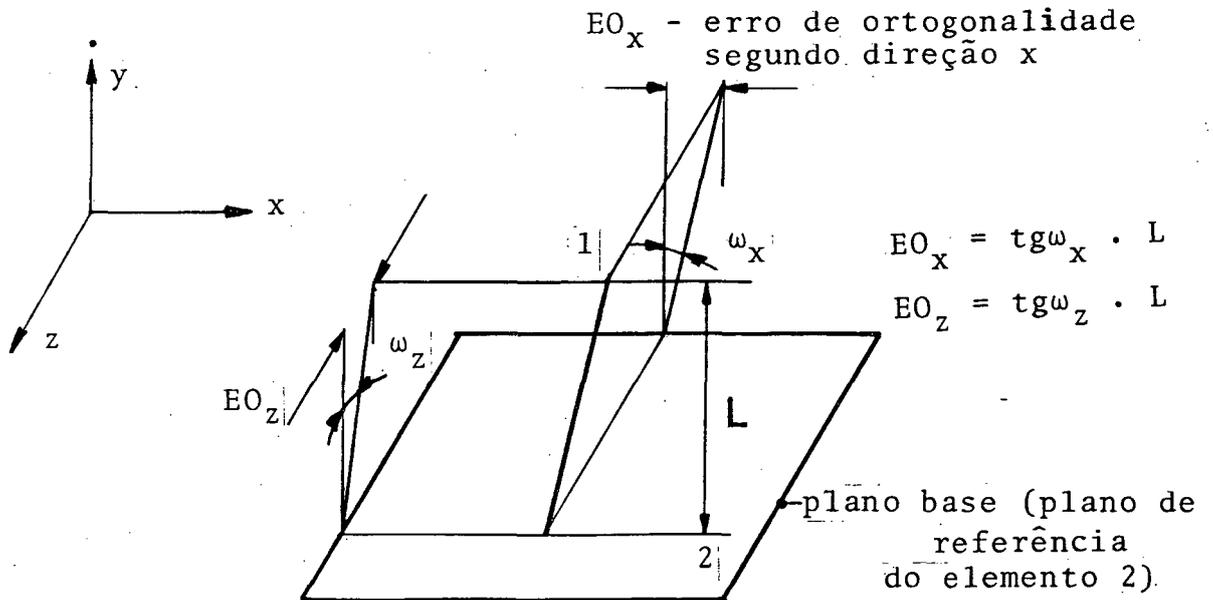


FIG. 2.24 - Determinação do erro de ortogonalidade entre reta e plano

2.7.4 - Eqüidistância

Este ensaio visa determinar a alteração do afastamento entre dois elementos (fig. 2.25). O erro de eqüidistância é obtido a partir da medição do afastamento entre os elementos ou calculados pelos desvios de paralelismo e retilineidade destes e-

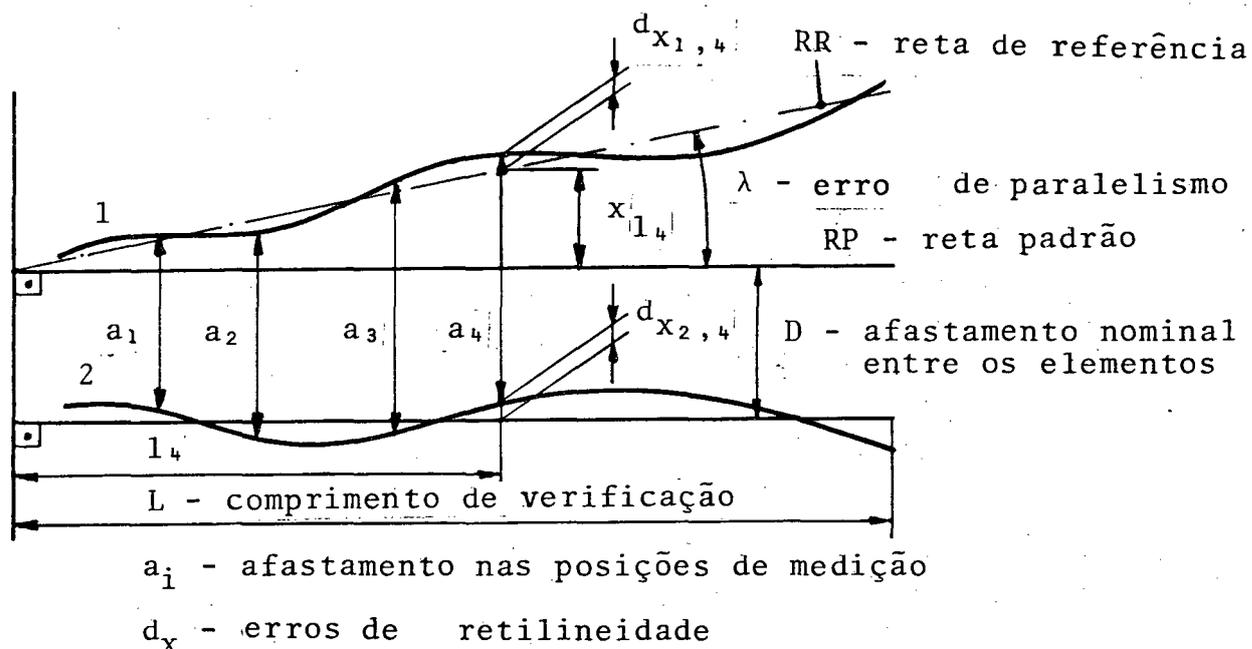


FIG. 2.25 - Determinação dos erros de eqüidistância

elementos:

$$dE_i = (dx_{1,i} - dx_{2,i}) + \operatorname{tg}\lambda l_i,$$

ou

$$dE_i = D - a_i, \quad i = 1, 2, \dots, k$$

i : índice das posições de medição

$dx_{1,i}$: erro de retilineidade do elemento 1

$dx_{2,i}$: ídem elemento 2

$\operatorname{tg}\lambda$: coeficiente angular do desvio de paralelismo

l_i : posição de medição

D : afastamento nominal entre os elementos

a_i : afastamento medido

k : índice da última posição

O erro global de equidistância (EE), para apresentação em forma reduzida é definido pelo módulo do máximo desvio:

$$EE = |dE_i|_{\max}$$

O ensaio de equidistância é realizado também para a verificação da alteração do afastamento de dois ou mais elementos a um elemento de referência, o que corresponde a ensaios individuais de equidistância de cada elemento ao elemento de referência [7].

O ensaio de simetria [6] é um caso particular do ensaio de equidistância, onde são determinadas os desvios do afastamento de elementos ao plano de simetria.

3 - METODOLOGIA AUTOMATIZADA PARA ENSAIOS GEOMÉTRICOS

3.1 - Diretrizes gerais

A automatização computadorizada [15], cujo programa foi desenvolvido no decorrer do trabalho, teve o propósito de viabilizar economicamente a realização e aumentar a potencialidade informativa dos ensaios geométricos, tendo-se como diretrizes básicas:

a) Universalidade:

A metodologia deverá, através da sistematização dos ensaios analisados no capítulo 2, permitir a verificação de linhas, eixos e/ou trajetórias, ou seja, testes de peças ou máquinas quanto a integralidade de sua macrogeometria.

b) Automatização em todas etapas:

Na etapa de aquisição de dados, a possibilidade de comunicação entre computador e sistemas de medição, deverá garantir a leitura automática de dados. A medição de grandezas físicas que podem influir nos resultados, como temperatura do objeto sob ensaio, temperatura ambiente, pressão atmosférica, esforços atuantes, etc., também deverá ser feita por instrumentos conectados ao computador, o que permitirá desenvolver sistemáticas de controle do ensaio, garantindo maior segurança quanto a validade das leituras feitas, bem como permitirá correlacionar causas e efeitos.

A automatização possibilitará realizar ensaios simples ou múltiplos (vários simultaneamente), básicos ou derivados, com relativa facilidade de execução e rapidez na obtenção de resultados.

O grande volume de dados que envolvem os ensaios e a complexidade do processamento justificam igualmente a automatização desta etapa.

Na documentação, através de periféricos do computador, como impressora e plotadora, deverá ser gerado o memorial do ensaio onde são registrados os parâmetros estabelecidos nas etapas de aquisição e processamento, bem como apresentados de maneira apropriada para análise dos resultados obtidos.

c) Independência das etapas:

Armazenando-se os dados do ensaio, sejam eles correspondentes as leituras feitas ou valores processados, conseguir-se-á a independência entre as etapas de aquisição, processamento e documentação, permitindo, por exemplo, a realização da aquisição sem necessidade de processar e/ou documentar imediatamente os dados, reduzindo assim o tempo de bloqueio do objeto (máquina ferramenta, peças, etc).

d) Versatilidade:

O sistema deverá possibilitar a execução de ensaios em condições diversas, como em laboratórios ou em oficinas de forma a permitir a verificação de peças ou máquinas de precisão, que exigem condições ambientais controladas ou também a verificação de máquinas em suas próprias condições de trabalho.

e) Modularidade do programa:

A estrutura de cada etapa será constituída de diversos blocos de rotinas que só serão englobadas no contexto quando requisitadas. Na aquisição, cada sistema de medição utilizado em ensaios geométricos terá um conjunto específico de comandos para se realizar uma leitura automatizada. Processamento individual para cada tipo de ensaio será necessário e na etapa de documentação cada periférico, como impressora ou plotadora, exigirá um programa próprio de controle. Esta característica permitirá implementação de novas rotinas em qualquer etapa, bem como, reduzir as necessidades de memória principal do computador.

3.2 - Critérios de escolha do sistema computacional

A automatização será feita com base em um sistema computacional que deverá apresentar uma configuração que venha atender aos seguintes critérios:

a) Computador:

- Deve ser programável em linguagem de alto nível, o que facilita a programação.

- Deve permitir o acesso ao programa durante sua execução, ou seja, possibilitar a ingerência do operador sobre variá-

veis ou comandos, tornando a programação mais flexível a implementações ou alterações.

- Deve permitir modificações nos programas com facilidade para manutenção ou ampliações.

- Deve possuir memória ampla em função da extensão dos programas e do grande volume de dados envolvidos nos ensaios geométricos.

b) Periféricos:

- Deve oferecer meios de entrada e saída de informações, como teclado e vídeo, para operar no modo conversação com operador.

- Deve possuir periféricos de documentação para imprimir memorial de ensaio, tabelas de valores lidos e processados, e traçar gráficos.

- Deve possuir periféricos para armazenamento de programas e dados, sendo portadores de fita ou disco magnéticos.

c) Interfaces:

É necessário que o sistema tenha condições de interfaceamento com sistemas de medição para possibilitar a aquisição automática.

d) Sistema computacional:

- Sendo um sistema composto de módulos independentes permite fácil deslocamento do mesmo, ou de partes, para o trabalho em campo.

- Para garantir a confiabilidade do sistema mesmo em ambientes hostis, é necessário que o sistema computacional tenha amplas tolerâncias de operação, relativos a variações de temperatura, instabilidade da tensão da rede, vibrações, poeira, etc.

Satisfazendo a grande parte dos critérios apresentados, foi utilizado um sistema disponível da HP [16], podendo o trabalho ser implementado em qualquer sistema computacional que preencha os requisitos explicitados.

3.3 - Estrutura global do programa

Para atender as diretrizes estabelecidas e tendo em vista a extensão do programa para automatização dos ensaios geométricos, foi o mesmo subdividido em quatro etapas, cuja execução, realiza-se de forma independente e que são:

- Definição do trabalho
- Controle do ensaio e aquisição de dados
- Processamento básico e específico
- Documentação

Na definição do trabalho são estabelecidos todos os parâmetros necessários para a realização do ensaio. Na aquisição, o computador controla o andamento do ensaio e realiza leituras dos sistemas de medição especificados. Na fase de processamento, cada tipo de ensaio possui diferentes particularidades (processamento específico), porém o processamento dos dados brutos, ou leituras, como cálculo de médias, variações, histerese, etc., é comum a todos eles (processamento básico). Programas para gerar gráficos e tabelas são empregados para documentação de dados brutos ou processados de qualquer tipo de ensaio e compõe a última etapa.

Para garantir uniformidade quanto a convenção de sinais dos valores lidos em qualquer ensaio e possibilitar a correlação entre dados de ensaios básicos e derivados, é adotado o sistema de coordenadas dextrogiro [17], por ser geralmente utilizado em máquinas.

O fluxograma da figura 3.1 mostra como estas etapas transcorrem independentemente uma das outras, o que viabiliza a realização de uma etapa sem necessidade de execução imediata das etapas anteriores ou subsequentes. Esta característica aumenta enormemente a flexibilidade operacional do sistema.

3.4 - Etapa de definição do trabalho

Na etapa de definição de trabalho são informados os parâmetros estabelecidos no planejamento do ensaio. Esta definição pode ser feita para vários ensaios, que serão realizados simultânea ou sucessivamente, e a cada ensaio é associado um arquivo de dados na memória permanente para utilização na etapa subsequente,

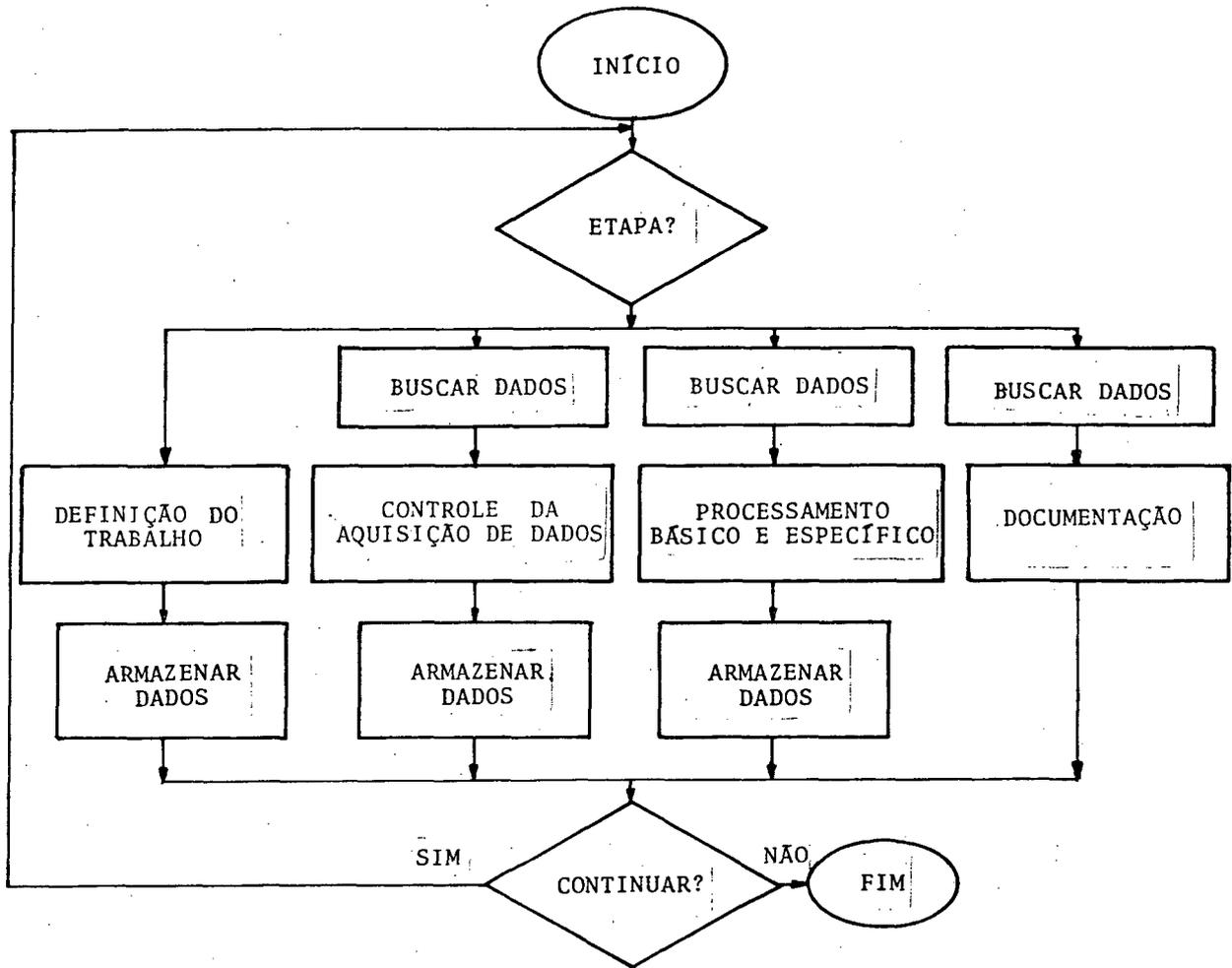


FIG. 3.1 - Estrutura global

ou seja, na aquisição de dados, tornando assim estas etapas independentes. Este fato tem importância especial na verificação de máquinas, por permitir que o bloqueio da mesma reduza-se somente ao tempo necessário à aquisição de dados.

Todas as informações referentes a definição do trabalho são documentadas para conferência e protocolo. São constituídas dos seguintes parâmetros:

a) Posições de medição:

Estabelecem as posições nominais, nas quais deverão ser realizadas as medições de alguma variável. Estas posições de medição serão estabelecidas ao longo do elemento sob ensaio. A localização, o número total e a forma de distribuição (com distâncias regulares ou irregulares) dependerão do tipo de ensaio do elemento ensaiado e dos objetivos do ensaio.

A determinação da histerese deve ser feita em todas as posições de medição definidas, mas também é possível ser avaliada

em apenas algumas destas posições. Nas posições extremas (primeira e última posição de medição), para determinação da histerese, é necessário dar-se um deslocamento que ultrapasse estas posições, de modo a garantir a correta aproximação de posicionamento. Com a finalidade de garantir este procedimento, posições de medição fictícias (fig. 3.2) podem ser definidas para dar o deslocamento desejado, nas quais, não serão realizadas medições, servindo apenas de orientação durante a realização da aquisição de dados. É possível também estabelecer posições de medição diferentes para sentidos opostos de deslocamento.

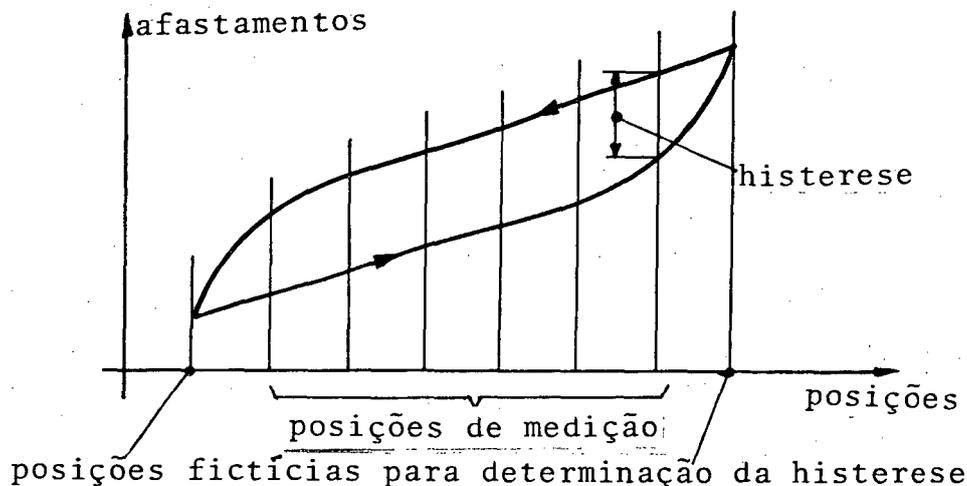


FIG. 3.2 - Posições de medição

Não será definido nesta etapa o número de ciclos de medição, ou seja, o número de repetições do ensaio com a finalidade de determinar a variação e/ou incerteza do resultado. Este parâmetro será estabelecido durante a própria aquisição, onde ao final de cada ciclo completo o operador opta por um novo ciclo ou término da aquisição. Operando desta maneira, o número de ciclos fica estabelecido de acordo com os resultados já obtidos, evitando, por exemplo, que seja definido um número de ciclos além do necessário, em função de boa repetibilidade das leituras, ou um número insuficiente em função da não estabilidade do objeto e/ou sistema de medição.

Como ao final de cada ciclo, os dados são armazenados na memória permanente, o número máximo de posições de medição que poderão ser definidas dependerá da própria capacidade de memória

do computador para dados e do número de ensaios simultâneos. Assim, por exemplo, se o computador tem uma memória disponível de 16 kbytes, e considerando que cada dado ocupa 8 bytes, pode-se ter até 2.000 posições de medição para um ensaio simples. Já para dois ensaios simultâneos, o número de posições será de 1.000, e assim sucessivamente.

Com a finalidade de facilitar o trabalho de preparação, as posições de medição de um ensaio podem ser as mesmas do ensaio definido anteriormente, assumindo-se automaticamente estes valores, o que deve ocorrer obrigatoriamente na realização de ensaios simultâneos.

b) Sistema de medição:

Na seleção do instrumento deve-se garantir, além da adequação operacional ao ensaio, que o mesmo não apresente erro superior a uma fração do erro esperado (tolerância) no elemento em teste [7]. A faixa de operação também deve ser compatível com a ordem de grandeza do erro a ser medido.

Para cada instrumento, quando selecionado, devem ainda serem informados parâmetros específicos, que serão descritos a seguir, para os sistemas com os quais o programa atualmente opera.

- Laser Interferométrico Modular: É um sistema que mede deslocamentos lineares e angulares e é utilizado na determinação de desvios de retilidade, posicionamento e inclinações [18]. Permite a medição independente e simultânea de até 6 parâmetros, um por módulo, havendo portanto a necessidade de definição do número do módulo utilizado no ensaio que esteja sendo definido.

- Laser de Alinhamento: Instrumento utilizado na realização de ensaios de retilidade e derivados [19]. Este, permite a determinação do desvio da retilidade em dois planos perpendiculares entre si, simultaneamente, sendo então necessário informar a qual destes planos se refere o ensaio em definição.

- Instrumentos via Sistema de Aquisição de Sinais: Instrumentos de medição que fornecem um sinal de saída análogo, permitem uma leitura automatizada através de um Sistema de Aquisição de Sinais [20]. Como este sistema permite a leitura de diferentes sinais, um por canal, viabiliza-se a execução de ensaios com diversos instrumentos, bastando especificar o canal relativo ao en-

saio em definição.

- Instrumentos via interface específica: Instrumentos que possuem um sinal de saída digital, podem ser acoplados ao computador via interfaces específicas, como as interfaces BCD |21|, IEC-488 |22|, Paralela |23|, ou Serial |24|. Desta forma, pode-se automatizar a aquisição de dados através da medição com, por exemplo, voltímetro digital, instrumentos com interface própria (medidores de deslocamento linear ou angular, circularímetros, etc.).

3.5 - Controle do ensaio e aquisição de dados

Esta etapa é regida pelo computador e transcorre como indicado pelo fluxograma da figura 3.3, onde observa-se os seguintes aspectos:

3.5.1 - Leitura e indicação contínua:

Após buscar da memória permanente os dados informados na etapa de definição do trabalho, o programa percorre um laço, realizando leituras dos instrumentos estabelecidos para os ensaios (se aquisição simultânea) e indicando estes valores, conseguindo-se com isso uma visualização permanente do comportamento dos valores medidos.

Antes do início da aquisição, é possível também, realizar leitura e indicação contínua individualmente para cada instrumento utilizado. Isto permite a verificação se os valores medidos estão coerentes, bem como realizar o ajuste dos sistemas de medição em relação ao elemento em teste.

3.5.2 - Parâmetros referentes aos sistemas de medição:

Além das informações que relaciona o instrumento a cada ensaio (ex.: canal do sistema de aquisição de sinais que dá o valor da inclinação medida por um nível eletrônico, ou módulo do laser interferométrico), existem parâmetros que dependem do instru-

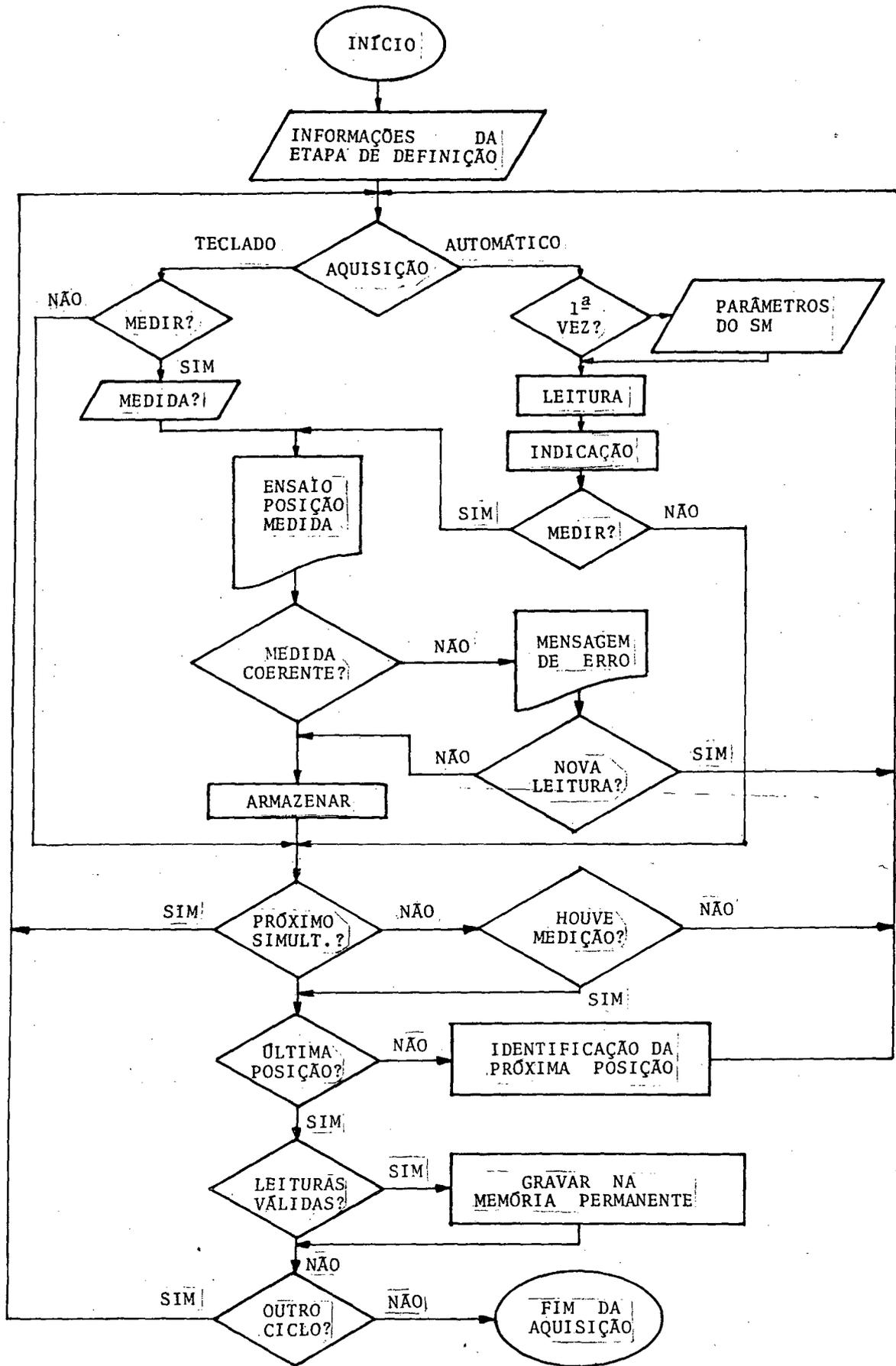


FIG. 3.3 - Controle de Aquisição

mento e das condições do elemento sob teste. Estes parâmetros , definidos antes da realização da primeira leitura, são:

- Número de leituras: Com o objetivo de eliminar os erros aleatórios do sistema de medição e/ou variações existentes no elemento em teste, cada medida do ensaio pode ser obtida a partir da média de n leituras feitas seqüencialmente em um espaço de tempo programável ou dependente do instrumento.

- Função transferência: Na aquisição automática, obtém-se como leitura dos instrumentos um valor de tensão (corrente , pulsos, etc.), que para ser transformado em uma medida do ensaio na sua respectiva unidade, necessita que seja transformada segundo a função transferência do sistema. Esta função pode ser do tipo linear e é informada através dos coeficientes linear e angular bem como pode ser uma função qualquer que é informada através de uma poligonal dada por certo número de pontos coordenados.

Este recurso pode ser utilizado para correção de erros sistemáticos dos sistemas de medição, elevando a precisão da medição.

- Fator de compensação: Em função de certos instrumentos terem comportamento dependente de grandezas, como temperatura , pressão, umidade, etc., um fator de compensação poderá ser aplicado aos valores lidos para ter-se medidas mais precisas. Estas variáveis são introduzidas na rotina do sistema de medição manualmente (teclado) ou através de leitura automática de transdutores. Automaticamente, são atualizadas antes de cada medição e manualmente, são informadas no início da aquisição ou em qualquer momento desta etapa, possibilitando substituir os valores caso alterações nestas variáveis tenham sido constatadas.

- Faixa de utilização: Os instrumentos de medição possuem uma faixa na qual é válida a função transferência. A informação dos limites desta faixa será útil na identificação de leituras não confiáveis ou ainda a ocorrência de erro na leitura.

3.5.3 - Aquisição simultânea

Através de um comando do operador (tecla especial, acionamento de um sinal - disparo, etc.) ou em função de um sinal pro

veniente do próprio objeto sob ensaio (ex.: sinal de posicionamento de uma máquina ferramenta com comando numérico) é acionada a medição automática ou via teclado, conforme sistema de medição utilizado.

Após identificado o comando de medição, é iniciado um novo laço de leituras de todos os instrumentos, viabilizando a aquisição quase simultânea, assumindo-se estes valores como medidas do ensaio. O ensaio simultâneo pode ser de uma grandeza de controle apenas (ex.: deformação, temperatura, pressão, etc.), o que dá uma maior versatilidade aos trabalhos de análise.

3.5.4 - Registro e verificação da coerência das medidas:

Feita a aquisição, as medidas são apresentadas via impressora com a indicação da respectiva posição nominal de medição e o ensaio correspondente, já que para cada posição de medição haverá mais de uma medida, se houverem ensaios simultâneos.

Cada medida é comparada com os valores limites pré-estabelecidos, e uma mensagem de erro é enviada ao operador quando ela extrapola estes valores. Desta forma evita-se erros grosseiros, como leituras além dos limites da faixa de medição do instrumento, erro por desajuste do sistema, interferências momentâneas sobre a instrumentação, etc.

3.5.5 - Armazenamento dos dados

Ao final de cada ciclo de medição, a critério do operador, os dados são armazenados na memória permanente dando segurança contra, por exemplo, interrupções do ensaio por queda de tensão na rede ou em função de anomalias nos equipamentos. Os valores ficam na memória permanente disponíveis para a etapa de processamento. Se os dados forem julgados não válidos, por motivos quaisquer, podem ser substituídos pela realização de um novo ciclo.

3.6 - Processamento básico

Com os dados brutos e as informações sobre a etapa de aquisição armazenados, como posições de medição, número de ciclos realizados, medição com posicionamento em um sentido ou sentidos opostos para avaliação da histerese, etc., a próxima etapa do trabalho consiste no processamento básico, que inclui:

3.6.1 - Valor médio:

Ao calcular a média dos erros em cada posição de medição a partir dos valores obtidos nos diversos ciclos, o operador pode eliminar do processamento os ciclos em que, por exemplo, as condições não eram as desejadas, ou tinha ocorrido alguma anomalia. Por outro lado, para os ciclos a serem considerados no processamento pode ter ocorrido que o valor medido em uma determinada posição num determinado ciclo pode estar significativamente afastado da média, em função de uma anomalia qualquer. Estes valores são identificados pelo critério de Chauvenet [25], que rejeita qualquer medida que tenha um afastamento da média superior ao valor correspondente a uma probabilidade $P = 1/(2n)$, onde n é o número total de elementos da amostra em questão. Por exemplo, se $n = 10$, então $P = 0,05$, ou seja, a probabilidade de que algum valor da amostra caia além da faixa $\bar{m} \pm 1,96.S$, onde \bar{m} é a média das medidas e S o desvio padrão da amostra, é de 5%. Assim, uma medida com valor superior a $\bar{m} \pm 1,96 S$ será identificado como uma medida pouco confiável. A decisão sobre eliminação deste valor é do operador. No caso de rejeição, o valor médio e os demais cálculos estatísticos são realizados com as medidas remanescentes. É possível, portanto, eliminar do processamento um ciclo inteiro ou apenas determinados valores de um ciclo.

3.6.2 - Variação:

Conforme apresentado no capítulo anterior, alguns ensaios não possuem repetibilidade para erros medidos em uma mesma posição, como ocorre, por exemplo, na determinação dos erros

de posicionamento e retilineidade de trajetórias.

A variação em cada posição é determinada em função do desvio padrão calculado pelos valores obtidos nos vários ciclos de medição e da constante de Student t [9]:

$$V = \pm t \cdot S$$

O valor de t é tabelado com relação a probabilidade de enquadramento desejada, a qual na metrologia é normalmente de 95%.

Para um número pequeno de ciclos de medição (inferior a quatro), e nos casos em que os valores não se apresentem segundo a distribuição de Gauss, a variação pode ser determinada como sendo o módulo da diferença entre a média dos valores medidos e o maior desvio em relação a esta média (ítem 2.2.2a), evitando-se assim os valores irrealis que o método acima apresentaria.

3.6.3 - Incerteza do resultado:

Quando o desvio a ser determinado é invariável pela própria natureza do elemento sob testes, como, por exemplo, o desvio da retilineidade de uma régua, a variação das medidas que ocorre, é relativa ao sistema de medição, considerado até o momento isento de erros, mas que em condições reais apresentam uma incerteza de medição que pode ser reduzida através da realização de várias medidas (ciclos de medição), obtendo-se assim uma incerteza do resultado dada por:

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

n : número de leituras consideradas

t : constante de Student

S : desvio padrão

3.7 - Processamento específico

3.7.1 - Ensaio de retilidade

As técnicas de medição do erro de retilidade estão fundamentalmente ordenados em dois métodos: o método dos deslocamentos e o método das inclinações [1].

a) Método dos deslocamentos

Neste método, o sistema de medição estabelece uma reta padrão e possui um dispositivo de medição para determinar os afastamentos relativos entre esta reta e o elemento sob ensaio.

É um método aplicado a linhas ou trajetórias. O erro de alinhamento do padrão, indicado pelos coeficientes angular $\text{tg}\theta$ e linear D , são obtidos pelos respectivos parâmetros da reta de referência escolhida. A figura 3.4, apresenta este erro para a reta de referência obtida pelo método dos mínimos quadrados (mmq) e também para a reta de referência obtida pela definição do erro em dois pontos (desvios nulos na posição 1 e 8). Em ambos os casos, a correção do erro de alinhamento do padrão, ou seja, a determinação dos desvios em relação a reta de referência escolhida, é feito por:

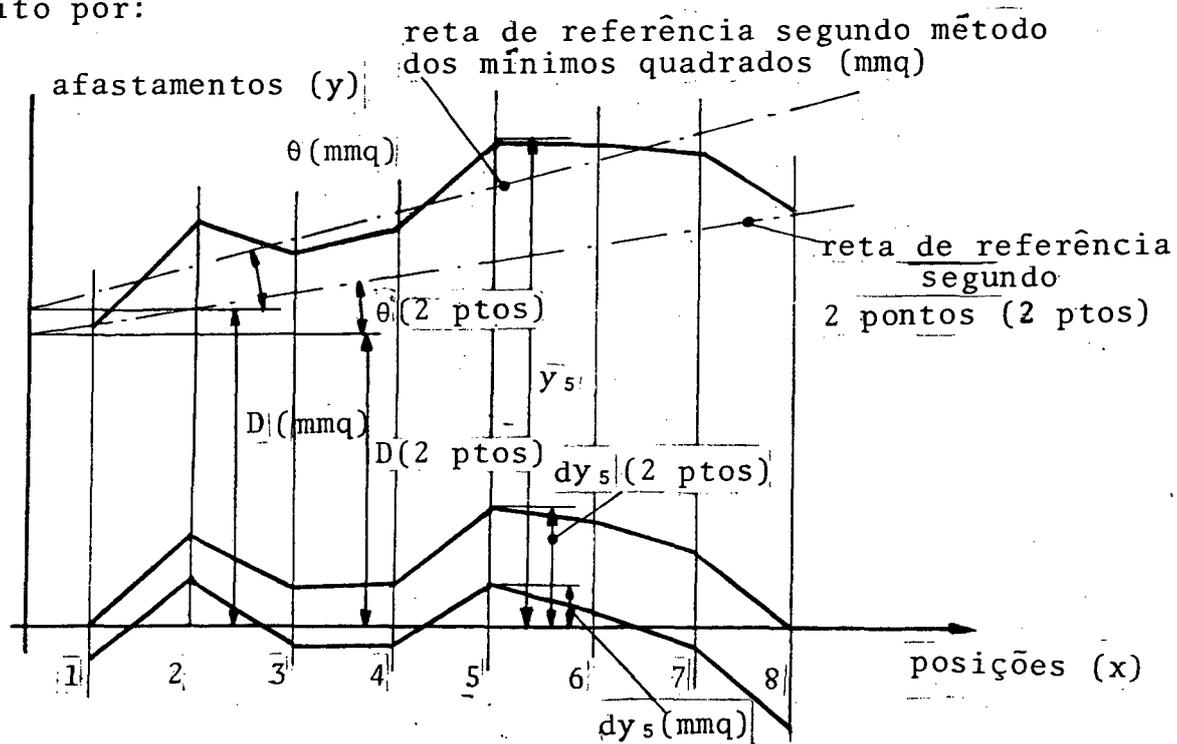


FIG. 3.4 - Correção do erro de alinhamento do padrão

$$dy_i = y_i - (\theta \cdot x_i + D), \quad i = 1, 2, \dots, k$$

dy_i : erro de retilidade

y_i : afastamento medido

x_i : posição de medição

$\text{tg}\theta$: coeficiente angular da reta de referência ($\mu\text{m}/\text{m}$)

D : coeficiente linear da reta de referência

k : número de posições de medição

Quando a reta de referência deve ser definida por dois pontos, como ocorre no caso de verificação de peças, e o(s) ponto(s) em que se deseja definir o erro não coincidir com uma posição de medição, o programa aceita e realiza os cálculos com base nos afastamentos iniciais no(s) ponto(s) calculado por interpolação lineares entre os valores das posições adjacentes ou por extrapolação dos mais próximos quando o ponto for externo ao trecho ensaiado.

Para cada posição de medição tem-se ainda os seguintes dados processados:

- média dos valores medidos (ítem 3.6.1)
- variação (ítem 3.6.2)
- incerteza do resultado (ítem 3.6.3)
- desvios corrigidos: É o desvio em relação à reta de referência escolhida.

- inclinação: Determinada em relação à reta de referência e para cada posição de medição é obtida pela média entre os gradientes relativos a posição anterior e posterior.

- histerese e média global: Quando se trata de trajetórias, a histerese pode ser uma informação desejada, calculada para cada posição de medição pela diferença entre afastamentos medidos no sentido de valores decrescentes de posições de medição ($y_{i\downarrow}$) e os afastamentos no sentido crescente ($y_{i\uparrow}$):

$$h_i = y_{i\downarrow} - y_{i\uparrow} \quad i = 1, 2, \dots, k$$

k : número de posições de medição

A média global, ou seja, a média dos afastamentos medidos nos dois sentidos, para cada posição de medição, é também calculada, quando se dispõe destes valores.

Como parâmetro reduzido, o erro global de retilineidade (ER) é calculado sempre pela diferença entre os erros máximos em relação a reta de referência, incluindo todos os erros ou apenas parte deles, como por exemplo, considerando os erros obtidos em somente um dos sentidos de medição, para a determinação de ER[↑] ou ER[↓]. O erro global de retilineidade inclui a variação dos erros mas desconsidera a incerteza do resultado.

Tem-se ainda, como parâmetro reduzido, a média do módulo das inclinações $|\overline{\rho}|$ e também o valor máximo em módulo $|\rho_{\max}|$.

O processamento dos dados referentes ao ensaio de retilineidade permite também determinar desvios em posições que não coincidam com as posições de medição, através de interpolações lineares com os erros já conhecidos. Com isso, por exemplo, pode-se avaliar os desvios em posições impossíveis de medir, por dificuldades impostas pelo sistema de medição ou o próprio objeto sob teste. Outra aplicação importante desta possibilidade é no processamento da retilineidade de subensaios do ensaio de planicidade, onde as posições de conexão entre os subensaios (ver ítem 2.6.1) não coincidem com posições de medição.

b) Método das inclinações

É realizado com instrumentos de medição de inclinação (nível, autocolimador, etc.). As posições de medição são equidistantes e igual ao comprimento "a" do carro de assentamento, ou seja, da base de apoio do sensor do instrumento de medição [13] (fig.3.5). O sistema estabelece intrinsecamente uma direção de referência, dada em alguns casos pela posição inicial do carro de assentamento. O erro de posição subsequente é determinado a partir da inclinação entre a direção de referência e a nova direção assumida pelo carro apoiado sobre a linha. O desvio relativo entre duas posições é dado por:

$$\Delta y_i = a \operatorname{tg} \alpha_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots, k$$

- i : posição de medição
 α_i : inclinações
 k : número de posições de medição

O afastamento em cada posição de medição (y_i) é portanto, determinado por:

$$y_j = \sum_{i=1}^j \Delta y_i$$

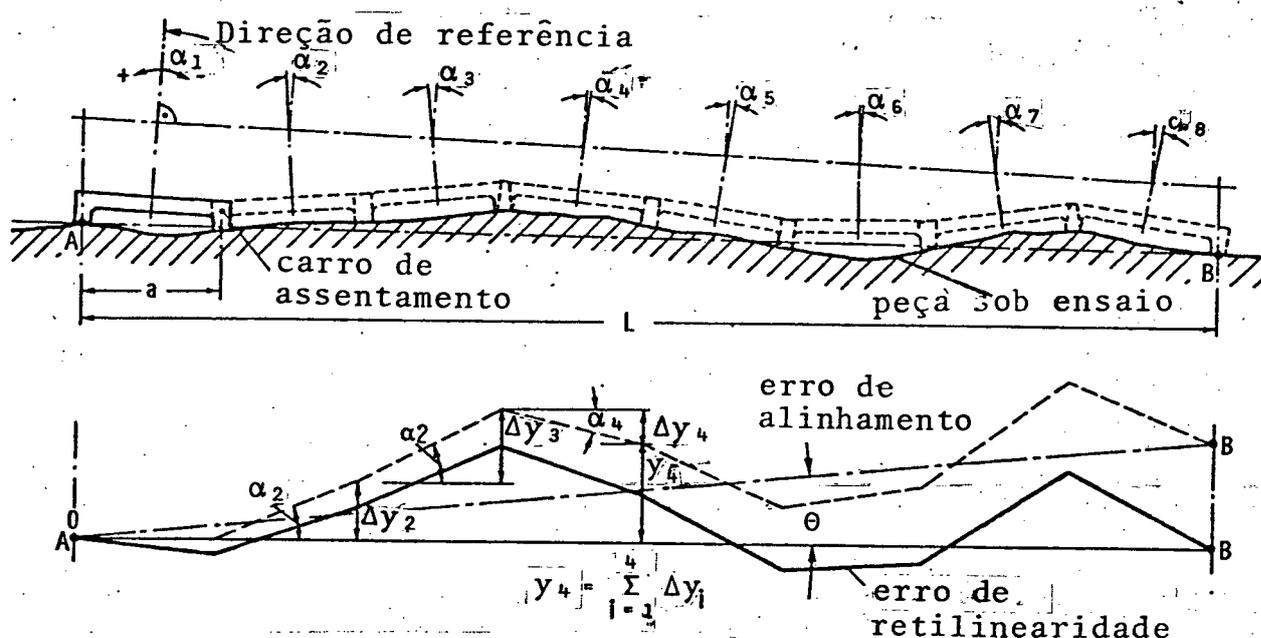


FIG. 3.5 - Retilinearidade pelo método das inclinações

O erro na primeira posição ($i = 0$) é inicialmente nulo, já que é o ponto de partida para determinação dos outros erros. Após a obtenção dos erros através das inclinações, o processo segue procedimento idêntico ao método dos deslocamentos.

Por não ter-se onde apoiar o sensor do sistema de medição, no caso de trajetórias, o método das inclinações restringe-se ao ensaio de linhas, que se consideradas estáveis faz com que as variações das leituras sejam de responsabilidade do sistema de medição, ou seja, de sua incerteza de medição. Como cada erro é calculado em relação ao desvio na posição anterior, a incerteza do valor do erro envolverá incerteza dos valores determinados

anteriormente (I_{m_i}), sendo assim cumulativa (fig. 3.6) e pode ser determinada por:

$$I_j = a \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^j I_{m_i}^2}$$

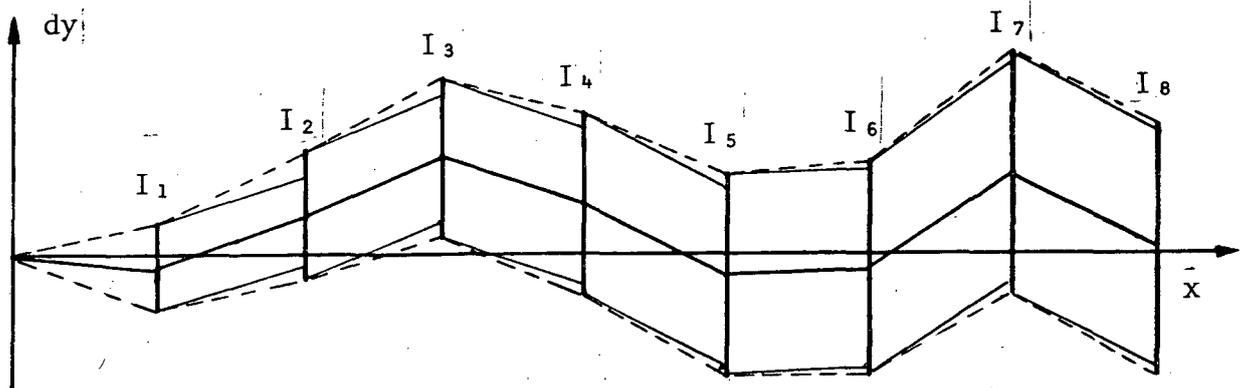


FIG. 3.6 - Incerteza cumulativa para método das inclinações.

Para efeito de análise do método, supor-se-á uma incerteza constante para o instrumento utilizado (ex.: nível eletrônico)

$$I_{m_i} = I_m = \text{constante}$$

Substituindo na expressão da incerteza do valor do desvio, para a última posição de medição tem-se:

$$I_k = a \cdot \sqrt{k I_m^2} = a \cdot I_m \cdot \sqrt{k}$$

Sabendo também que o comprimento total do elemento verificado vale:

$$L = k \cdot a \quad \therefore a = \frac{L}{k}$$

pode-se escrever que:

$$I_k = \frac{L}{k} \cdot \sqrt{k} \cdot I_m$$

ou

$$I_k = \frac{L}{\sqrt{k}} \cdot I_m$$

Esta expressão mostra que a incerteza do valor do desvio da última posição é diretamente proporcional ao comprimento da linha a ser verificada e inversamente proporcional ao número de medições. Conclui-se desta análise teórica que para um mesmo comprimento L é mais indicado, pequenas distâncias entre posições de medição, ou seja, um maior número de medições possíveis. Na prática o número de medições será limitado em função de tempo e da própria probabilidade de surgirem erros adicionais não previstos no equacionamento.

3.7.2 - Ensaio de posicionamento

Para este ensaio, a metodologia desenvolvida está voltada a determinação do desvio de posicionamento linear.

O erro de posicionamento (EPo) e o erro de escalonamento (α) são os parâmetros reduzidos para apresentação dos resultados. O erro de escalonamento é obtido pelo coeficiente angular da reta de regressão de todos os desvios ou parte deles, podendo ser calculado para determinada direção ou trechos do elemento verificado.

Para cada posição de medição, tem-se ainda os seguintes dados processados:

- Posição real: Média dos valores obtidos nos vários ciclos de medição.

- Erros : Para as posições escolhidas (nominais), o desvio de posicionamento é calculado por:

$$\text{Erro} = \text{Posição real} - \text{Posição nominal}$$

- Variação (item 3.6.2)
- Incerteza do resultado (item 3.6.3)
- Histerese e média dos erros nos dois sentidos quando aplicável.

3.7.3 - Ensaio derivados da retilineidade

a) Paralelismo e Ortogonalidade

O erro de paralelismo ou ortogonalidade entre dois elementos é determinado pela diferença entre o ângulo formado entre suas retas de referência e o ângulo ideal. Assim, o processamento é igual, pois a única diferença entre estes ensaios é o ângulo do padrão, que será nulo para o paralelismo e 90° para a ortogonalidade. O desvio é, portanto, determinado por:

$$\Delta\theta = \text{tg}\theta_2 - \text{tg}\theta_1$$

Os valores de θ_1 e θ_2 são obtidos pelo erro de alinhamento do padrão em relação a cada elemento, ou seja, ângulo entre a reta padrão e a reta de referência. O valor de $\Delta\theta$, quando multiplicado pelo comprimento de referência, corresponde a EP (erro de paralelismo) ou EO (erro de ortogonalidade).

Quando conhecido, o erro de ortogonalidade do padrão pode ser introduzido nos cálculos para compensação.

b) Planicidade

O processamento dos dados do ensaio de planicidade feito a partir de sub ensaios de retilineidade segundo uma malha consta das seguintes etapas:

- Processamento dos sub ensaios de retilineidade: O processamento individual dos dados destes sub ensaios deve garantir que cada reta de referência esteja contida no plano de referência. Para tanto, devem ser conhecidos os desvios em relação ao plano de referência em pelo menos duas posições. Estes desvios são calculados através da conexão entre os sub ensaios, conforme apresentado no item 2.6.1.

- Organização dos dados: Após o processamento dos dados referentes aos sub ensaios, os desvios em relação ao plano de referência são agrupados de maneira ordenada, em uma matriz, associando-se a cada posição de medição no plano verificado o respectivo desvio, para posterior processamento e documentação.

- Escolha do plano de referência: Semelhantemente ao caso da retilineidade, onde a reta de referência pode ser definida

pelos erros em duas posições, no ensaio de planicidade o plano de referência pode ser estabelecido através da definição dos desvios, em três posições. Com isso, por exemplo, pode-se corrigir a posição inclinada do plano de referência inicial em relação ao elemento verificado, ou também tomar como base posições especiais, como pontos de apoio, no caso de peças.

É possível também fazer o plano de referência coincidir com o plano ajustado aos desvios, calculado pelo método de regressão múltipla [24]. Este procedimento aplica-se, principalmente, ao estudo da planicidade de trajetórias.

c) Alinhamento

O alinhamento entre dois elementos é caracterizado pelo ângulo formado entre suas retas de referência e o deslocamento relativo entre elas.

As retas de referência podem ser estabelecidas pelos desvios definidos em duas posições, como normalmente ocorre na verificação de linhas, ou pela reta de regressão, como ocorre na determinação entre trajetórias.

O alinhamento de elementos considerados pontuais, como os mancais de um motor, pode ser considerado como um simples ensaio de retilineidade, onde cada elemento corresponde a uma posição de medição.

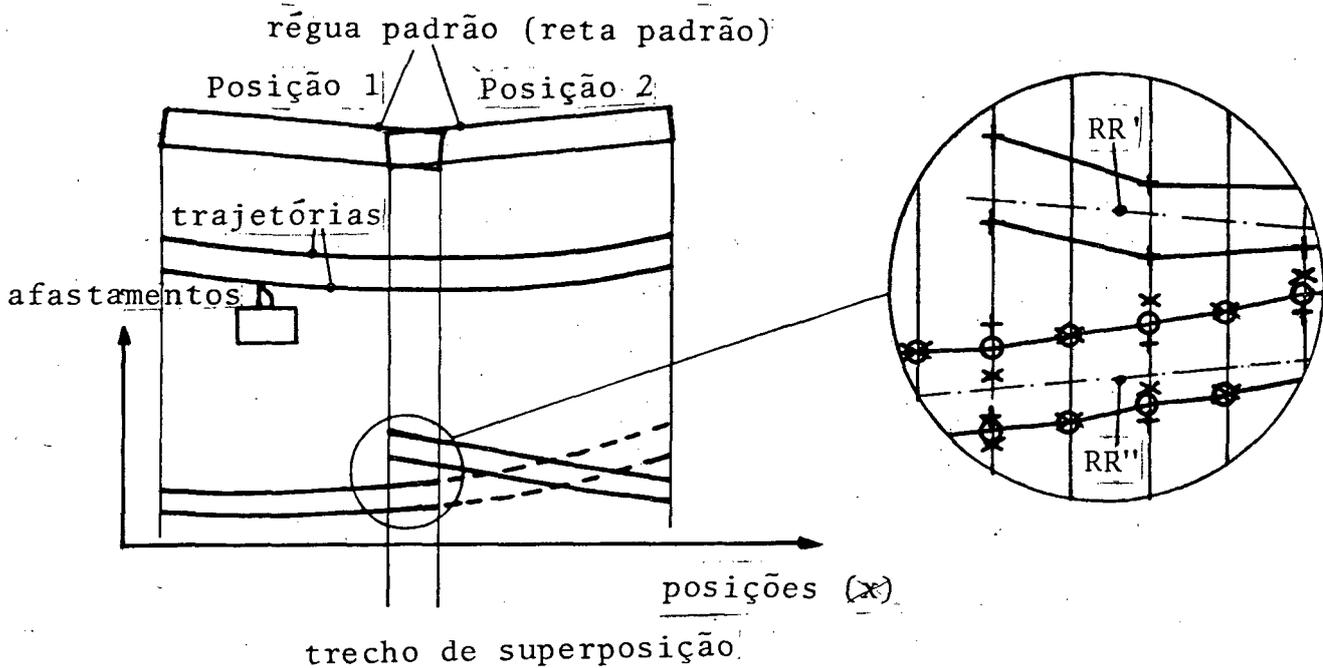
3.7.4 - Recursos especiais

Métodos não convencionais para realização de ensaios geométricos, bem como procedimentos especiais de processamento dos dados permitem eliminar limitações operacionais impostas pelos sistemas de medição e ampliar enormemente as aplicações do sistema. Foram implementados três recursos especiais que são descritos a seguir.

a) Superposição:

Para se determinar a retilineidade de um elemento cujo comprimento é superior ao do padrão disponível (reta padrão), realiza-se o ensaio por etapas. Mede-se inicialmente os desvios no comprimento permitido pelo padrão e posteriormente desloca-se o padrão para a medição do comprimento restante do objeto sob ensaio, sendo que este deslocamento deve ser tal que haja uma superposi-

ção com o trecho medido anteriormente, de maneira que os erros em um determinado sub trecho fiquem determinados pelos dois ensaios consecutivos, (fig. 3.7). O procedimento deve repetir-se até que os desvios sejam medidos ao longo de todo o comprimento do elemento a ensaiar.



+	erros	no 1º sub ensaio
x	erros	no 2º sub ensaio
0	erro	final

RR - reta de referência (obtida pelo método dos mínimos quadrados)

FIG. 3.7 - Ensaio de retilidade com superposição

A correção do erro de alinhamento do padrão em relação à posição anterior é feita da seguinte forma:

- Considera-se a reta de regressão no trecho de superposição para os dois ensaios considerados, como respectivas retas de referência.

Os erros registrados no segundo sub ensaio (segundo trecho medido) são calculados em relação à reta de referência do

primeiro sub_ensaio (primeiro trecho medido). Para posições de medições coincidentes nos dois sub ensaios (que podem ocorrer no trecho de superposição), toma-se a média dos respectivos desvios.

- Repete-se o procedimento quando mais de dois sub ensaios forem realizados, considerando-se os valores dos ensaios anteriores já corrigidos.

b) Método dos três cantos:

Por este método determina-se a retilidade de um elemento com o emprego de uma régua padrão, cujos desvios da retilidade são significativos e também desconhecidos [26]. A régua é colocada sobre dois apoios de mesma altura S (fig. 3.8) e medem-se em seguida os valores de M_{AC} em cada posição de medição ao longo do comprimento " L ", como mostra a figura 3.8b. As superfícies "A" da régua padrão e "C" do elemento a verificar possuem os desvios (desconhecidos) "a" e "c", respectivamente. Para cada posição de medição, tem-se pois a equação:

$$M_{AC} + l_{AC} = S, \text{ sendo } l_{AC} = a + c$$

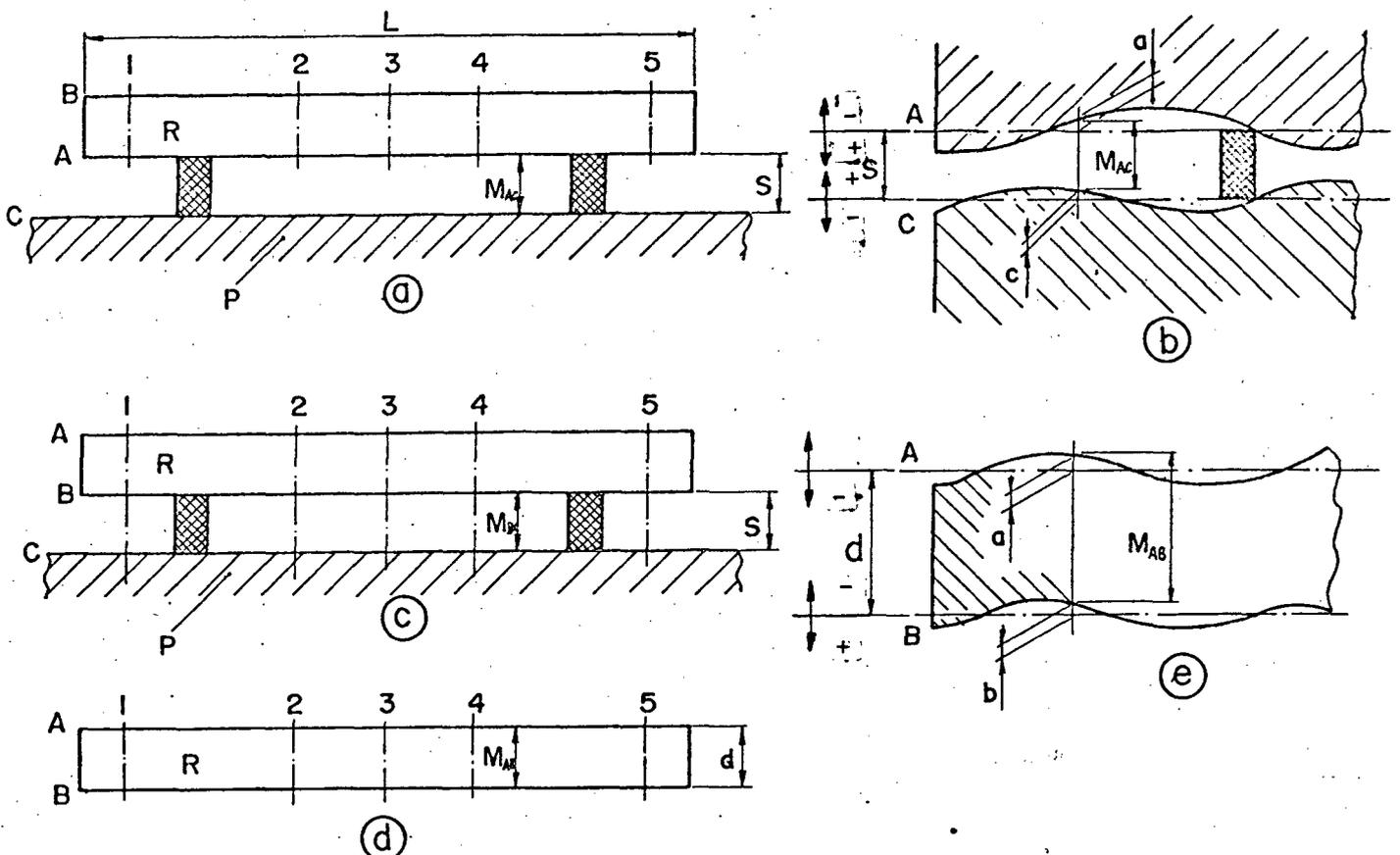


FIG. 3.8 - Retilidade pelo método dos três cantos.

Nas mesmas posições, porém com a superfície "B" da régua voltada para baixo, tem-se:

$M_{BC} + l_{BC} = S$, sendo $l_{BC} = b + c$, onde "b" e "c" são os desvios da retilidade (desconhecidos) das superfícies "B" e "C", respectivamente.

Finalmente, mede-se a largura da régua, também nas mesmas posições, obtendo-se as medidas M_{AB} . Como mostra a figura 3.8e, tem-se:

$M_{AB} - l_{AB} = d$, sendo $l_{AB} = a + b$, onde "d" é a largura da régua nos pontos de apoio. Pela dificuldade de se obter o mesmo "d" nestas posições, o processamento prevê que a espessura da régua nos pontos de apoio sejam diferentes.

Como descrito, obtem-se, para cada posição de medição três equações com três incógnitas ("a", "b" e "c"), que podem ser a partir daí, determinadas e que correspondem aos desvios da retilidade das superfícies da régua e do elemento considerado.

Deve-se ressaltar que o desvio para cada uma das posições é dependente de três medições. Se as medições de M_{AC} , M_{BC} e M_{AB} têm as incertezas I_{AC} , I_{BC} e I_{AB} , respectivamente, a incerteza do resultado final é:

$$I = \sqrt{(I_{AC})^2 + (I_{BC})^2 + (I_{AB})^2}$$

c) Inclinação:

O ensaio de inclinação é processado segundo um ensaio básico (item 2.5) quando leituras correspondem a ângulos, os quais são dados por instrumentos como nível eletrônico, auto-colimador, etc.). Porém, os desvios angulares podem também ser determinados a partir de dois ensaios de posicionamento realizados simultaneamente. A figura 3.9 mostra um exemplo de ensaios de posicionamento segundo as trajetórias 1 e 2, em uma posição de medição. O posicionamento é realizado com aproximação em sentidos opostos, e os desvios angulares são calculados por:

$$\alpha \uparrow = (d_{x_2} \uparrow - d_{x_1} \uparrow) / D$$

$$\alpha \downarrow = (d_{x_2} \downarrow - d_{x_1} \downarrow) / D$$

α : erro angular

d_{x_1} : erro de posicionamento na trajetória 1

d_{x_2} : erro de posicionamento na trajetória 2

D : distância entre as trajetórias

\uparrow : posicionamento no sentido crescente

\downarrow : posicionamento no sentido decrescente

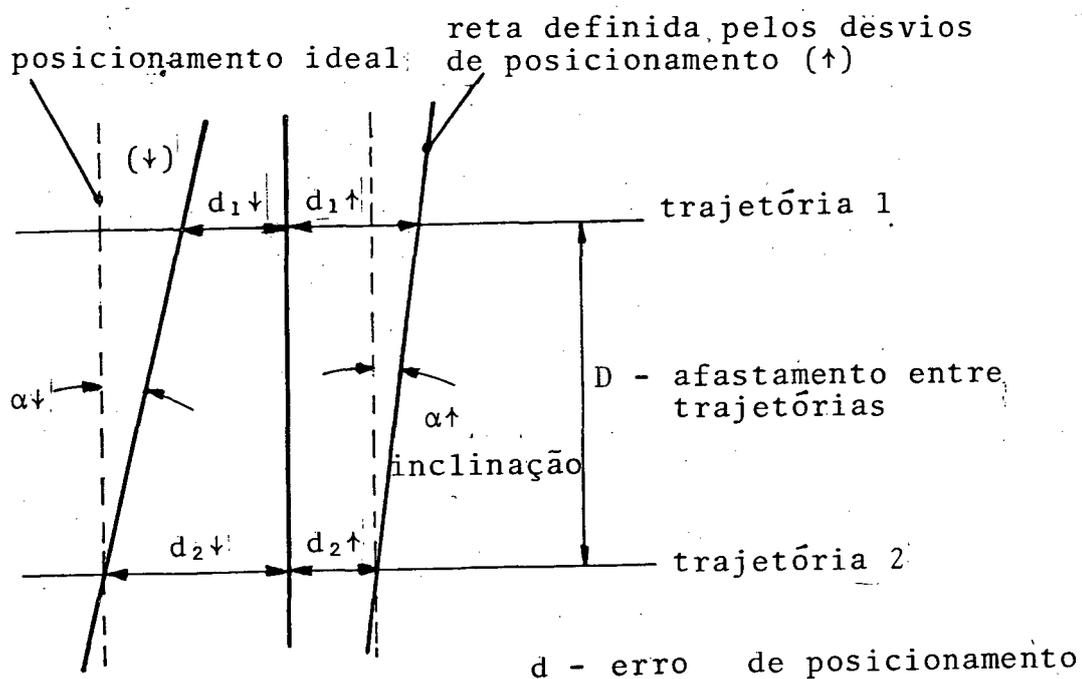


FIG. 3.9 - Inclinação a partir de ensaios de posicionamento.

Os erros angulares são calculados em cada posicionamento, e não pelos valores médios das leituras, determinando-se assim a variação das inclinações, através da medição de posicionamento em vários ciclos. Pela diferença entre os desvios angulares médios calculados por posicionamento em sentidos opostos, determina-se a histerese, para cada posição de medição.

3.8 - Documentação

3.8.1 - Memorial de ensaio

A geração de memoriais que documentam as informações básicas fornecidas sobre cada ensaio realizado é possível a qualquer instante, por estarem estes dados armazenados na memória permanente. Com estas informações, (posições de medição, instrumentação utilizada, ensaios simultâneos, local de armazenamento dos dados, etc.), pode-se facilmente identificar ou ter acesso aos dados brutos ou processados para documentação de qualquer ensaio realizado.

3.8.2 - Dados brutos e processados

Apesar dos dados brutos (leituras dos instrumentos) serem documentados durante a aquisição, a visualização global destes valores pode ser dificultada pela eliminação de ciclos ou mesmo pela realização de ensaios simultâneos em função do grande número de valores. Agrupando de maneira adequada os dados brutos válidos para cada ensaio separadamente, tem-se uma documentação mais própria para análise.

Os dados brutos ou processados podem ser assim documentados:

a) Tabelas:

Através de uma rotina especial, tabelas contendo as posições de medição e os respectivos dados brutos ou processados referentes a qualquer tipo de ensaio podem ser obtidas para documentação completa do trabalho.

b) Gráficos:

Como a visualização gráfica propicia uma fácil análise dos dados, uma rotina genérica para gerar gráficos objetiva dar máxima versatilidade nesta forma de documentação. Assim, através da introdução de sinais ou diferenciação entre o traçado das linhas podem ser distinguidos no gráfico os desvios nos ciclos de medição, média destes valores, identificação do sentido de medi -

ção, faixa de variações, etc.

Há possibilidade também de traçar as curvas referentes a somente um trecho do comprimento total verificado, inclusive com possibilidade de ampliação das escalas para análise mais detalhada.

c) Parâmetros reduzidos:

Cada tipo de ensaio tem os seus parâmetros reduzidos que sintetizam o comportamento geral do elemento verificado. Estes parâmetros são obtidos com facilidade e rapidez e podem ser suficientes como resultados, como ocorre na simples verificação de tolerâncias.

3.8.3- Documentação específica

Alguns ensaios exigem formas mais apropriadas para documentação com o fim de mostrar os resultados de forma mais clara. Estes ensaios são:

a) Paralelismo e ortogonalidade:

A representação gráfica destes ensaios inclui a indicação do desvio de paralelismo ou ortogonalidade juntamente com o desvio de retilidade (fig. 3.10). Para tanto, o plano onde os

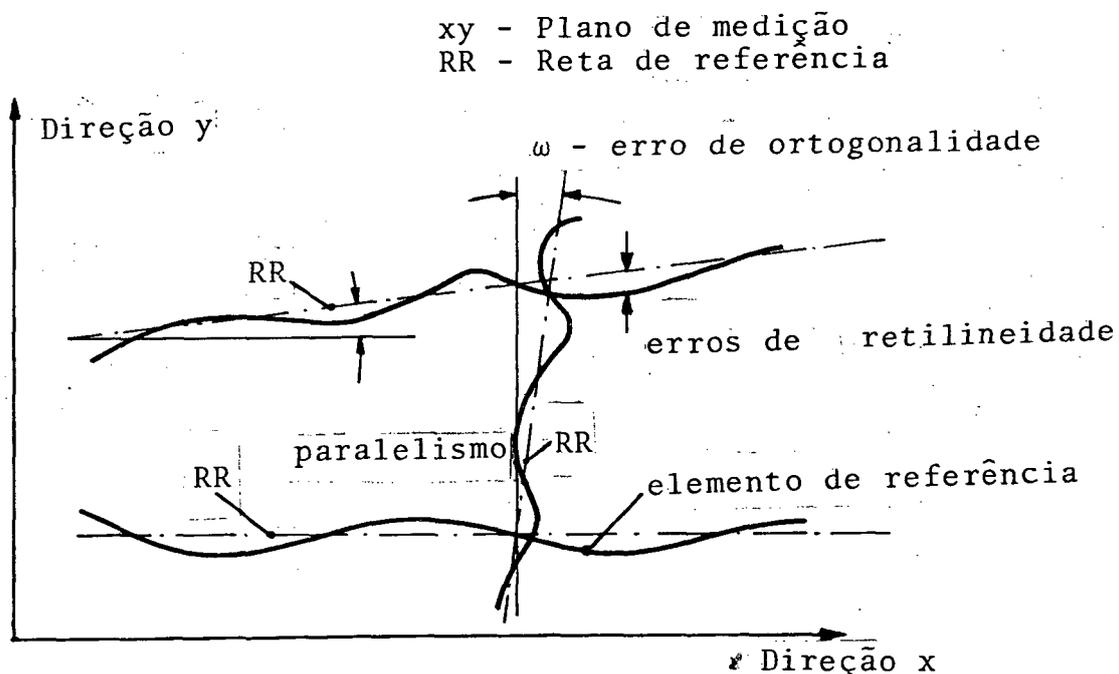


FIG. 3.10 - Apresentação gráfica de paralelismo e ortogonalidade

erros são medidos e é indicado pelos eixos coordenados do gráfico e os erros de retilineidade são estimados através de um fator que relaciona a amplitude dos mesmos com escala usada no gráfico.

Neste gráfico, o erro de alinhamento do padrão é corrigido em relação a um dos elementos e o erro de paralelismo ou ortogonalidade pode ser determinado para mais de um elemento, tomando como referência o primeiro. É possível a elaboração de mais de um gráfico, para outros elementos utilizados como referência.

b) Alinhamento:

Os resultados deste ensaio são apresentados em um gráfico onde nas abscissas tem-se as posições de medição dos elementos envolvidos e nas ordenadas uma escala para traçar juntamente com a reta de referência de cada elemento, os desvios da retilineidade.

O erro de alinhamento do padrão pode ser corrigido em relação a qualquer elemento envolvido no ensaio e o erro de alinhamento (EA) dos outros elementos em relação a este será indicado por seus parâmetros característicos.

c) Planicidade:

A apresentação dos resultados de um ensaio de planicidade, de elementos retangulares ou que podem ser subdivididos em partes retangulares, é feita de três maneiras:

- Indicação de cotas: Através de uma figura que tem a forma do plano verificado, em escala apropriada, os desvios da planicidade (cotas) são indicados em posições correspondentes as respectivas posições de medição.

- Perspectiva: Consiste em mostrar em perspectiva o plano de referência e os desvios calculados em toda a sua extensão, unindo os mesmos por poligonais, dando idéia da forma da superfície.

- Curvas de nível: São curvas que unem todos os pontos da superfície que possuem um desvio de planicidade pré-fixado, ou seja, uma dada cota em relação ao plano de referência.

As curvas de nível são obtidas por interpolações lineares entre os desvios determinados segundo uma malha. Para descrever o algoritmo de cálculo, será usada a figura 3.11, onde os pon

tos A,B,C e D são posições de medição adjacentes sobre a superfície ensaiada.

A,B,C,D - posições de medição

d_{AB}, d_{AC}, \dots - obtidos por interpolação

$d_{A,B,C,D}$ - erros de planicidade

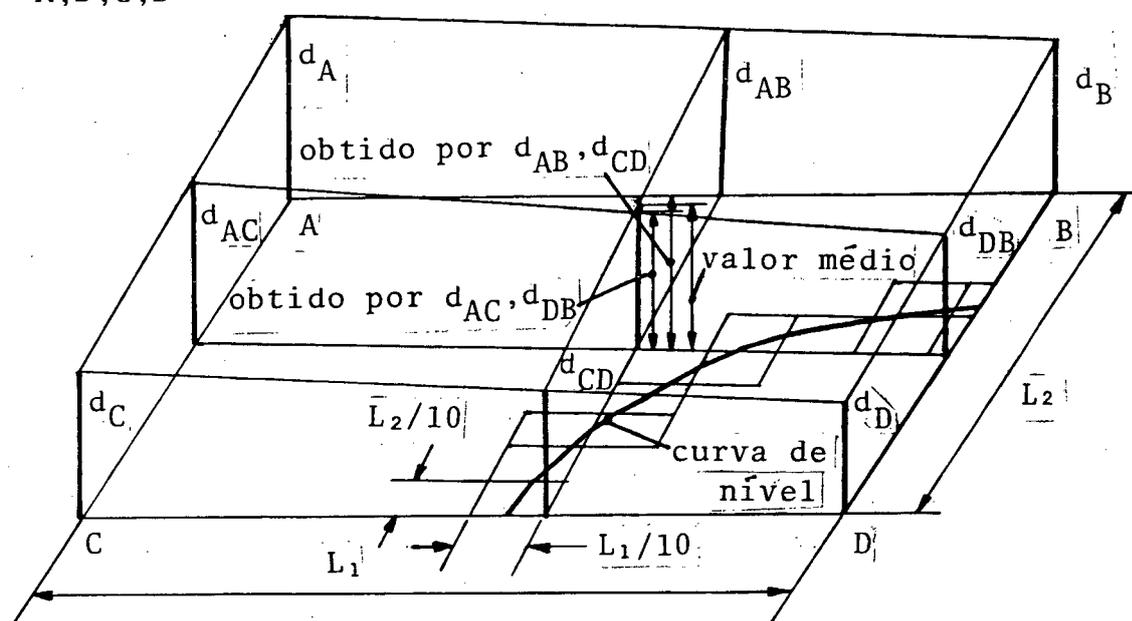


FIG. 3.11 - Procedimento para traçado das curvas de nível

A partir da reta CD, o primeiro ponto da curva correspondente a determinada cota é determinado por interpolação relativa, aos erros d_C e d_D e considerando a distância L_1 entre as posições C e D. Para calcular o próximo ponto da curva, determina-se os desvios nos vértices de um retângulo que limita o primeiro ponto, com lados iguais a $1/10$ dos respectivos lados do retângulo inicial ABCD (L_1 e L_2). Os erros nos vértices do retângulo menor que se encontram sobre a reta CD, são determinados apenas pelos desvios d_C e d_D . Nos vértices que se situam internamente ao retângulo ABCD, os desvios são determinados pela média dos valores calculados por duas interpolações, uma com os valores d_{AC} e d_{DB} e outra com d_{CD} e d_{AB} , que por sua vez são obtidos por interpolações com os erros d_C e d_A , d_D e d_B , d_C e d_D , d_A e d_B , respectivamente, conforme mostrado genericamente na mesma figura.

Com os erros nos quatro vértices do retângulo menor, o primeiro trecho da curva é traçado unindo o primeiro ponto já conhecido, com o ponto determinado também por interpolação atra -

vés dos erros calculados e o erro desejado.

O retângulo seguinte é definido com as mesmas dimensões ($L_1/10$ e $L_2/10$) e posicionado conforme o local em que é identificado o ponto anterior da curva. Dois retângulos destes definidos consecutivamente têm sempre um lado em comum, restando assim a determinação dos erros em apenas mais dois vértices, para dar continuidade à curva de nível.

Quando a curva extrapola o retângulo ABCD, a sistemática desenvolvida é aplicada no próximo retângulo definido por posições de medição do ensaio, internamente ao qual estará contida a curva.

A curva de nível será traçada até que seja identificado novamente o ponto inicial, formando uma curva fechada, ou até que os limites da superfície verificada sejam atingidos. Mais de uma curva referente a um erro podem existir em diferentes posições da superfície, e serão identificadas pelo programa.

3.9 - Aspectos operacionais

Em vista da grande extensão do programa, do grande volume de dados e das limitações de memória nos computadores, é necessário otimizar a sua utilização. Com este fim, o programa global encontra-se subdividido em programas parciais referentes a cada etapa do ensaio, que permanecem armazenados na memória permanente e só ocupam a memória do computador quando a respectiva etapa estiver sendo executada. Assim, torna-se possível a realização de ensaios que envolvam maior número de dados, fator importante na realização de ensaios simultâneos.

A figura 3.12 mostra a estruturação dos programas na memória em função da etapa em operação. A manipulação dos dados, ou seja, as rotinas de transferência de informações (dados) sobre o ensaio, de valores lidos ou processados, etc., da memória do computador para memória permanente e vice-versa, permanece continuamente na memória por ser necessária em todas as etapas.

Sendo as etapas de aquisição, processamento e documentação independentes, em uma fase inicial, um programa monitor busca

o programa referente a etapa desejada, que passa a ocupar a memória a partir do espaço delimitado pela rotina de manipulação dos dados.

As rotinas necessárias para aquisição automatizada com os instrumentos especificados para o ensaio, são introduzidas em ordem sequencial na memória do computador.

Em outra etapa, as rotinas para o processamento básico são colocadas na memória antes da definição do processamento específico, por serem utilizadas por estes programas.

Os dados são mantidos na memória após o processamento ou quando previamente processados são trazidos diretamente da memória permanente para documentação através de gráficos ou tabelas, tornando esta etapa também independente.

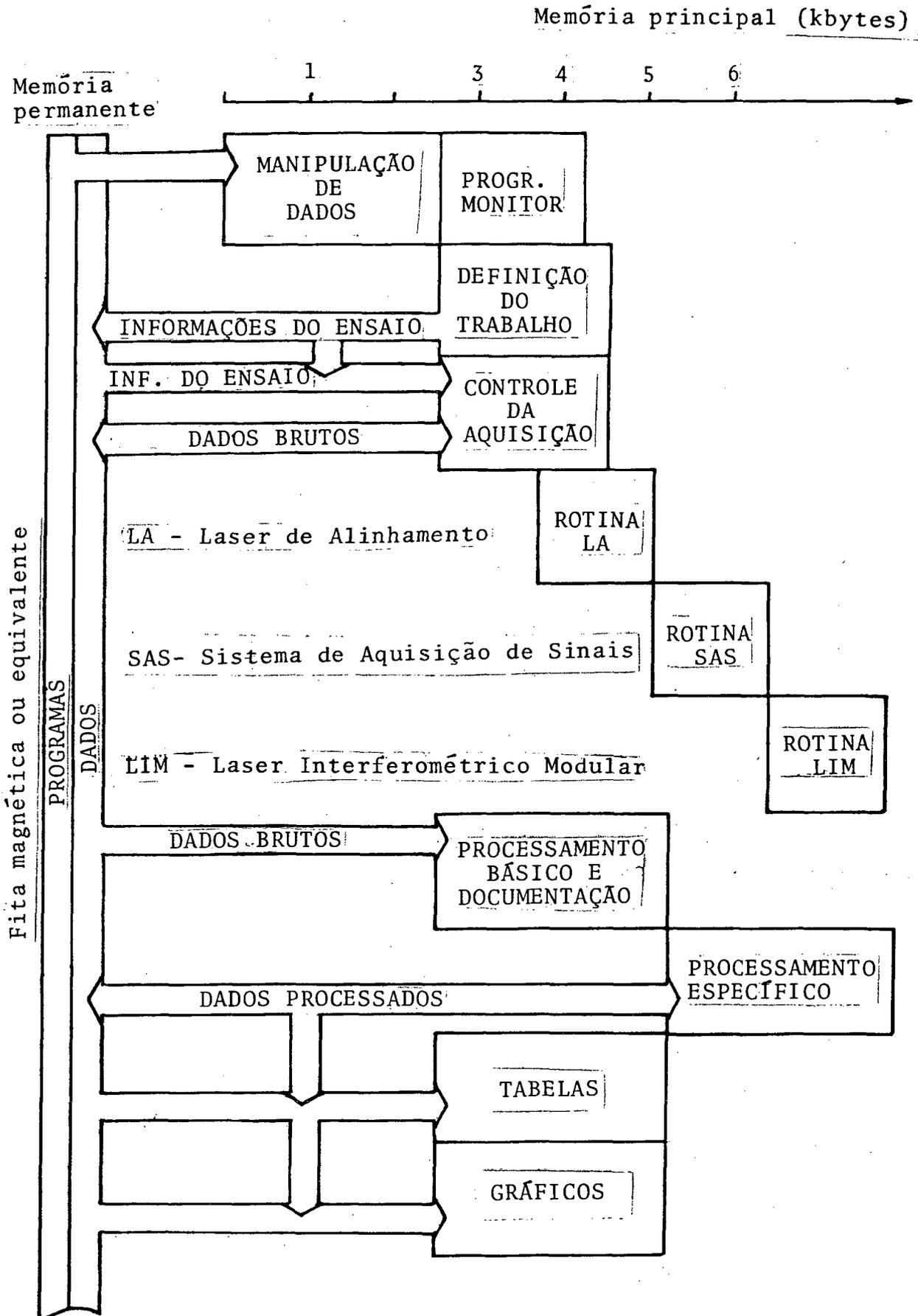


FIG. 3.12 - Utilização dos programas

4 - APLICAÇÕES

Para ilustrar a potencialidade da ferramenta desenvolvida e alcançada com a automatização dos ensaios geométricos, são apresentados neste capítulo alguns exemplos de aplicação, realizados durante o desenvolvimento e teste do sistema, onde os ensaios apresentam aspectos quanto a forma de aquisição, processamento e documentação, para abranger grande parte do trabalho desenvolvido.

4.1 - Trajetoória da ferramenta em uma furadeira de coordenadas de precisão

Utilizando-se régua padrão, esquadro padrão e um medidor indutivo de deslocamento colocado no lugar da ferramenta, mediu-se os erros de trajetórias da ferramenta de uma furadeira de coordenadas no plano paralelo ao plano da mesa (fig. 4.1) [27]. Foram realizados quatro ensaios de retilidade, a partir dos quais pode-se analisar as características geométricas de ortogonalidade e paralelismo dos movimentos. A figura 4.2 apresenta os parâmetros estabelecidos na etapa de definição do trabalho, que são: posições de medição e meio de aquisição das leituras, que, no caso,

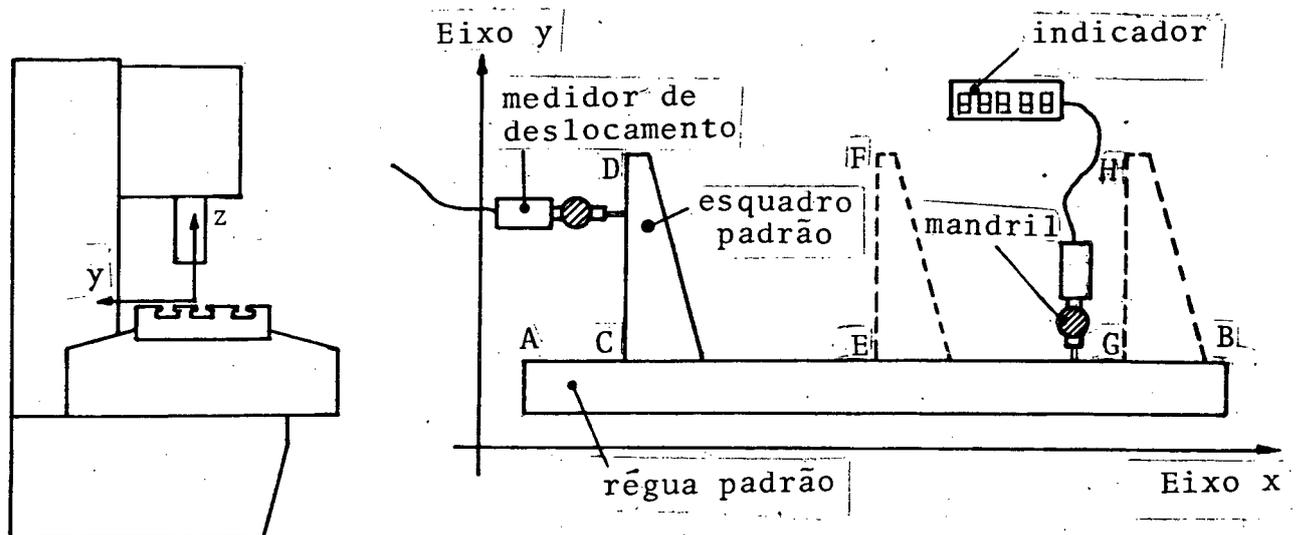


FIG. 4.1 - Ensaios geométricos em uma furadeira de coordenadas.

Num. ensaios: 4	Número total de ensaios
Setor: 197	Setor de referência para os ensaios
Ensaio: 1	Número do ensaio
Ret. mov. em X	Especificação do ensaio
Aqu. p/ teclado	Forma de aquisição
Histerese	Medição em dois sentidos
Pos. de medição	Numeração e indicação
1 0	das posições de medição
2 40	
3 80	
4 120	
5 160	
6 200	
7 240	
8 280	
9 320	
0 360	
1 400	
Ensaio: 2	Definição de novo ensaio
Ret. traj. X=40	
Aqu. p/ teclado	
Histerese	
Pos. de medição	
1 0	
2 20	
3 40	
4 60	
5 80	
6 100	
7 120	
8 140	
9 160	
Ensaio: 3	
Ret. traj. X=200	
Aqu. p/ teclado	
Histerese	
Mesmas posições	Foram adotadas as posições
Ensaio: 4	definidas no ensaio anterior
Ret. traj. X=360	
Aqu. p/ teclado	
Histerese	
Mesmas posições	

FIG. 4.2 - Parâmetros estabelecidos na etapa de definição do trabalho - memorial obtido através da impressora do computador.

são obtidas do indicador do medidor de deslocamento e introduzidas manualmente no computador, através do teclado.

A figura 4.3 apresenta os afastamentos medidos no plano horizontal, para o movimento da mesa na direção X da máquina. Os erros corrigidos, eliminando-se o erro de alinhamento do padrão são mostrados na figura 4.4. A indicação destes valores em todos os ciclos (\triangleright ; \triangleleft) e também da faixa de variação (linha tracejada) mostra a não repetibilidade do movimento, que pode ser função de variações térmicas, vibrações, folgas, etc., a qual é mais significativa na região próxima a origem do eixo. A ocorrência de folgas pode ainda ser confirmada pela histerese que se apresenta de forma bem caracterizada. Os dados brutos e processados deste ensaio (AB) são apresentados nas figuras 4.5 e 4.6, respectivamente, e os parâmetros reduzidos na figura 4.7.

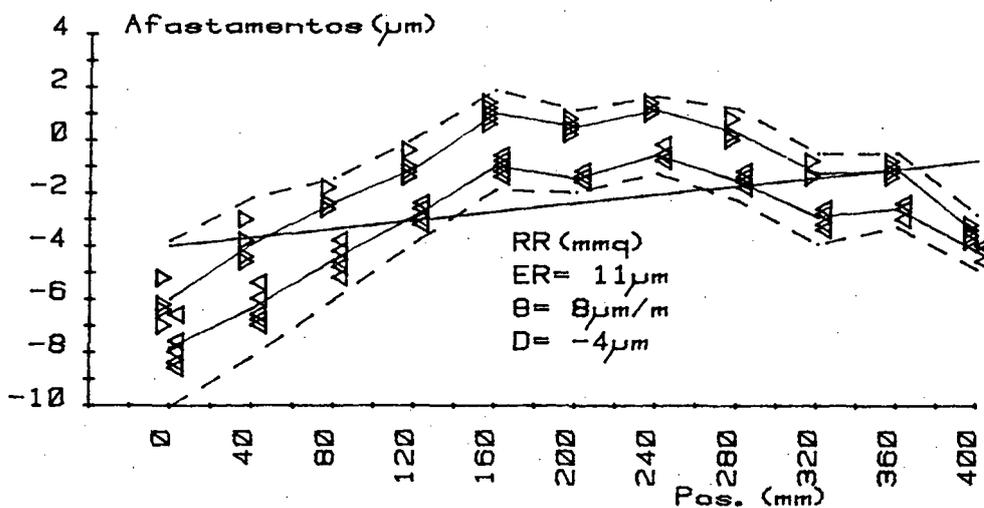


FIG. 4.3 - Ensaio segundo eixo X - plano horizontal

Gráfico integralmente gerado pelas rotinas de documentação e que incluem os valores medidos em cada um dos ciclos.

Simbologia: \triangleright ; \triangleleft afastamentos medidos

———— valor médio das medidas

----- limites da variação em relação ao valor médio

Como o erro de ortogonalidade (EO) e o erro de paralelismo são determinados em função do erro de alinhamento do padrão (θ) dos ensaios da retlineidade de que derivam, (ver item 2.7), a reta de referência de cada um destes ensaios foi sempre definida de forma idêntica, ou seja, pela reta de regressão, por se tra

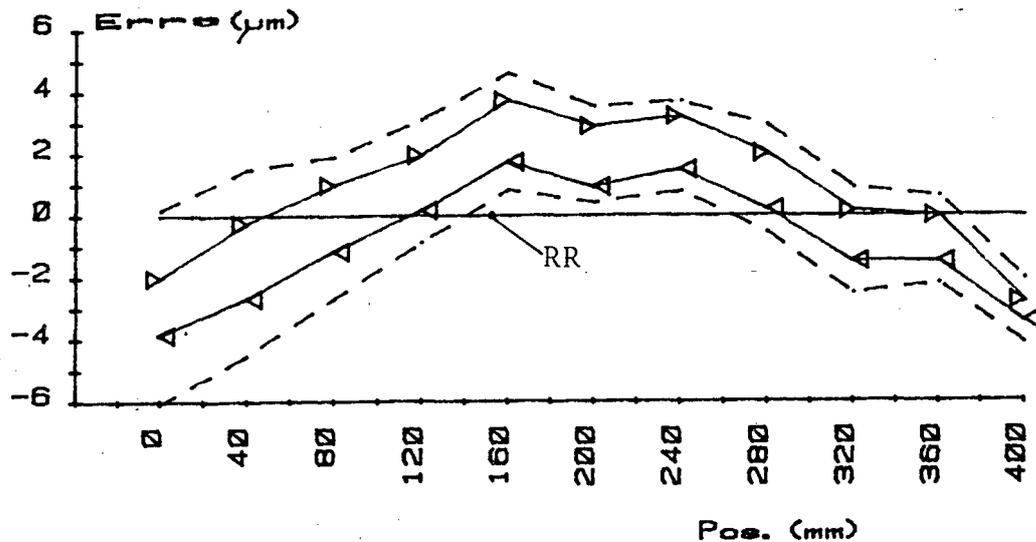


FIG. 4.4 - Erros de retilidade (dy) - trajetória x

- faixa de variação
- valor médio das medidas
- ▷ sentido crescente de aproximação
- ◁ sentido decrescente de aproximação
- RR - reta de referência estabelecida pelo método dos mínimos quadrados aplicado a todos os desvios

tar de trajetórias, calculada pelo método dos mínimos quadrados a plicado a todas as medidas feitas.

Através da figura 4.8, onde o ensaio do movimento na direção X (AB) foi tomado como base para apresentação dos resultados, pode-se analisar a ortogonalidade entre este movimento e os movimentos na direção Y nas trajetórias X = 40 mm (FC), X = 200 mm (GD) e X = 360 mm (HE). Representando as trajetórias aparecem apenas os valores médios dos erros de retilidade com as respectivas retas de regressão. Observa-se nesta figura que os erros de ortogonalidade são maiores nos extremos, devido à assimetria de massas sobre a estrutura.

O paralelismo é observado na figura 4.9, com o erro de alinhamento do padrão corrigido em relação ao ensaio de X = 40 mm (CF). A semelhança em forma e amplitude dos erros de retilidade das trajetórias na direção Y é lógica, já que estes movimentos são gerados sempre através das mesmas guias.

* DADOS BRUTOS *
Valores em μm

a	b	c	d	e	f
i	Y(1)	Y(2)	Y(3)	Y(4)	Y(5)
1	-5.20	-5.20	-6.20	-6.40	-7.00
2	-3.00	-3.80	-3.80	-4.40	-4.60
3	-1.80	-2.40	-2.40	-2.60	-2.60
4	-0.40	-1.20	-1.00	-1.40	-1.40
5	1.40	0.80	1.20	1.00	0.60
6	0.80	0.60	0.40	0.20	0.40
7	1.40	1.00	1.20	1.00	1.00
8	0.00	0.20	0.20	0.00	0.80
9	-1.40	-1.40	-1.40	-1.40	-0.80
10	-1.00	-1.20	-1.40	-1.20	-0.80
11	-3.20	-3.80	-3.80	-3.60	-3.40
12	-4.00	-4.20	-4.20	-4.60	-4.00
13	-2.40	-2.60	-2.40	-3.00	-2.60
14	-2.60	-2.80	-3.40	-3.20	-2.60
15	-1.20	-1.40	-1.80	-1.80	-1.60
16	-0.20	-0.60	-0.60	-0.80	-0.80
17	-1.20	-1.60	-1.40	-1.60	-1.60
18	-0.60	-0.80	-1.00	-1.40	-1.20
19	-2.40	-3.00	-2.60	-3.20	-3.20
20	-3.80	-4.20	-4.60	-4.80	-5.20
21	-5.40	-6.00	-6.60	-6.80	-7.00
22	-6.60	-7.60	-8.00	-8.40	-8.60

FIG. 4.5 - Afastamentos medidos em relação ao padrão
 $y(i,j)$: afastamento na posição i no ciclo j

* DADOS PROCESSADOS *

a	b	c	d	e	f	g	h
i	Posicao (mm)	Afast. (um)	Inc. do res.	Var. total	Inclin. (um/m)	Erro corrig.	Media Hist.
1	0.0	-6.0	1.0	2.2	\$\$\$\$\$\$\$	-2.0	-2.9
2	40.0	-3.9	0.8	1.8	42.4	-0.3	-1.5
3	80.0	-2.4	0.4	0.9	29.4	0.9	-0.2
4	120.0	-1.1	0.5	1.2	22.4	1.8	0.9
5	160.0	1.0	0.4	0.9	42.4	3.5	2.5
6	200.0	0.5	0.3	0.6	-22.6	2.6	1.6
7	240.0	1.1	0.2	0.5	6.4	2.8	2.0
8	280.0	0.2	0.4	0.9	-31.6	1.6	0.7
9	320.0	-1.3	0.3	0.8	-47.6	-0.4	-1.2
10	360.0	-1.1	0.3	0.6	-5.6	-0.6	-1.3
11	400.0	-3.6	0.3	0.7	-70.6	-3.4	-3.7
12	400.0	-4.2	0.3	0.7	\$\$\$\$\$\$\$	-4.0	-0.6
13	360.0	-2.6	0.3	0.7	-49.6	-2.1	-1.5
14	320.0	-2.9	0.5	1.0	-1.6	-2.0	-1.6
15	280.0	-1.6	0.3	0.7	-43.6	-0.2	-1.8
16	240.0	-0.6	0.3	0.7	-33.6	1.1	-1.7
17	200.0	-1.5	0.2	0.5	12.4	0.6	-2.0
18	160.0	-1.0	0.4	0.9	-21.6	1.5	-2.0
19	120.0	-2.9	0.5	1.0	37.4	-0.0	-1.8
20	80.0	-4.5	0.7	1.5	31.4	-1.3	-2.2
21	40.0	-6.4	0.8	1.8	36.4	-2.7	-2.4
22	0.0	-7.8	1.0	2.2	27.4	-3.8	-1.8

FIG. 4.6 - Retilidade da trajetória X - desvio dy

Identificação dos valores das colunas

a - nº posição de medição

b - coordenada X da posição de medição. Observa-se que os valores são crescentes e posteriormente decrescentes para permitir a determinação da histerese

c - média dos afastamentos

d - incerteza do resultado

e - variação, por se tratar de uma trajetória

f - inclinações, ou seja, gradiente de variação dos desvios

g - erro corrigido em relação à reta de referência escolhida

h - média global entre os sentidos (posições de 1 a 11) e histerese (posições de 12 a 22)

Identificação do processamento

Número do ensaio

Especificação do ensaio

Número de ciclos processados

Reta de referência estabelecida pelo método dos mínimos quadrados aplicado às posições indicadas

Erro de retilidade total

Erros máximos positivos e negativos

Erro de alinhamento do padrão

Coefficiente angular

Coefficiente linear

Média do módulo das inclinações

Valor máximo em módulo

FIG. 4.7 - Processamento do ensaio de retilidade

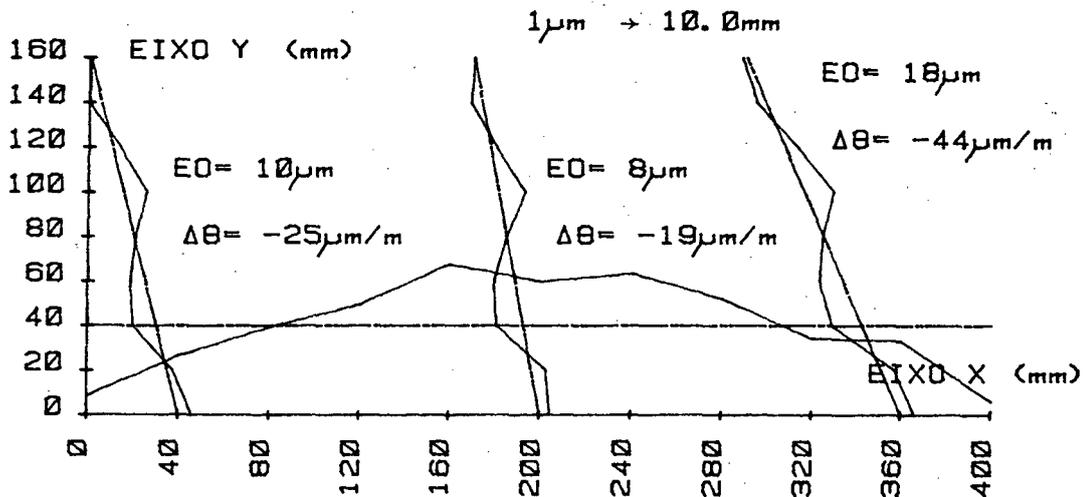


FIG. 4.8 - Ortogonalidade entre movimentos

E_0 = erro de ortogonalidade

$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \lambda$ ou ω - ângulo correspondente ao erro de paralelismo ou ortogonalidade.

θ_1, θ_2 - erro de alinhamento do padrão para os respectivos elementos.

1 μm \rightarrow 10 mm - relação entre as escalas do gráfico e os erros de retilidade.

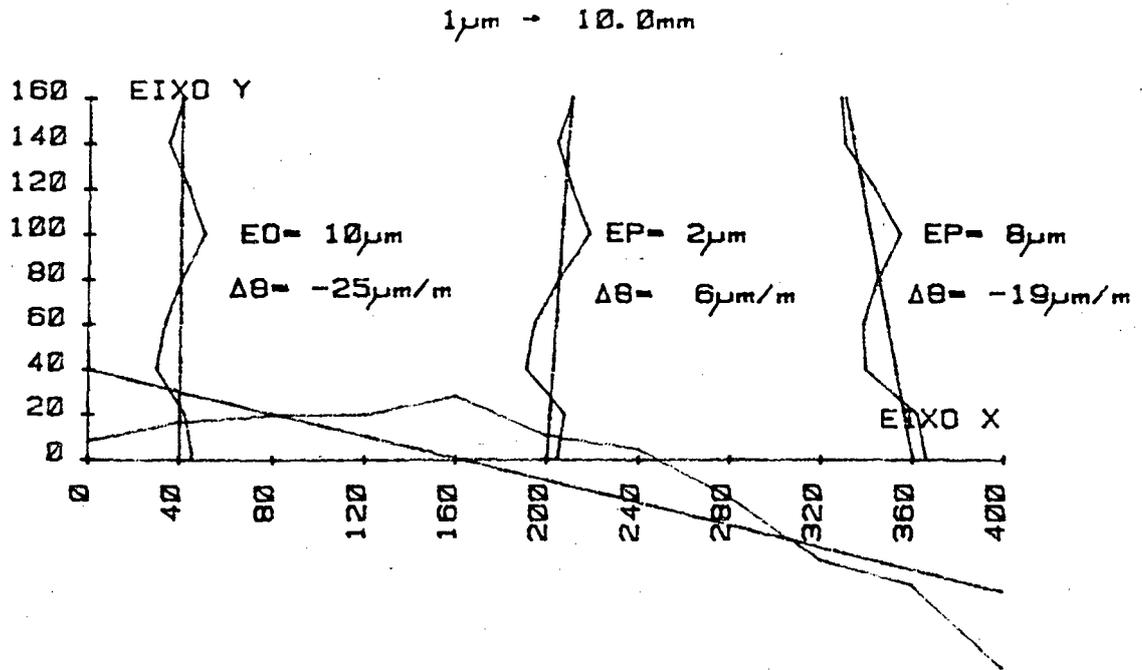


FIG. 4.9 - Paralelismo e ortogonalidade

4.2 - Ensaio de planicidade de um desempenho

A partir de oito medições do erro de retilinearidade realizadas independentemente e de forma distribuída sobre a superfície de um desempenho (fig.4.10), foram determinados os desvios de planicidade do mesmo [28]. Utilizou-se como sistema de medição um nível eletrônico, com aquisição automatizada das leituras, medindo

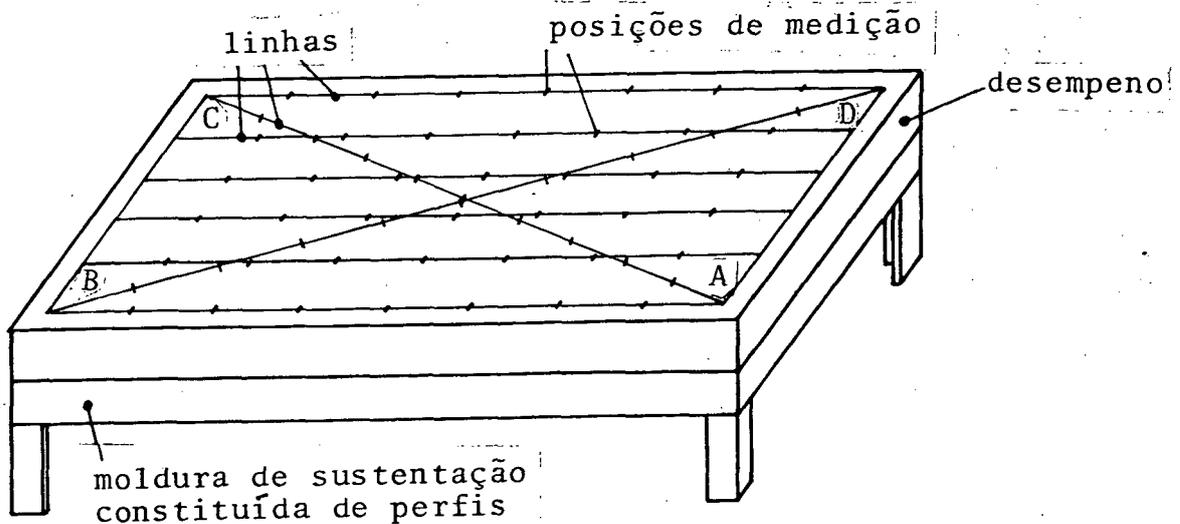


FIG. 4.10 - Ensaio de planicidade do desempenho

do-se o sinal de saída (tensão proporcional) com um voltímetro digital acoplado ao computador, via interface padronizada.

Os erros de retilineidade, neste caso, são calculados pelo método das inclinações e os ensaios das linhas AC e BC foram realizados para possibilitar, a conexão entre os ensaios, das linhas de forma a se chegar aos erros de planicidade.

Na figura 4.11 tem-se a apresentação dos resultados atra

0	3	65	89	115	141	148	178	180
-15	-18	31	52	73	89	97	122	125
-27	-33	8	23	37	53	62	80	83
-27	-29	-4	7	18	25	33	43	47
-15	-7	-9	-3	2	8	12	17	21
0	-6	-7	-6	-6	-5	1	0	0

FIG. 4.11 - Erros em posições específicas da superfície

x^n - x: Localização do ponto
n Cota do ponto em relação ao plano de referência, valores em μm

vês de cotas em posições específicas da superfície ensaiada que dão o erro de planicidade em relação ao plano de referência. Visto em perspectiva (fig. 4.12), pode-se observar que o plano de referência, estabelecido através de três pontos (A, B e C) de nível zero, encontra-se inclinado em relação à superfície, prejudicando a interpretação dos resultados. Com um giro em torno da reta AC, atribuindo erros iguais nos pontos B e D, corrige-se este problema, conforme mostra a figura 4.13. Outra forma de documentação para análise dos resultados é através de curvas de nível (fig. 4.14), que neste caso representa os erros em relação ao plano de referência corrigido, conforme figura 4.13.

A forma de apoio do desempenho, posicionada sobre um suporte construído de perfis, que sustenta o mesmo apenas na região

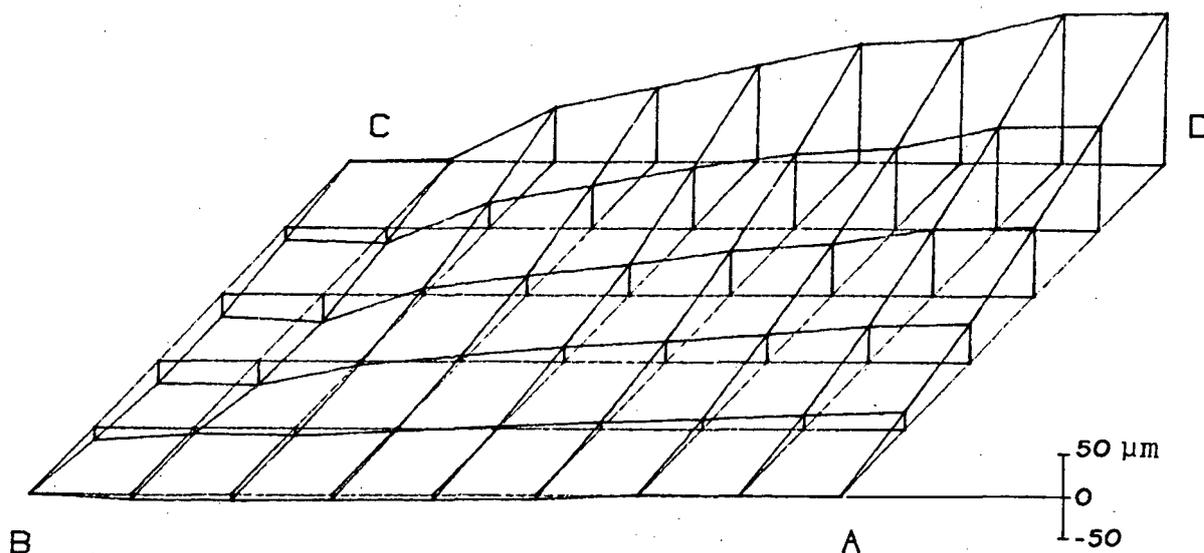


FIG. 4.12 - Apresentação dos erros em perspectiva

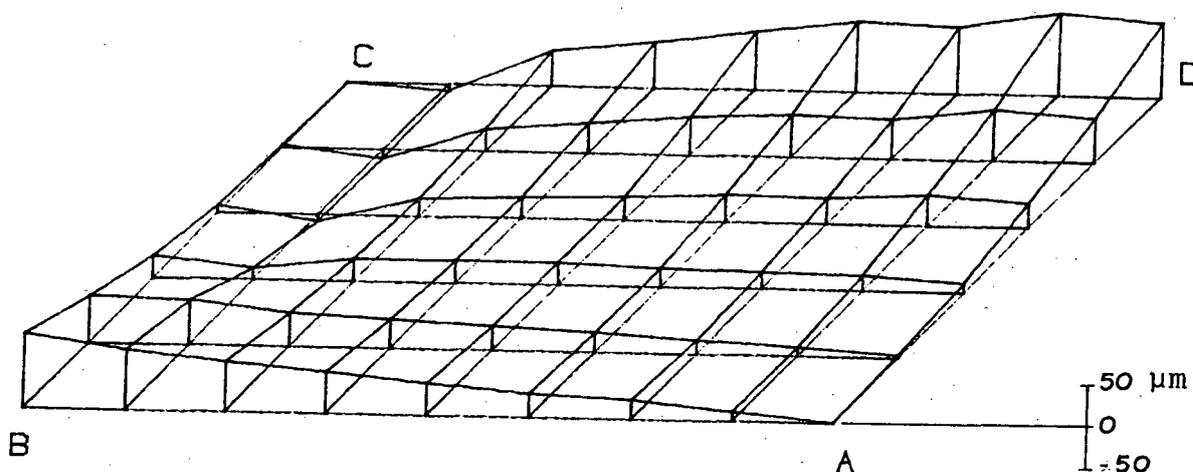


FIG. 4.13 - Perspectiva dos erros corrigidos
erro em B = erro em D

de contorno (fig. 4.10), mostrou não ser apropriada, pois como pode-se observar na figura 4.13, em posições próximas aos pontos B e C os erros são mais significativos, indicando um maior esforço de apoio, com conseqüente deformação excessiva do desempenho pelo peso próprio.

O mesmo desempenho apoiado nos pontos de mínima deformação apresentaria, certamente, melhores características.

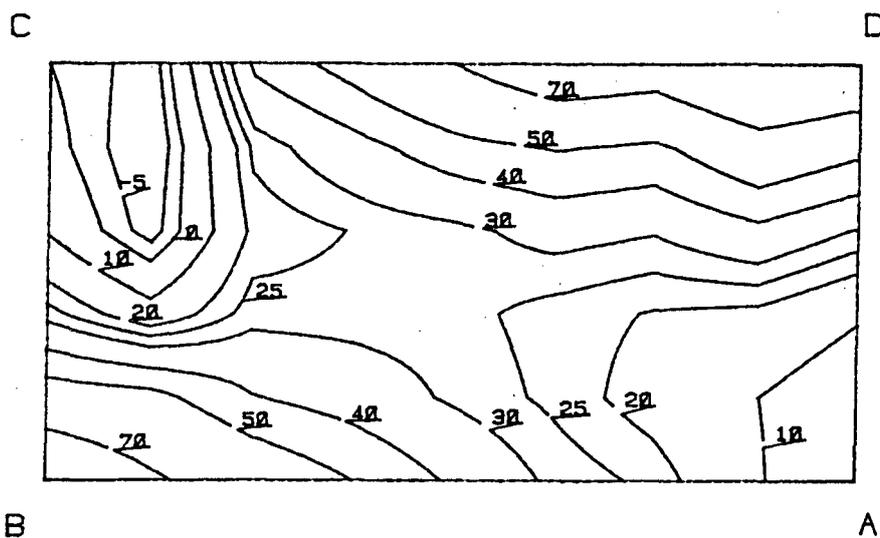
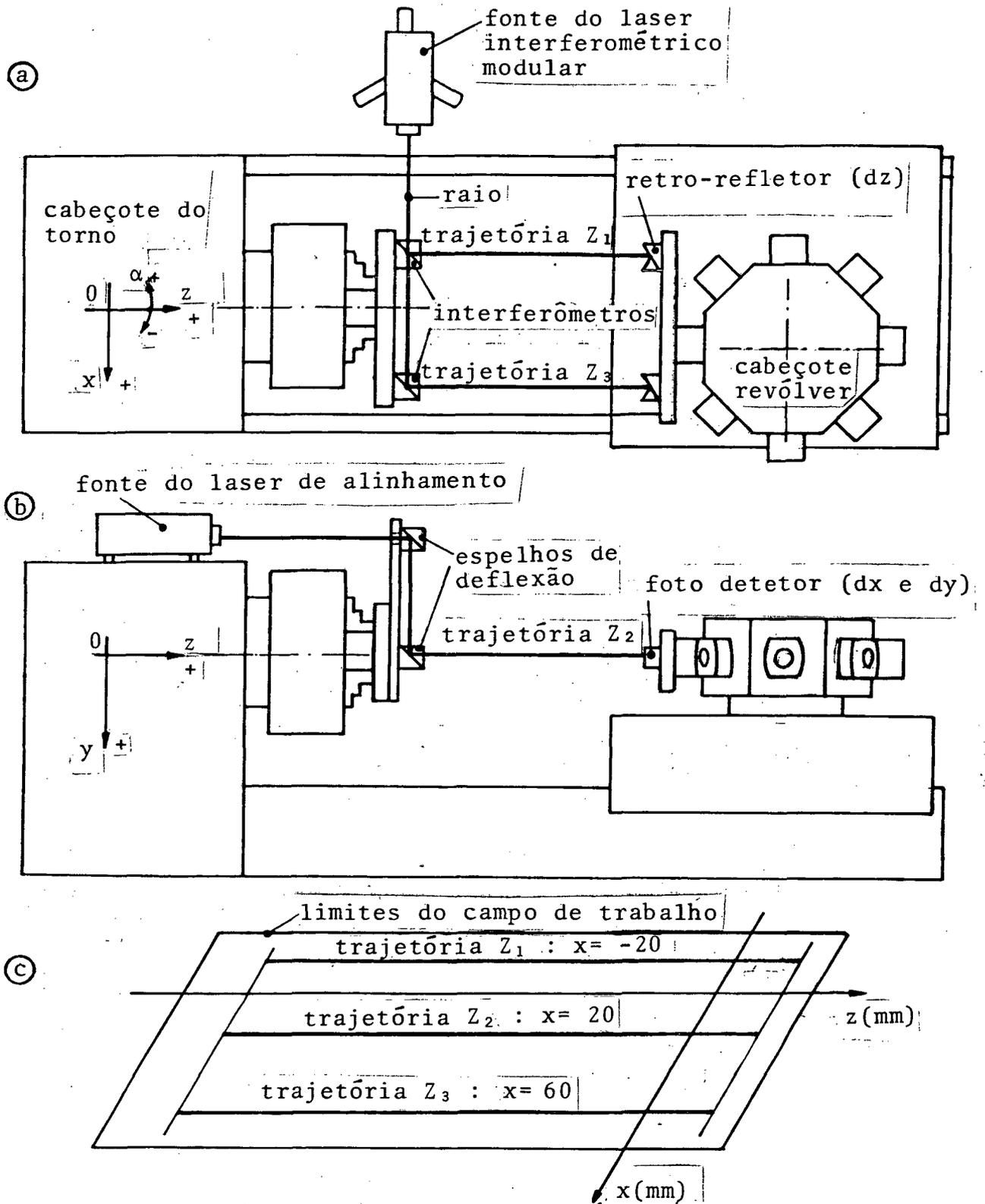


FIG. 4.14 - Curvas de nível diretamente gerada na plotadora, valores em μm

4.3 - Movimentos em um torno com CN

Neste exemplo são mostrados resultados de uma medição simultânea e automática de quatro parâmetros em um torno de cabeçote revólver, com comando numérico (fig. 4.15). O movimento que assumiria uma ferramenta colocada em um dos porta-ferramenta foi verificado quanto ao erro de retilineidade no plano horizontal (dx) e vertical (dy) quanto ao posicionamento na direção Z em duas trajetórias, dos quais derivou o ensaio de inclinações ($d\beta$) no plano X - Z. Foram utilizados para o ensaio de posicionamento e inclinação um laser interferométrico modular operando com dois medidores de deslocamento (fig. 4.15a) e um laser de alinhamento na trajetória Z_2 , medindo dx e dy (fig. 4.15b). Na figura 4.15c é mostrada em escala a localização das trajetórias ensaiadas em relação ao campo de trabalho do torno. Os parâmetros estabelecidos na etapa de definição do trabalho são apresentados na figura 4.16.

Na tabela da figura 4.17 referente aos dados processados do ensaio de posicionamento da trajetória Z_1 , observa-se uma variação elevada e pouco provável (coluna f), em função da qualidade da máquina e precisão do sistema de medição. Uma análise dos dados brutos (fig. 4.18), constatou que nos cinco ciclos de medição realizados no ensaio, existe uma mudança significativa dos erros do segundo para o terceiro ciclo, ocorrido em função de uma



a) Ensaio de posicionamento - trajetória Z_1 e Z_3

b) Ensaio da retilidade - trajetória Z_2

c) Localização das trajetórias no campo de trabalho

FIG. 4.15 - Ensaios simultâneos em um torno de CN.

Num. ensaios: 4	Número total de ensaios
Setor: 203	Setor de referência para os ensaios
Ensaio: 1	Número do ensaio
Pos. traj. Z1	Especificação do ensaio
Laser Interf.	Sistema de medição
Eixo X	Módulo do sistema de medição
Histerese	Medição em dois sentidos
Pos. de medição	Numeração e indicação das posições de medição
1 - 316	
2 - 314	
3 - 312	
4 - 310	
5 - 308	
6 - 306	
7 - 300	
8 - 240	
9 - 180	
0 - 120	
1 - 60	
2 - 0	
3 - 20	
Ensaio: 2	Definição do novo ensaio
Pos. traj. Z3	
Laser Interf.	
Eixo Y	
Sim. c/ anterior	Aquisição simultânea com o ensaio definido anteriormente
Histerese	
Mesmas posições	
Ensaio: 3	
Ret. plano vert.	
Laser de Alinh.	Sistema de medição
Plano Vertical	Orientação sobre a grandeza medida
Sim. c/ anterior	
Histerese	
Mesmas posições	
Ensaio: 4	
Ret. plano hor.	
Laser de Alinh.	
Plano Horizontal	
Sim. c/ anterior	
Histerese	
Mesmas posições	

FIG. 4.16 - Parâmetros estabelecidos na etapa de definição do trabalho

* DADOS PROCESSADOS *

a	b	c	d	e	f	g
i	P.ideal (mm)	P. real (mm)	Erro (um)	Inc. do res.	Var. total	Media Hist.
1	-316.0	-316.004	-4.2	12.1	27.1	7.6
2	-314.0	-314.004	-4.3	12.1	27.2	7.7
3	-312.0	-312.002	-1.7	12.2	27.2	8.8
4	-310.0	-309.999	0.9	12.2	27.2	9.2
5	-308.0	-308.001	-0.5	12.8	28.7	8.9
6	-306.0	-306.005	-4.6	12.1	27.0	7.9
7	-300.0	-300.002	-1.6	12.3	27.5	6.5
8	-240.0	-240.001	-0.7	12.2	27.2	6.1
9	-180.0	-180.003	-2.5	11.4	25.5	4.4
10	-120.0	-120.005	-5.5	11.6	25.9	1.3
11	-60.0	-60.011	-10.5	11.8	26.4	-3.4
12	0.0	-0.014	-14.3	12.0	26.9	-7.2
13	20.0	19.983	-17.4	11.9	26.7	-8.7
14	20.0	20.000	-0.0	11.8	26.5	17.4
15	0.0	-0.000	-0.0	11.9	26.7	14.3
16	-60.0	-59.996	3.6	12.5	27.9	14.1
17	-120.0	-119.992	8.0	11.7	26.2	13.5
18	-180.0	-179.989	11.3	12.2	27.4	13.8
19	-240.0	-239.987	12.9	12.5	28.0	13.6
20	-300.0	-299.985	14.7	12.3	27.6	16.3
21	-306.0	-305.980	20.4	12.3	27.5	24.9
22	-308.0	-307.982	18.4	12.4	27.8	19.0
23	-310.0	-309.982	17.5	11.9	26.6	16.6
24	-312.0	-311.981	19.3	12.2	27.3	21.0
25	-314.0	-313.980	19.6	12.4	27.8	23.9
26	-316.0	-315.981	19.4	12.2	27.3	23.6

FIG. 4.17 - Posicionamento trajetória Z_1 - 5 ciclos de medição

- a - número de posições de medição
- b - posições de medição - posicionamento ideal
- c - média dos posicionamentos reais
- d - erro de posicionamento
- e - incerteza do resultado
- f - variação, apresentada por se tratar de trajetória
- g - média global entre os sentidos (posição de 1 a 13) e histerese (posições de 14 a 26)

* DADOS BRUTOS *

a	b	c	d	e	f
i	Y(1)	Y(2)	Y(3)	Y(4)	Y(5)
1	7.2	5.3	-9.2	-12.2	-12.3
2	7.1	5.5	-11.1	-10.6	-12.3
3	9.0	8.8	-8.1	-9.1	-9.2
4	12.3	10.6	-4.5	-7.1	-6.8
5	11.6	9.6	-6.4	-8.4	-9.1
6	7.0	4.9	-10.6	-11.7	-12.4
7	9.6	8.5	-7.1	-9.0	-10.1
8	10.5	9.3	-7.7	-7.2	-8.5
9	7.9	7.0	-8.3	-9.1	-10.1
10	5.0	4.3	-11.8	-12.3	-12.6
11	-0.5	-0.0	-17.0	-16.4	-18.7
12	-3.2	-4.4	-21.7	-20.6	-21.7
13	-6.4	-7.6	-23.8	-23.9	-25.4
14	10.7	9.8	-5.1	-7.6	-8.0
15	11.5	9.2	-6.5	-7.1	-7.3
16	16.0	12.9	-3.7	-3.1	-4.0
17	18.5	18.0	1.8	1.2	0.5
18	22.8	21.1	4.8	4.0	3.6
19	24.9	22.8	6.4	6.0	4.5
20	26.4	24.5	7.7	8.1	6.8
21	32.1	30.1	14.1	12.8	12.7
22	29.8	28.7	11.5	11.4	10.7
23	29.0	26.8	10.9	10.4	10.6
24	30.4	29.6	12.4	12.3	12.0
25	31.6	29.4	12.5	12.3	12.4
26	30.7	29.3	13.2	12.1	11.5

FIG. 4.18 - Erros de posicionamento (valores em μm) - trajetória Z_1

inapropriada redefinição da origem do sistema de medição de deslocamentos. Eliminando do processamento os dois primeiros ciclos, pode-se então observar uma menor variação, com valor típico de $\pm 6 \mu\text{m}$ (fig. 4.19).

No mesmo ensaio, constatou-se ainda os erros de posicionamento que ocorrem no intervalo correspondente a uma rotação do fuso, com o objetivo de identificar erros periódicos que neste caso não são bem caracterizados (fig. 4.20), por se tratar de um fuso de esferas recirculantes de qualidade apropriada. Este exemplo demonstra a capacidade do sistema de analisar e documentar partes de um ensaio.

As inclinações no plano horizontal (X - Z) foram determinadas a partir das medições simultâneas de posicionamento ao longo das trajetórias Z_1 e Z_3 . O gráfico da figura 4.21 mostra comportamento ligeiramente diferente nas duas direções de movimento, principalmente na região de maior utilização da máquina, consequência certamente da existência de folgas variáveis entre carro e faces das guias que produzem o movimento X.

Para efeito de comparação entre o tempo gasto para realização deste ensaio em todas as suas etapas e o tempo estimado pa-

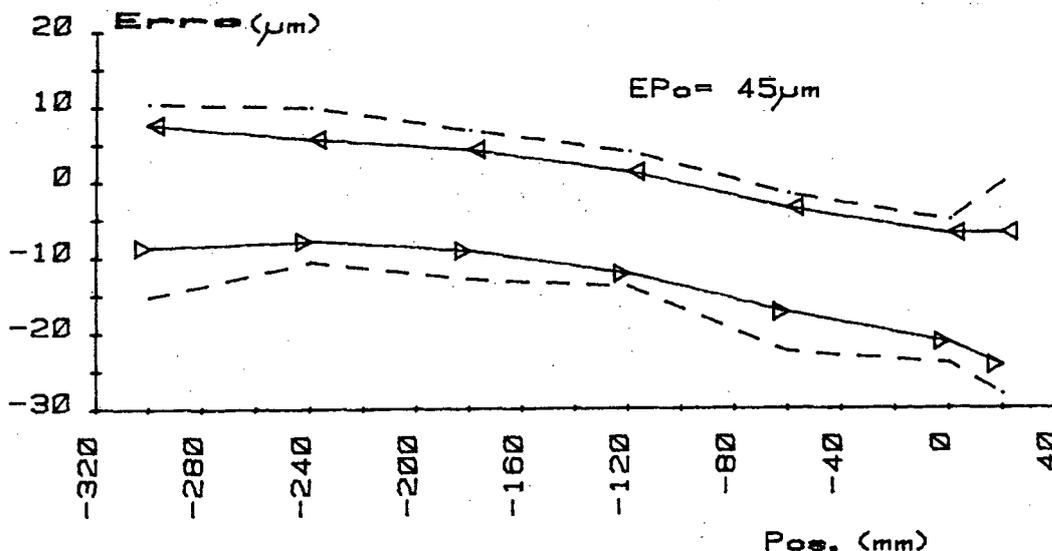


FIG. 4.19 - Erros de posicionamento - trajetória Z_1

E_{Po} - Erro global de posicionamento considerando os erros aleatórios

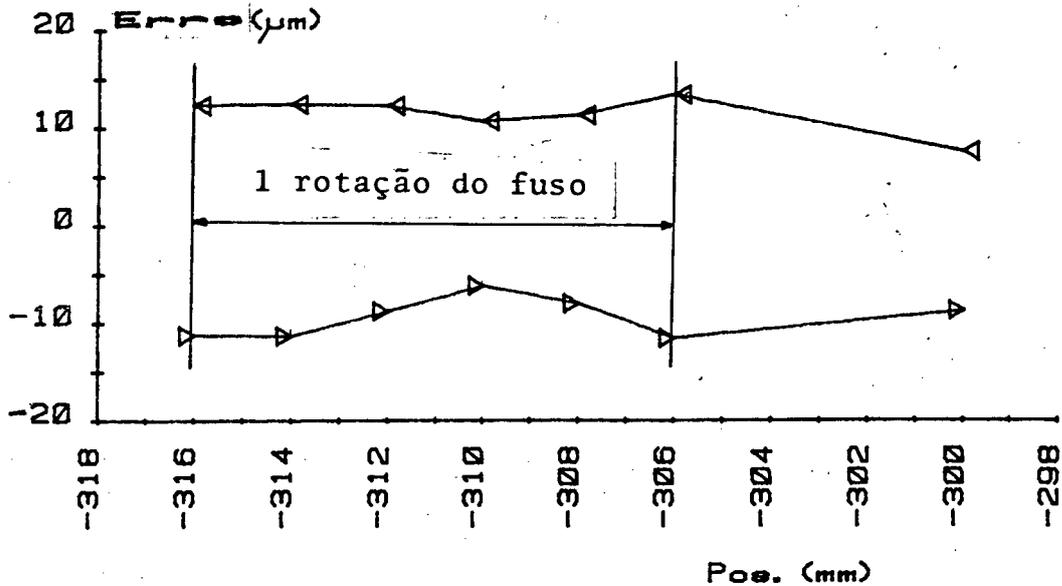


FIG. 4.20 - Erros de posicionamento com uma rotação do fuso

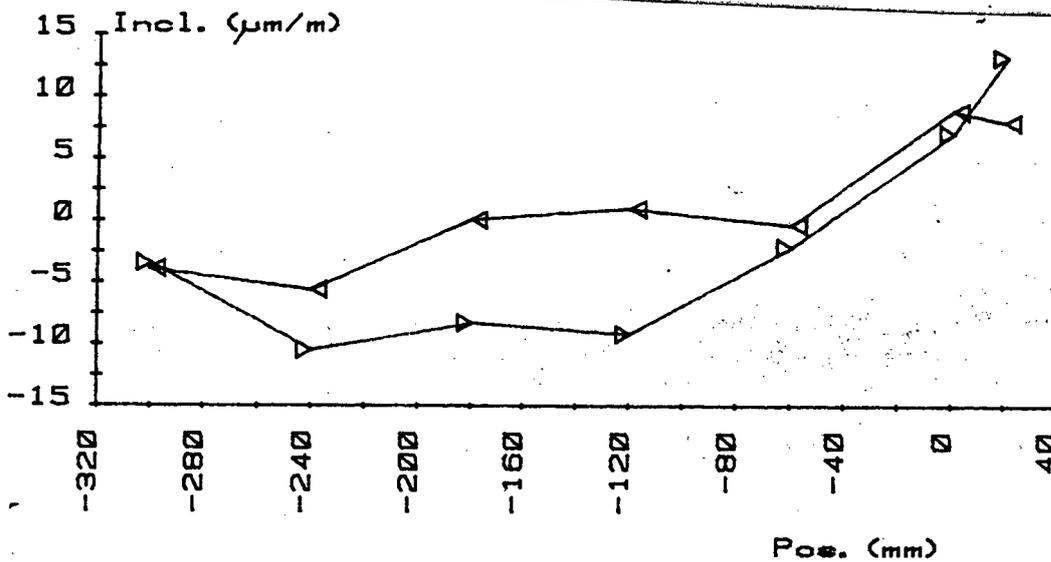


FIG. 4.21 - Inclinações no plano horizontal (guinamento)

ra realização do mesmo de forma convencional, considerando-se operadores com grande prática na realização de ensaios sem e com automatização, disponibilidade de dispositivos para ajuste dos instrumentos, etc., é apresentado o quadro 4.1, onde observa-se que:

- Por não haver necessidade de preparação de material para registrar as leituras do ensaio, como confecção de planilhas para dados brutos contendo posições de medição e ciclos, o tempo

na definição do trabalho é menor.

- A aquisição automatizada, além de evitar erros de leitura ou registro dos dados pelo operador, reduz consideravelmente o tempo desta etapa.

- O tempo de processamento e documentação é significante mente reduzido, em função da eliminação dos intensos trabalhos de cálculo e representação gráfica dos resultados.

Etapa	Tempo de realização	
	Automatizado com computador	Não automatizado
Definição do trabalho	5 min	20 min
Montagem dos dispositivos e instrumentos	60 min	60 min
Ajuste do sistema de medição	20 min	20 min
Aquisição	15 min	1 h
Processamento	10 min	2 h
Documentação	10 min	4 h

Quadro 4.1 - Tempo para realização do ensaio

4.4 - Ensaio de retilineidade com superposição

Utilizando um mandril de verificação como padrão de retilineidade e um medidor de deslocamento para medição dos afastamentos o qual foi fixado ao porta ferramenta, realizou-se o ensaio da retilineidade, no plano horizontal, da trajetória da ferramenta de corte de um torno, ao movimentar-se longitudinalmente | 30 |.

Como o comprimento do mandril é inferior ao campo de operação da máquina, foram realizados dois ensaios de retilineidade com superposição (fig. 4.22).

Os resultados do ensaio, compensando-se o desalinhamento do mandril entre as duas posições de verificação, são mostrados na figura 4.23, onde observa-se que os erros de retilineidade são elevados somente na faixa 0 - 600 mm, causados por desgaste, por ser esta região a de maior frequência de utilização desta máquina em particular.

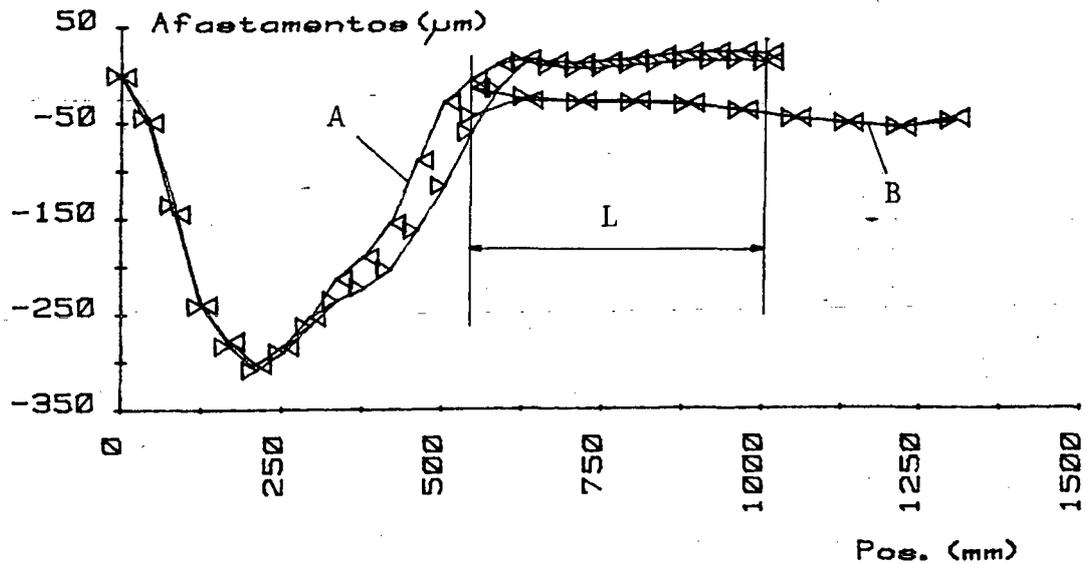


FIG. 4.22 - Ensaio de retilidade com superposição

A - ensaio com padrão na primeira posição
 B - ensaio com padrão na segunda posição
 L - trecho com superposição

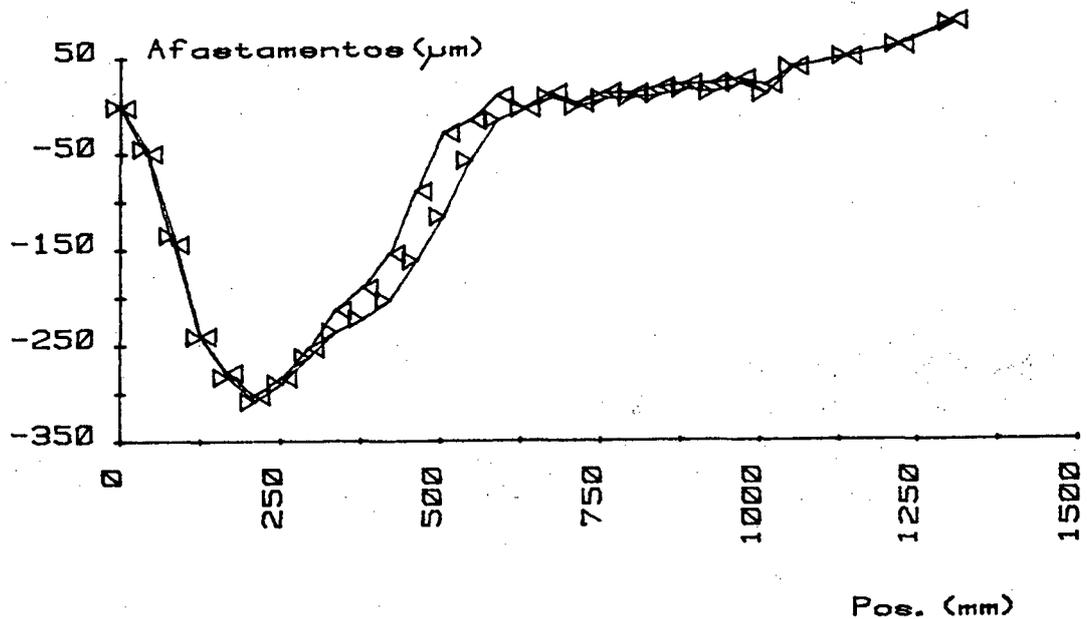


FIG. 4.23 - Valores corrigidos

4.5 - Alinhamento de barras

Usando o laser de alinhamento como sistema de medição e realizando a aquisição automática dos valores indicados pelo instrumento através de um sistema de aquisição de sinais foi realizado um ensaio de alinhamento. [31], de três barras retificadas a

linhadas com recursos convencionais. A figura 4.24 mostra a montagem do experimento. As barras foram apoiadas sobre mesas ajustáveis colocadas em posições correspondentes aos pontos de Bessel.

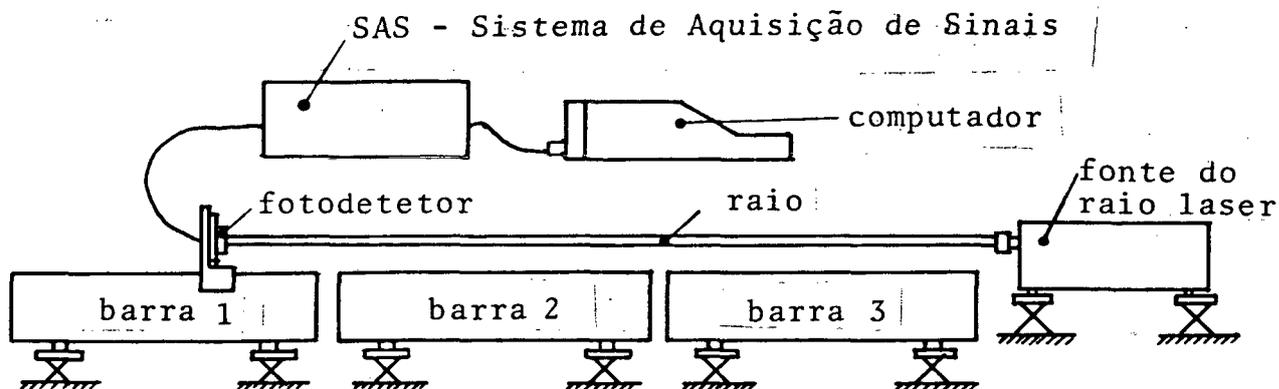


FIG. 4.24 - Determinação do alinhamento entre três barras

Na fase de aquisição, os ciclos de medição foram realizados seqüencialmente em relação as três barras, ou seja, dava-se início a um novo ciclo após completar a aquisição nas posições de medição de todas as barras. Realizando-se o ensaio completo em uma barra, para posteriormente passar à próxima, ter-se-ia eventualmente mudanças nas condições de ensaio (temperatura, vibrações, etc), que prejudicariam os resultados em vista de instabilidades no instrumento e na própria montagem das barras. Assim, se alterações ocorrerem, a influência nos resultados será minimizada.

Com o objetivo de determinar o alinhamento simultaneamente no plano vertical (direção x) e horizontal (direção y), o fotodetector do raio foi fixado em um suporte, como mostra a figura 4.25. As mesas micrométricas servem para auxiliar o ajuste da reta padrão.

A figura 4.26 mostra que, além de apresentarem erro de alinhamento, as barras possuem erros significativos de retilidade, principalmente no plano vertical (escala de erros mais ampla na figura 4.26a); em função de deformação devido ao peso próprio e de usinagem. A forma invertida do erro da retilidade no plano vertical da última barra, indica a existência de um erro de forma, provavelmente resultante de uma deformação permanente devido a um esforço sofrido pela barra ou consequência de usinagem sem o devido apoio.

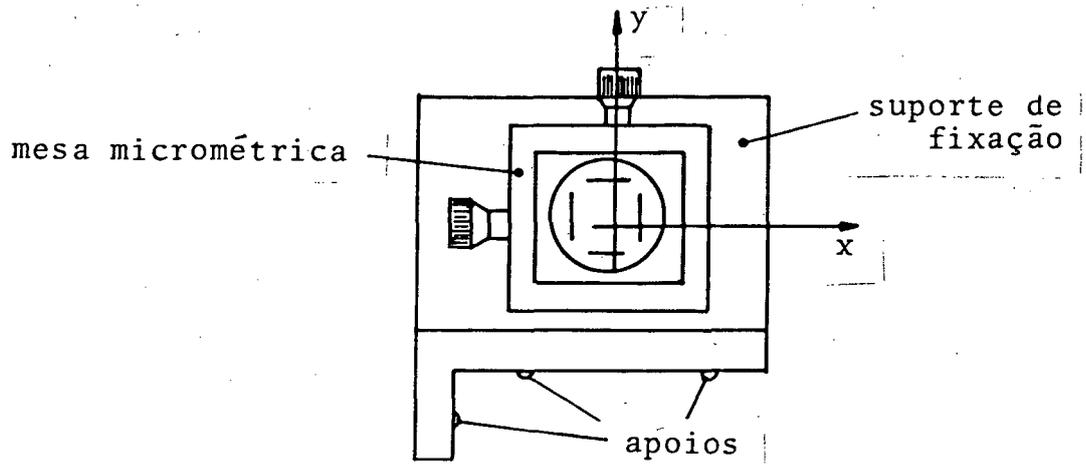
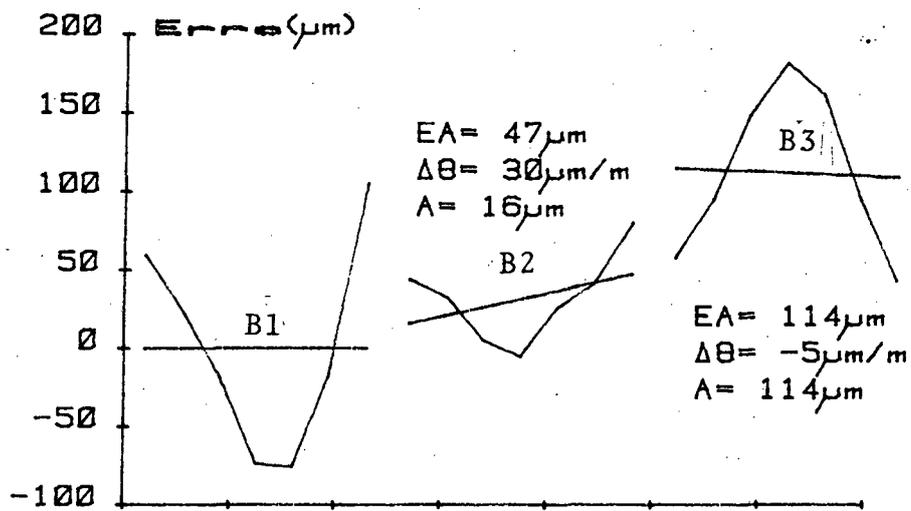
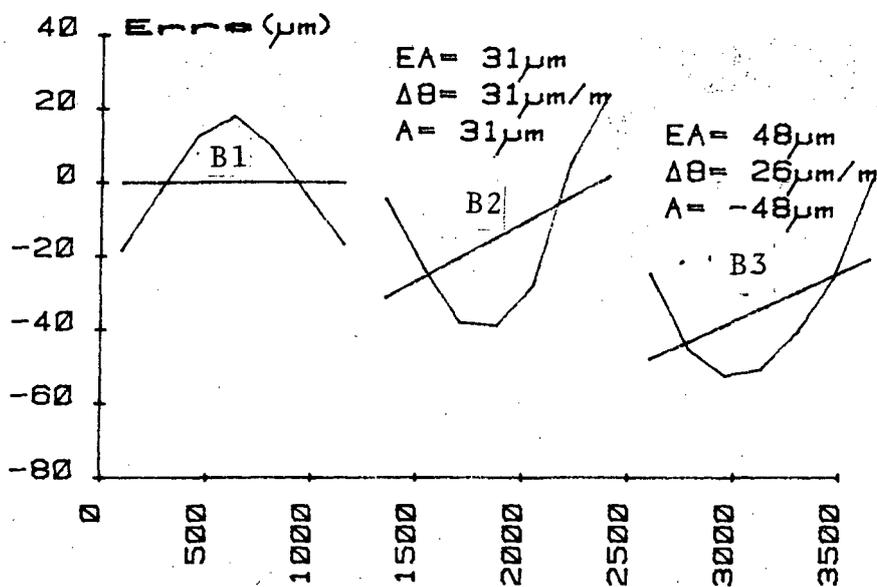


FIG. 4.25 - Dispositivo de fixação do fotodetector



a) plano vertical



b) plano horizontal

FIG. 4.26 - Erro de alinhamento entre as barras
B1 - elemento de referência

4.6 - Retilidade de uma régua padrão

Com o objetivo de analisar a característica geométrica de retilidade de uma régua padrão, realizou-se este ensaio pelo método dos três cantos, para análise de ambas as superfícies de referência da mesma [32]. Para tanto, a régua foi apoiada sobre blocos padrão de mesma dimensão em posições correspondentes aos pontos de Bessel, colocados sobre a superfície de um desempenho e as leituras dos erros feitas através de um medidor indutivo de deslocamento.

O processamento que inclusive prevê a existência de diferentes espessuras da régua nos pontos de apoio, foi aplicado neste ensaio. A figura 4.27 apresenta os resultados obtidos para as linhas centrais nas duas superfícies da régua, onde, pode-se ob-

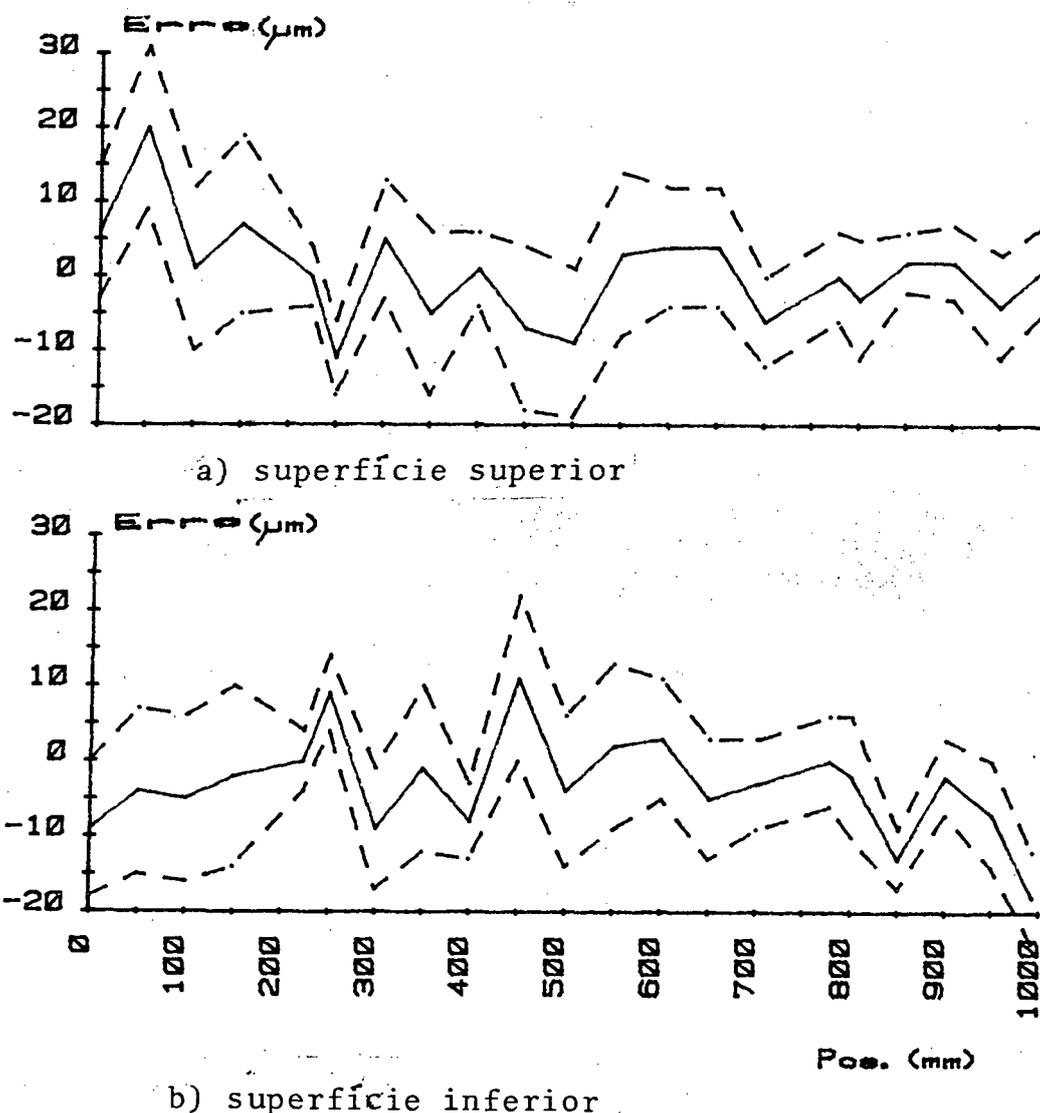


FIG. 4.27 - Retilidade pelo método dos três cantos

— valores médios
 - - - - - incerteza do desvio

servar a forma irregular das mesmas. O mesmo gráfico mostra que a incerteza do resultado é da ordem dos próprios erros da régua, em função da não repetibilidade das leituras, provocadas pela rugosidade superficial da régua que é de ferro fundido rasqueteado.

5 - CONCLUSÕES

Os ensaios geométricos têm validade reconhecida como ferramenta de controle de qualidade, principalmente na verificação de máquinas-ferramenta, mas sua aplicação era restrita devido ao elevado custo resultante da morosidade de execução dos mesmos. Propos-se com este trabalho eliminar este impecilho e elevar ainda mais as potencialidades dos ensaios, através da automatização com computador. Segue uma análise conclusiva do trabalho com enfoque no cumprimento dos dois objetivos.

a) Redução do tempo de execução dos ensaios.

Com a finalidade de minimizar os tempos de realização de cada uma das etapas do trabalho de execução dos ensaios geométricos, foram decisivos os seguintes procedimentos e mecanismos:

- Amplo estudo e sistematização dos ensaios, que identificam as correlações entre os diversos ensaios foram básicos para a elaboração de um programa universal no que concerne aos objetos sob teste (linha, trajetória, eixos), aos tipos de ensaios (retilinearidade, posicionamento, inclinação e seus derivados) e tipos de instrumentos (dos mais simples aos mais sofisticados, com ou sem interfaceamento direto com o computador).

- Subdivisão da estrutura global do programa em etapas independentes, o que beneficiou a redução do tempo de bloqueio do objeto em teste, e em consequência minimizar o custo de paralização de máquinas, característica esta alcançada pela possibilidade de programação prévia do ensaio (definição do trabalho), bem como, de poder realizar o processamento e a documentação de forma independente da aquisição, visto que os dados brutos são armazenados em memória permanente.

- Automatização das leituras dos instrumentos, através de interfaces padronizadas, o que proporciona maior rapidez na aquisição, conforme exemplificado para uma das aplicações do capítulo 4, onde tem-se uma comparação entre o tempo de execução do ensaio pela metodologia proposta e a forma convencional, isto é, sem apoio computacional.

- Processamento automatizado dos dados, dispensando o co

nhecimento detalhado por parte do usuário, de técnicas e métodos empregados na manipulação de dados referentes a ensaios geométricos.

- Documentação automatizada, através da qual o tempo total de execução diminui enormemente. A geração de gráficos é essencial para a interpretação dos resultados e estes são realizados integralmente, com apoio computacional, garantindo confiabilidade e precisão, em ações que duram poucos minutos, tornando viável a obtenção de informações sobre o elemento em teste logo após o levantamento de dados, o que é um passo significativo na viabilização dos ensaios geométricos.

É difícil quantificar o fator de redução do tempo de realização de um ensaio tendo em vista que inexitem em geral, informações quanto ao tempo de execução através da metodologia manual. Porém, cabe ressaltar que durante a etapa mais crítica, ou seja, a aquisição de dados, a velocidade de medição praticamente só é ainda limitada pela operação dos instrumentos e pelo próprio objeto em teste. Quanto ao processamento e documentação, pode-se garantir que o que antes eram horas, passaram a ser poucos minutos.

b) Elevação das potencialidades dos Ensaio Geométricos.

O aumento da capacidade de identificação de erros e a maior confiabilidade dos resultados alcançado na metodologia apresentada são consequência em primeiro plano dos seguintes fatores:

- Checagem imediata das leituras através do alerta para erros grosseiros.

- Redução de erros aleatórios pelo tratamento estatísticos dos dados.

- Identificação e supressão de erros aleatórios elevados, com base em critérios probabilísticos.

- Compensação de erros sistemáticos dos instrumentos através da função transferência corrigida e de fatores de compensação determinados a partir de condições específicas.

- Medição de parâmetros físicos e de controle, como observações de temperatura ou deformação, com a finalidade de complementar os resultados sobre o comportamento da máquina-ferramenta.

- Realização simultânea de diversos ensaios.

- Documentação gráfica específica para melhor interpretação de resultados.

- Resposta rápida sobre as condições do objeto sob ensaio através da geração de gráficos e tabelas bastante informativas, dando condições de decisão sobre continuação ou interrupção dos ensaios.

Estes implementos elevaram significativamente a potencialidade dos ensaios geométricos, como demonstram claramente os exemplos do capítulo quatro, os quais, no entanto, por limitações do contexto do trabalho não mostram todos os recursos oferecidos pelo programa.

Durante o desenvolvimento do trabalho foram surgindo, regularmente, novas possibilidades de sofisticação, as quais, por questão de tempo, foram limitadas ao exposto, ficando algumas como sugestões para continuidade do desenvolvimento deste programa, o que poderá ser feito gradativamente já que está estruturado para tal, em função de sua modularidade:

- Implementação de novos sub programas, com destaque ao processamento, onde certos ensaios não foram automatizados mas possuem tratamento semelhante aos abordados, como ocorre entre cilindricidade ou esfericidade e planicidade, que por sua vez derivam de cilindricidade e retilinearidade, respectivamente.

- Introdução de sub programas para operacionalizar a medição com instrumentos não descritos no capítulo três, que também pode ser realizada com facilidade.

- Verificação do desempenho dinâmico, de interesse especial no estudo de máquinas-ferramenta com comando numérico, possibilitando efetuar medições para avaliação das fontes de erros inerciais e do sistema de interpolação.

- Utilizar como meio de comunicação com o operador um vídeo, o que permitirá repassar inclusive instruções de uso, tornando o sistema operável por pessoa sem conhecimentos aprofundados sobre a metodologia de operação do mesmo.

6 - REFERÊNCIAS

- |01| Schneider, C.A. Entwicklung eines Laser-Geradheits-Messsystems zur Durchführung geometrischer Prüfungen im Maschinenbau; Tese de Doutorado; RWTH - Aachen; 1978.
- |02| Hewlett - Packard Calibration of a Machine Tool ; Application note 156 - 4.
- |03| Vergara, E.G. Möglichkeiten zur Beurteilung der Arbeitsstreuung von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen durch bearbeiten und vermessen spezieller Werkstücke; Tese de Doutorado; RWTH - Aachen; 1978.
- |04| ISO - 1101 Geometrical tolerances: form - orientation - location - run out ; norma técnica ISO; 1974.
- |05| P-NB-273 Tolerâncias de Forma e Tolerâncias de Posição; norma técnica ABNT ; 1976.
- |06| Agostinho, O.L.
Rodrigues, A.C.S.
Lirani, J. Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões; Ed. Edgard Blücker Ltda.; São Paulo; 1977.
- |07| MIC - 01
STI/IPT Máquinas-Ferramenta - Métodos de Ensaio de Precisão Geométrica ; Recomendação Técnica do MIC; Brasília; 1974.
- |08| Rahn Co. Tolerances on Repeat Reading Measurements; Informação técnica. GGG-P 463c.

- |09| Schneider, C.A.
Lücke, H.A.H.
Schoeler, N. Calibração de Sistemas de Medição; Encontro Nacional de Atualização Tecnológica em Engenharia Mecânica (ENATEM); Apostila do Minicurso ; Florianópolis; 1982.
- |10| Farago, F.T. Handbook of Dimensional Measure-
ment; Industrial Press; New York; 1968.
- |11| VDI 3427 Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschi-
nen. Dynamisches Verhalten von nu-
merischen Bahnsteuerungen an Wer-
kzeugmaschinen; Recomendação téc-
nica VDI; 1977
- |12| Bambach, M.
Fürst, A.
Schneider, C.A. Betrachtungen zur Ermittlung der
Positionunsicherheit von Werkzeug-
maschinen mittels Laser-Interfero-
meter; VDI-Zeitschrift; vol. 120 ;
nº 1 e 2; Janeiro/78.
- |13| Schneider, C.A.
Lücke, H.A.H.
Wondracek, U. Ensaio Geométricos em Máquinas -
Ferramentas; Encontro Nacional de
Atualização Tecnológica em Engenha-
ria Mecânica (ENATEM); Apostila de
Minicurso; Florianópolis; 1982.
- |14| DIN - 875 Steel squares 90º; norma técnica
DIN; 1981.
- |15| Dias da Silva, A. Automatização de Ensaio Geométricos;
manual de operação do programa;
Labmetro-UFSC; Florianópolis ;
1984.
- |16| Hewlett - Packard HP9825A Calculator Operating and
Programming Manual; Hewlett Pa-
ckard Co.; 1976.

- |17| Barsotti, L. Geometria Analítica e Vetores; A. M. Cavalcanti & Cia. Ltda; Curitiba; 1974.
- |18| Hewlett - Packard Laser Transducer System 5501A/System Operating and Service Manual ; Hewlett Packard Co; 1976.
- |19| Schneider, C.A. Einsatz neuer Laser-Technologien
Pfeifer, T. zur Messung der Abweichung von der Geradlinigkeit; Westdeuscher Verlag; Opladen; 1978.
- |20| Hewlett - Packard 3054A Automatic Data Acquisition / Control System; 1981.
- |21| Hewlett - Packard HP 98033A Interface/Installation and Service Manual; 1981
- |22| Hewlett - Packard HP 98034A HP-IB Interface/Installation and Service Manual; 1981.
- |23| Hewlett - Packard HP 98032A 16 - bit Interface/Installation and Service Manual; 1981.
- |24| Hewlett - Packard HP 98036A Serial I/O Interface / Installation and Service Manual ; 1977.
- |25| Neville, A.M. Basic Statistical Methods for Engi
Kennedy, J.B. neers and Scientists; International Textbook Company; Scranton - Pennsylvania; 1970.
- |26| Schneider, C.A. Metrologia Dimensional, Apostila
Lücke, H.A.H. do curso, CPGEM - UFSC; Florianópolis; 1982.

- |27| LABMETRO Ensaio dos movimentos da Furadeira de Coordenadas VEB; relatório nº 126/82; 1982.
- |28| LABMETRO Ensaio de planicidade de um desempenho Mitutoyo; relatório nº 157/83; 1983.
- |29| LABMETRO Ensaio dos movimentos do Torno CN CSEPEL; relatório nº 40/83; 1983.
- |30| LABMETRO Ensaio dos movimentos do Torno Nardini; relatório nº 39/82; 1982.