

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

MEDIÇÃO POR COORDENADAS  
EM MÁQUINAS FERRAMENTAS COM COMANDO NUMÉRICO -  
MÉTODO DIFERENCIAL

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

CELSO LUIZ NICKEL VEIGA

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1986.

MEDIÇÃO POR COORDENADAS  
EM MÁQUINAS FERRAMENTAS COM COMANDO NUMÉRICO -  
MÉTODO DIFERENCIAL

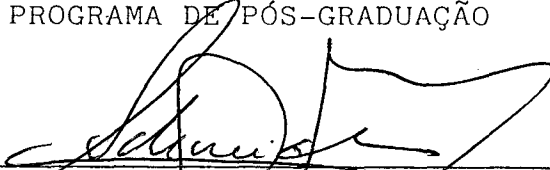
CELSO LUIZ NICKEL VEIGA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA  
DE CONCENTRAÇÃO FABRICAÇÃO, E APROVADA  
EM SUA FORMA FINAL

PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


  
\_\_\_\_\_  
PROF. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, DR. ING.-ORIENTADOR

  
\_\_\_\_\_  
PROF. CLOVIS RAIMUNDO MALISKA, PH. D.- COORDENADOR

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
PROF. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, DR. ING.-PRESIDENTE

  
\_\_\_\_\_  
PROF. ABELARDO ALVES DE QUEIROZ, PH. D.

  
\_\_\_\_\_  
PROF. HERMANN ADOLF HARRY LUCKE, DR. ING.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Alberto Schneider, pela orientação deste trabalho.

À equipe do LABMETRO que marcou sua participação neste trabalho, direta ou indiretamente.

Ao Laboratório de Máquinas Operatrizes da UFSC, pela cessão de equipamentos para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa auxílio.

Ao Fundo de Incentivo à Pesquisa Técnico-Científica - FIPEC, ao financiar um projeto de pesquisa na linha deste trabalho.

A meus pais, esposa e filha, pelo constante apoio e compreensão.

## SUMÁRIO

RESUMO . . . . .	i
ABSTRACT . . . . .	ii
NOMENCLATURA E SIGLAS . . . . .	iii
1. INTRODUÇÃO . . . . .	1
1.1 MEDIÇÃO POR COORDENADAS NO PROCESSO . . . . .	1
1.2 ESTADO DA ARTE . . . . .	3
1.3 PROPOSTA DE TRABALHO . . . . .	11
2. O SISTEMA E SUAS FUNÇÕES . . . . .	13
2.1 MODOS DE OPERAÇÃO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO . . . . .	13
2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO . . . . .	14
2.2.1 Método Diferencial . . . . .	15
2.2.2 Método Absoluto . . . . .	17
2.3 APLICAÇÕES DO SMCP . . . . .	18
2.3.1 Medição de Ferramentas . . . . .	18
2.3.2 Verificação dos Erros da Máquina Ferramenta . . . . .	22
2.3.3 Controle Dimensional de Peças . . . . .	25
2.3.4 Localização e Ajuste da Peça para Usinagem . . . . .	28
2.3.5 Determinação de Sobremedidas para Programação da Usinagem . . . . .	30
2.3.6 Outras Aplicações . . . . .	32
2.4 CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS . . . . .	33
3. CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS . . . . .	35
3.1 MÁQUINA FERRAMENTA . . . . .	35
3.2 COMANDO NUMÉRICO . . . . .	37
3.3 APALPADOR . . . . .	38
3.4 CONTROLADOR . . . . .	43
3.4.1 Características Gerais . . . . .	43
3.4.2 Modos de Execução dos Programas de Fabricação . . . . .	45
3.5 INTEGRAÇÃO DOS MÓDULOS DO SMCP . . . . .	48
3.5.1 Características Adicionais . . . . .	48
3.5.2 Configurações Propostas . . . . .	50
4. ESTRATÉGIAS DE MEDIÇÃO . . . . .	53
4.1 DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS . . . . .	53
4.1.1 Conceitos . . . . .	53
4.1.2 Condições Operacionais e Geométricas na Medição com um Apalpador Medidor . . . . .	57
4.2 DETERMINAÇÃO DE ELEMENTOS GEOMÉTRICOS . . . . .	62
4.3 COMPENSAÇÃO DE ERROS DO SMCP . . . . .	65
5. IMPLANTAÇÃO DE UM SMCP . . . . .	70
5.1 DESCRIÇÃO GERAL . . . . .	70
5.2 MÁQUINA FERRAMENTA COM COMANDO NUMÉRICO . . . . .	72

5.3	APALPADORES	75
5.4	CONTROLADOR	78
5.5	PROGRAMAÇÃO	80
5.5.1	Programa para Medição por Comando Automático	80
5.5.2	Programa para Medição por Comando Manual	83
6.	DESEMPENHO DO SMCP IMPLEMENTADO	84
6.1	COMPORTAMENTO METROLÓGICO E OPERACIONAL	84
6.1.1	Qualificação do Apalpador 2D e do Dispositivo para Medição de Ferramentas	84
6.1.2	Determinação da Máxima Velocidade de Aproximação	86
6.1.3	Comportamento da Árvore Principal do Centro de Usinagem	89
6.1.4	Tempo de Medição	90
6.1.5	Procedimentos Preparatórios	90
6.2	MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DE FERRAMENTAS	92
6.3	COMPENSAÇÃO DE ERROS NA MONTAGEM DA PEÇA PARA USINAGEM	95
6.4	VERIFICAÇÃO DA PRECISÃO DA MÁQUINA FERRAMENTA	97
6.5	MEDIÇÃO DE PEÇAS	99
7.	CONCLUSÕES	102
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

## RESUMO

Entre os recursos viabilizados pela tecnologia do comando numérico passou-se a contar mais recentemente com a medição automática no processo de fabricação mecânica. Aproveitando-se o sistema coordenado de referência das máquinas ferramentas, é possível, com o uso de um dispositivo localizador, conhecer posições de pontos das peças e ferramentas montadas nestas máquinas. Com base nas coordenadas destes pontos, um processador lógico determina os parâmetros geométricos reais e seus erros, que podem então ser realimentados diretamente ao comando numérico. Habilita-se assim o controle geométrico na própria máquina ferramenta, trazendo de encontro a um aumento da produtividade, resultados como a diminuição do tempo gasto no controle geométrico, na preparação da produção e o aumento da qualidade do processo por usinagem. Como objetivos que nortearam este trabalho teve-se a busca do domínio da tecnologia de medição por coordenadas no processo e a implantação de um sistema experimental em um centro de usinagem. Foi realizado um pequeno levantamento de aplicações do SMCP com vistas a definir seus recursos desejáveis. Os módulos de um sistema são então focalizados, descrevendo-se suas atribuições, requisitos metrológicos e operacionais. Foram analisadas as condições geométricas para a medição com apalpadores, abordando-se ainda alguns fundamentos da tecnologia de medição por coordenadas. Descreve-se por fim o sistema efetivamente implantado, alguns ensaios e exemplos de aplicação. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foi sistematizado um grande volume de informações e, ao final, dispôs-se de um sistema caracterizado por elevados potencial e flexibilidade.

## ABSTRACT

Among the capabilities offered by the numerical control technology, the automatic measurement in manufacturing process became, recently, available. Using a probe head and the machine tool reference coordinate system, it's possible to determine points positions at the workpieces and tools, wich are fixed on the machine. Based on the coordinates of these points, a logic processor determines real geometrics parameters and their errors, wich can be used to feedback directly the numerical control unit. Thus, the geometrical control can be done directly on the machine, increasing the productivity by minimizing the time spent in quality control and in set up. The objectives that guided this work were to get know how on in-process coordinate measurement technology and to implement an experimental system in a machining center. An applications sourvey of the system was done to define its desired characteristics. The modules of a system are then analysed to describe its atributes, as well as its metrological and operational requirements. The geometrical conditions for measurements with a probe were analysed, involving even some aspects of coordinate measurement technology. At last, the system in fact implemented is described, with some tests and examples of applications. During the development of this work, a great amount of information was gathered, resulting in a system wich presents high potential and flexibility.

## NOMENCLATURA E SIGLAS

- A- Ponto de referência para a deflexão do apalpador
  - Ax, Az - Pontos de referência para a deflexão do dispositivo para medição de ferramentas
  - F- Ponto coordenado (posição atual) da máquina ferramenta
  - I- Ponto ideal da peça ou da ferramenta
  - M- Origem do sistema coordenado da máquina ferramenta
  - N- Ponto nominal programado para posicionamento
  - P- Origem do sistema coordenado da peça
  - Q- Ponto qualquer do objeto
  - R- Ponto real de contato do sensor com o objeto
  - S- Centro do sensor, ponto teórico do sensor
  - T- Ponto de definição do parâmetro de uma ferramenta
  - U- Ponto programado para usinagem
  - X- Coordenada x do sistema ortogonal
  - Y- Coordenada y do sistema ortogonal
  - Z- Coordenada z do sistema ortogonal
  - W- Ponto remoto ao objeto
- 
- a, b, c - Eixos de rotação do sistema coordenado
  - d- Diâmetro
  - e- Erro
  - en- Erro de planicidade
  - er- Erro de retilineidade
  - ep- Erro de posicionamento
  - f- Deflexão
  - l- Comprimento
  - m- Número de medições
  - n- Vetor normal
  - p- Sobredeslocamento
  - x- Eixo x do sistema coordenado ortogonal
  - y- Eixo y do sistema coordenado ortogonal
  - z- Eixo z do sistema coordenado ortogonal



$\alpha, \beta, \delta$  - Ângulos diretores

$\xi, \eta, \psi$  - Eixos geométricos

$\emptyset$  - Ângulo entre a normal à superfície e a direção de aproximação

$\delta$  - Erro de ortogonalidade

$\epsilon$  - Erro limite da posição ideal

A/D - Analógico-digital

CLP - Controlador Lógico Programável

CN - Controle/Comando Numérico

CNC - Comando Numérico Computadorizado

DMF - Dispositivo para Medição de Ferramentas

DNC - Direct Numerical Control, Controle Numérico Direto

IAC - Interface para Aquisição de Coordenadas

IMAC - Interface Modular de Aquisição e Controle

IMP - Interface Modular de Processos

SAS - Sistema de Aquisição de Sinais

SMCP - Sistema de Medição por Coordenadas no Processo

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 MEDIÇÃO POR COORDENADAS NO PROCESSO

Ao lado da escalada em busca de maior produtividade, a indústria mecânica defronta-se atualmente com mais um desafio: a competitividade. Em função da evolução do mercado e do constante desenvolvimento dos produtos, o princípio da flexibilidade tem adquirido sempre maior importância, alterando profundamente o panorama industrial. Há muito, a fabricação de um produto apoia-se em fundamentos como a minimização do tempo dispendido e do consumo de matéria prima para sua obtenção. Contudo, os modernos sistemas mecânicos vêm impondo uma crescente exigência de qualidade, de modo a atender requisitos como maiores rendimento e vida útil, com a mínima manutenção. Os seus componentes devem, para tanto, responder a tolerâncias geométricas mais estreitas, alcançadas por processos, equipamentos e métodos mais avançados.

Nos processos de fabricação por usinagem, as máquinas ferramentas com comando numérico (CN) atendem critérios de aumento da produtividade ao lado daqueles tradicionalmente preconizados, como a maximização das condições de corte. Dispõe-se de recursos que visam: diminuição de tempos secundários, maior

precisão e repetibilidade das peças, segurança de operação, flexibilidade na produção de diferentes peças, etc. Com vistas a diminuir o tempo gasto no controle de qualidade, foram introduzidas em tais máquinas inovações construtivas que lhes conferiram melhor desempenho geométrico. Conta-se com recursos como: sistemas de medição com erros compensados, guias de elevada resistência ao desgaste, movimentos favorecidos por roletes ou guias hidrostáticas, otimização da rigidez mecânica, minimização da inércia, aperfeiçoamento dos sistemas reguladores de posição, etc. Permanecem, entretanto, fatores aleatórios, como o desgaste de ferramentas e deformações térmicas e dinâmicas, cujos efeitos tem-se procurado superar com sistemas de medição junto ao processo de fabricação, objetivando-se também reduzir o tempo entre a detecção e a correção dos erros.

O tempo gasto na preparação de uma etapa de produção pode também ser elevado, especialmente em grandes peças, envolvendo ajustes de ferramentas, dispositivos e peça. O método convencional consiste em usinar peças-piloto e submetê-las a um controle geométrico a partir do qual são corrigidos parâmetros de ferramentas e definições de origem da peça. Por resultar em longos períodos não produtivos da máquina, esta etapa contribui para limitar o número mínimo viável para um lote de peças.

Aproveitando a sua semelhança com as máquinas de medir por coordenadas e o seu bom desempenho geométrico, têm sido desenvolvidos sistemas que capacitam a máquina ferramenta CN a atuar como uma máquina de medir. Entre etapas de um programa de usinagem, dispositivos eletro-mecânicos de medição, associados à máquina entram em operação, permitindo determinar coordenadas de pontos de peças e ferramentas com auxílio dos seus próprios sistemas de medição de deslocamento. Os resultados obtidos pelo processamento destas coordenadas, como dimensões, erros, posições, podem ser realimentados ao comando numérico no sentido de adequar as condições de execução do programa. A tecnologia se serve do desenvolvimento alcançado pelos comandos numéricos

computadorizados (CNC), processadores lógicos e interfaces eletrônicas, atualmente de uso generalizado.

As vantagens apresentadas por um sistema de medição por coordenadas no processo (SMCP) resumem-se no aumento da produtividade da fabricação, alcançadas por adequadas estratégias no sentido de:

- diminuir o tempo gasto no controle geométrico intermediário e final de peças, no ajuste de ferramentas, na preparação da produção;
- reduzir os custos pela diminuição de refugos ou de operações de recuperação das peças;
- aumentar a qualidade das peças, através da detecção e correção de erros aleatórios do processo, garantindo maior uniformidade dimensional dos produtos;
- integrar as informações de controle geométrico com as de usinagem, alcançando uma maior racionalização.

## 1.2 ESTADO DA ARTE

A medição junto ao processo de usinagem deve atender a objetivos como /1/:

- medir de modo automático grandezas tecnológicas e geométricas de interesse;
- determinar com rapidez as variações destas grandezas relativamente a valores desejados;
- tomar medidas corretivas diretas sobre o processo, ao serem ultrapassados limites pré-estabelecidos destas grandezas;

Quanto ao instante em que ocorrem, as medições podem ser:

- durante o processo, quando o controle e a tomada de medidas corretivas são feitas simultaneamente à usinagem.
- após o processo, quando as medições se dão após a usinagem e as correções são aplicadas às peças seguintes;
- intermitente ao processo, quando a medição se dá antes ou

após uma etapa de usinagem, e a correção pode ser efetivada para as etapas subsequentes.

Como sistema baseado na medição de grandezas tecnológicas durante o processo, cita-se o controle adaptativo /2/. O caso típico trata da regulação da velocidade de avanço da ferramenta em função da força de corte, de modo a obter uma condição ótima. Para a medição do desgaste de ferramentas em tornos, entendido como grandeza geométrica, é possível servir-se do princípio pneumático para a medição de deslocamentos. Um fluxo de ar é injetado frontalmente sobre a peça sendo usinada através de um canal interno da pastilha de corte /3/. Experimentalmente levantam-se as relações entre a queda de pressão e a distância da pastilha à peça, possibilitando determinar o desgaste a partir da medição da pressão. Este desgaste pode ser considerado automaticamente no CN como uma correção adicional de ferramenta. Os sistemas adaptativos são justificados onde a precisão da peça e a velocidade de resposta são critérios básicos, requerendo por sua vez razoável esforço na modelação e programação do comportamento das variáveis /2/.

Em retificadoras há muito são utilizados medidores elétricos ou pneumáticos, que medem continuamente o diâmetro da peça durante sua usinagem. Ao ser atingido o diâmetro desejado, o movimento de avanço é interrompido. Tais sistemas não são adequados a tornos devido às mais severas condições de corte, de acabamento superficial, e à presença de cavacos. Para estas condições, uma medição intermitente à usinagem se mostra mais favorável. Uma solução para medir o raio de uma peça é mostrada na figura 1.1, baseada em um sistema de medição de deslocamento auxiliar e um feixe luminoso para detecção da superfície da peça /4/. Um circuito regulador controla o motor de passo, avançando o cabeçote contra a peça, até que um fotodiodo forneça uma indicação de referência. Com um processador externo, o valor do deslocamento, dado por um contador dos pulsos enviados ao motor, é associado à indicação do fotodetector.

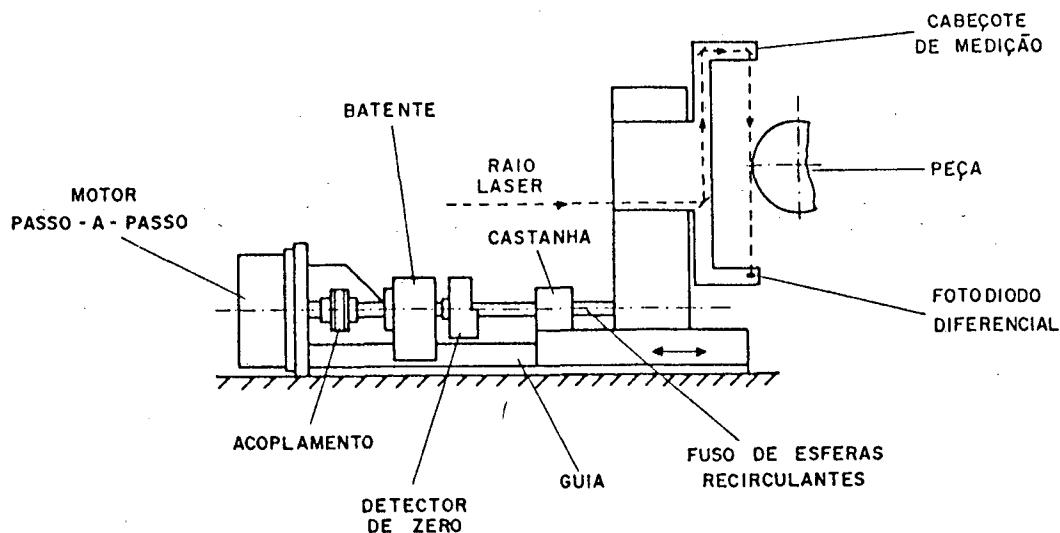


FIG. 1.1 : Medição do raio da peça com sensor óptico em um torno /4/

O sistema denominado disco de atrito é proposto para a medição de peças com grande diâmetro (acima de 500 mm) em tornos e retificadoras /5/. O princípio de funcionamento, mostrado na figura 1.2, consiste em medir o deslocamento angular de um disco que rola sobre a peça em movimento de rotação. O diâmetro é obtido por um processador a partir da relação entre os deslocamentos angulares do disco e da peça, e o diâmetro do disco. Um fator experimental de escorregamento é aplicado em função do material da peça. Como vantagem deste sistema é apontada a sua não dependência com os erros da máquina ferramenta, permitindo obter resultados com erro inferior a  $\pm 15 \mu\text{m}$ .

A medição de peças pequenas após a usinagem é favorecida por estações de medição junto à máquina, equipadas com medidores de deslocamento elétricos ou eletro-pneumáticos, ajustados para determinar erros específicos da peça /6/. Estas estações podem contar com um microprocessador para realizar a leitura dos diversos transdutores, comparar valores, calcular e transferir correções ao CNC, que as levará em consideração nas próximas peças. Tais sistemas têm aplicação apenas em médias a grandes

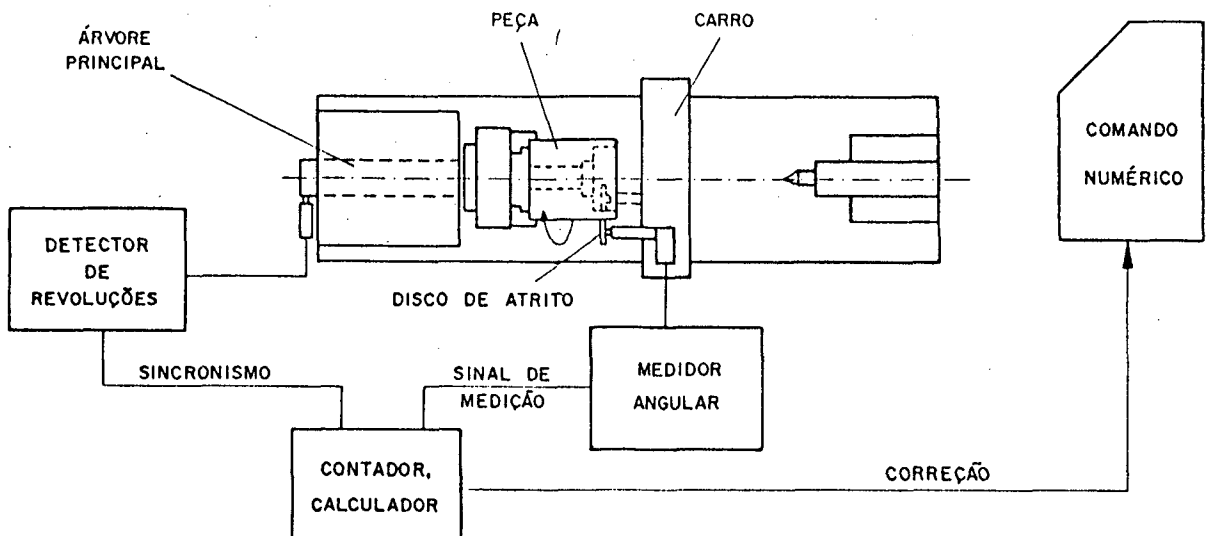


FIG. 1.2 : Medição do diâmetro da peça pelo princípio do rolamento de um disco de atrito

séries, quando são justificáveis os esforços na preparação e programação do equipamento.

A utilização dos sistemas de medição de deslocamento da máquina ferramenta há muito tem sido proposta para tornos CN /7/. A figura 1.3 mostra um dispositivo eletromecânico, o apalpador, montado no cabeçote revólver de um torno, que, ao tocar a peça, aciona a leitura das coordenadas da máquina. Segundo um programa próprio, o apalpador é levado a tocar a peça nos pontos desejados, a partir de cujas coordenadas são calculadas as características geométricas de interesse. Na sequência apresentada pela figura 1.3, tem-se em A a tomada de um ponto inicial, pelo toque de um pino de referência; em B é feita uma usinagem preliminar; a seguir, em C, o raio da peça é medido com auxílio do apalpador; o erro detectado é corrigido automaticamente no comando numérico, e então é realizada a usinagem final D.

Um outro sistema, onde o apalpador pode ocupar uma posição em um magazine de ferramentas, conta com o desacoplamento de sinais entre o apalpador e a máquina por princípio óptico e

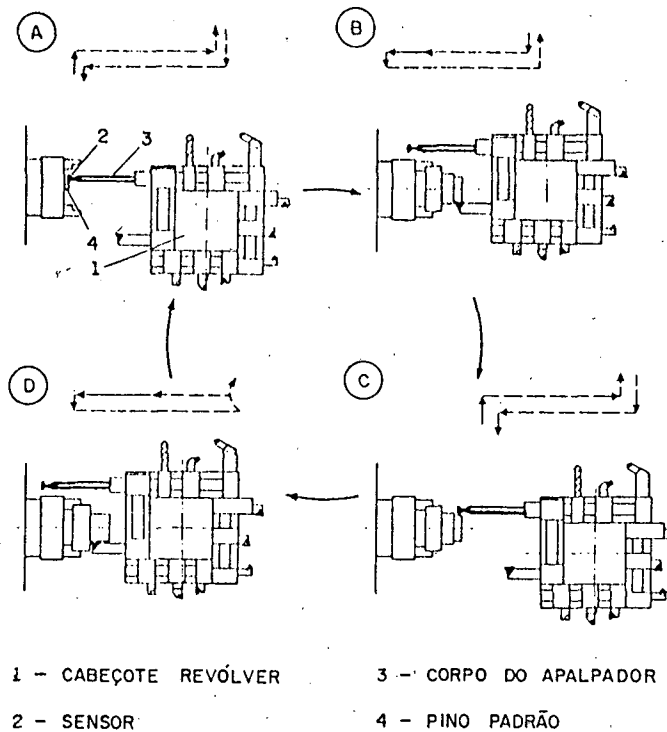


FIG. 1.3 : Medição e correção do raio de uma peça em um torno CN /7/

indutivo /8/. O CNC foi preparado para, através de sentenças especiais do próprio programa, calcular valores de correção que são considerados sobre os dados das ferramentas. Contando com compensação de erros de posicionamento da máquina, este sistema permite atingir tolerâncias de fabricação de  $\pm (5 + 0,03 L) \mu\text{m}$ , sendo L o comprimento em milímetros.

Uma opção de medição de ferramentas em um torno é mostrada na figura 1.4 /9/, onde os parâmetros são verificados pela aproximação do gume da ferramenta contra um dispositivo especial fixo na região de trabalho. Este dispositivo conta com dois medidores indutivos de deslocamento, orientados segundo os eixos coordenados, de modo a detectar erros de ajuste e desgaste. O erro de cada parâmetro é automaticamente compensado no CNC.

Pfeifer e Fürst, que muito contribuíram ao desenvolvimento e divulgação da tecnologia da medição no processo, ressaltaram como requisitos básicos para a implantação de um SMCP, a



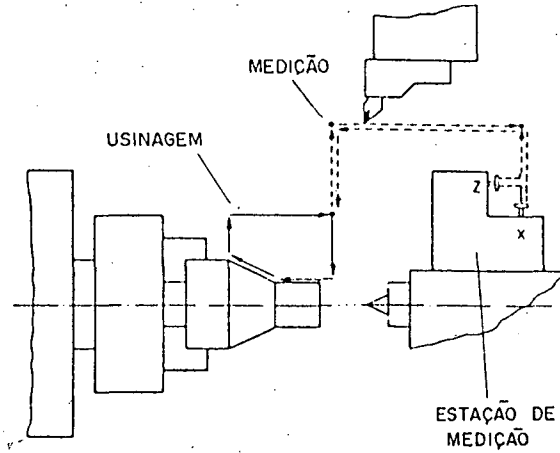


FIG. 1.4 : Determinação dos parâmetros de ferramentas em um torno CN /9/

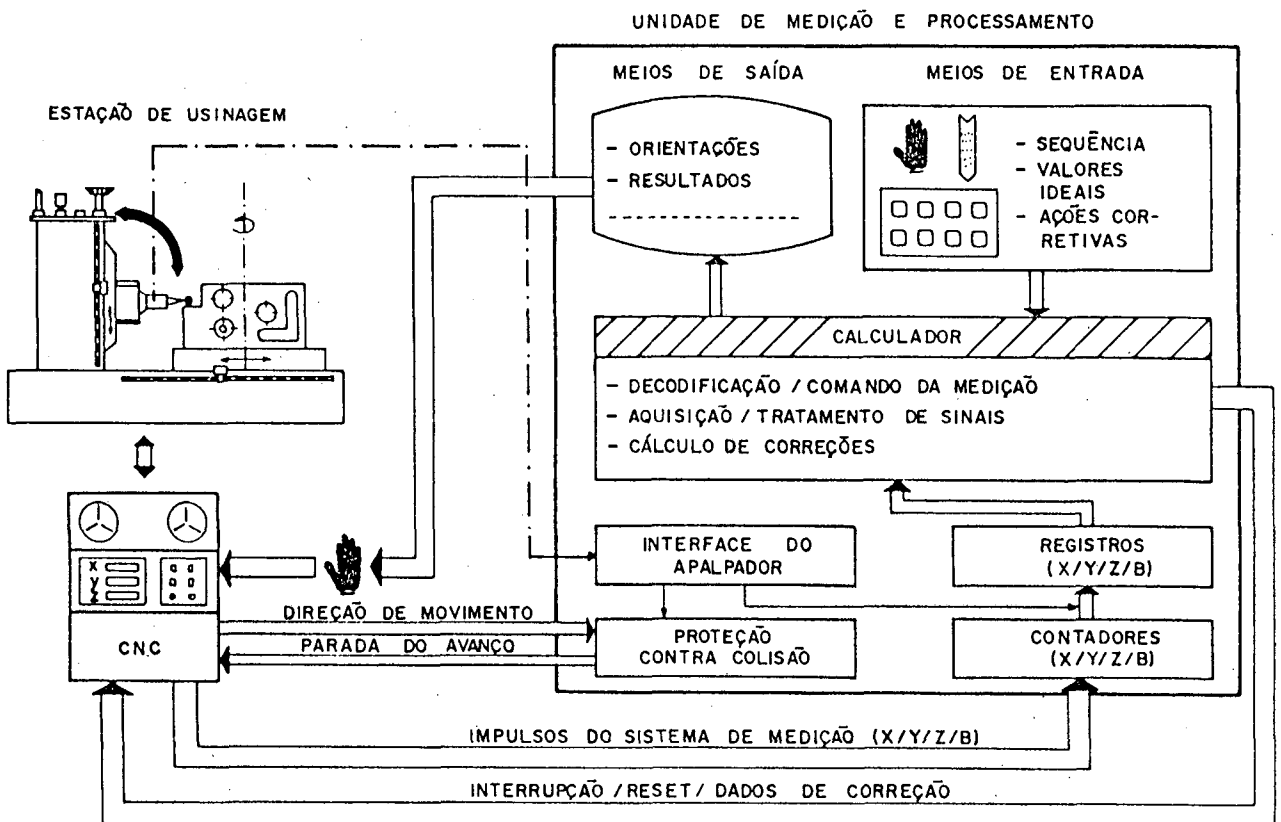


FIG. 1.5 : Sistema de medição por coordenadas no processo baseado em um microcomputador /12/

disponibilidade de apalpadores adequados à operação junto ao processo, e a suficiente precisão da máquina ferramenta /10/. Quanto ao processamento de informações, ele pode ser realizado por uma extensão dos recursos internos do CNC ou por um microcomputador associado /11/. Um aumento da precisão da máquina pode ser alcançado por uma adequada compensação automática dos seus erros geométricos, obtidos por ensaios específicos. A figura 1.5 esquematiza um sistema implantado, onde um microcomputador assume o papel de controlador de uma sequência programada de medições e informa ao usuário os procedimentos de correção /12/. A figura 1.6 ilustra um resumo das aplicações deste sistema sugeridas para centros de usinagem /13/. Por apresentar tempos secundários mais factíveis de minimização, aponta-se a fabricação de médias a grandes peças como o principal campo para a medição

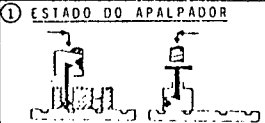

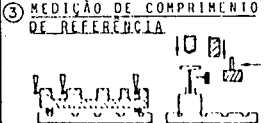

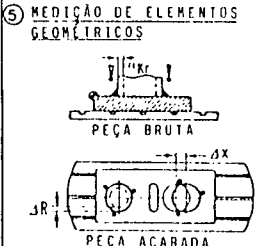
TAREFA DE MEDIÇÃO	OBJETIVO	ESTRATÉGIA DE CORREÇÃO
① ESTADO DO APALPADOR 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VERIFICAÇÃO DE PEÇAS E FERRAMENTAS</li> <li>• PROTEÇÃO CONTRA ACIDENTES</li> <li>• ELIMINAR MOVIMENTOS EM VAZIO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PARADA DO CN</li> <li>• AVISO AO OPERADOR</li> <li>• SALTO PARA TRECHOS DO PROGRAMA</li> </ul>
② MEDIÇÃO DE PONTO DE REFERÊNCIA 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• COMPENSAÇÃO DE DEFORMAÇÕES TÉRMICAS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RESET X, Y, Z</li> <li>• CORREÇÃO DE ORIGEM <math>\Delta (X_0, Y_0, Z_0)</math></li> </ul>
③ MEDIÇÃO DE COMPRIMENTO DE REFERÊNCIA 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• REVISÃO DA MÁQUINA</li> <li>• MEDIÇÃO AUTOMÁTICA DE FERRAMENTAS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• REAJUSTE, MANUTENÇÃO</li> <li>• CORREÇÃO DE DADOS DA FERRAMENTA</li> </ul>
④ LOCALIZAÇÃO DA PEÇA 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• REDUÇÃO DO TEMPO DE AJUSTE DA PEÇA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS DE POSIÇÃO</li> </ul>
⑤ MEDIÇÃO DE ELEMENTOS GEOMÉTRICOS  <p>PEÇA BRUTA</p> <p>PEÇA ACARADA</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DETECÇÃO DE SOBREMEDIDAS</li> <li>• COMPENSAÇÃO DE DESGASTE</li> <li>• CONTROLE DE QUALIDADE ON-LINE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MODIFICAÇÃO DE ORIGEM</li> <li>• REAJUSTE OU SUBSTITUIÇÃO DA FERRAMENTA</li> <li>• CLASSIFICAÇÃO DA PEÇA</li> </ul>

FIG. 1.6 : Aplicações de um sistema de medição por coordenadas no processo /13/

com as máquinas ferramentas. Graças à elevada velocidade de operação destas máquinas, pode-se, por exemplo, medir automaticamente por quatro pontos um furo em apenas 3,5 s /13/. Adotando-se a estratégia de deixar uma pequena sobremedida em uma operação de fresamento, pode-se determinar com precisão os valores para o passe de acabamento. Por este método, em uma série de furos obteve-se diâmetros com um erro médio de 4  $\mu\text{m}$  e variação  $\pm 5 \mu\text{m}$  /13/.

Há dois tipos básicos de apalpadores /14/:

- apalpador medidor, que fornece um sinal proporcional ao deslocamento do sensor após o contato com a peça;
- apalpador ligador, que gera um sinal de comutação após um deslocamento pré-definido do sensor.

As coordenadas do sensor no instante da medição podem ser obtidas por dois métodos:

- método diferencial, que consiste na associação da deflexão indicada pelo apalpador medidor com as coordenadas da máquina em um determinado momento;
- método absoluto, onde as coordenadas da máquina são lidas ao ser emitido o sinal de um apalpador ligador.

Existem diversos fabricantes conceituados de equipamentos para a medição por coordenadas em máquinas ferramentas /15, 16, 17/. O desenvolvimento de seus produtos permitiu oferecer apalpadores de diferentes portes, princípios de funcionamento, características operacionais, sistemas de desacoplamento de sinais ópticos e indutivos adequados a tornos, fresadoras e centros de usinagem, tipos alternativos de sinais de correção, diversos acessórios, etc. Os apalpadores apresentam em geral uma dispersão de medição especificada de  $\pm 1$  a  $\pm 3 \mu\text{m}$  /18/, ao passo que as máquinas ferramentas alcançam uma precisão de trabalho cerca de  $\pm 10 \mu\text{m}$ , e centros de usinagem de grande porte, de  $\pm 15$  a  $\pm 20 \mu\text{m}$  /19/.

Alguns CNCs podem ser fornecidos com recursos próprios para medição por coordenadas, ou põem à disposição recursos para a sua

implementação. Alguns tornos contam com um sistema de ocular óptica para a determinação dos parâmetros de ferramentas, que são diretamente memorizados pelo comando /20/. Versões de CNCs preparadas para atuar em medição dispõem de funções matemáticas e lógicas programáveis, e oferecem ainda subrotinas pré-definidas como medição de ferramentas, determinação do diâmetro de peças, pontos de simetria, comparação de resultados com tolerâncias especificadas /21/.

Algumas desvantagens devem ser consideradas na análise da viabilidade de implantação de um SMCP, como:

- por ser intermitente ao processo, durante as etapas de medição, a máquina permanece improdutiva;
- existem limitações impostas pelos apalpadores quanto à exequibilidade de todas as tarefas de medição;
- a implantação de um SMCP em máquinas disponíveis ou a aquisição de CNC's com recursos de medição representam um investimento adicional.

### 1.3 PROPOSTA DE TRABALHO

A tecnologia de medição em máquinas ferramentas CN mostra um grande potencial para elevar a racionalização na fabricação, fato comprovado pela disponibilidade destes recursos básicos nos mais recentes sistemas de CNCs. Entretanto, frente à multiplicidade de aplicações e à complexidade dos sistemas, pouco foi efetivado na prática, em função também da própria dificuldade na análise da sua viabilidade econômica. Observa-se que a tecnologia de medição por coordenadas no processo é, por si mesma, aplicável de modo amplo a máquinas de diversos níveis de automação, limitando-se, correspondentemente, a maiores ou menores graus de automatização do controle do processo.

Objetiva-se neste trabalho explorar um dos métodos de medição, o diferencial, até o nível experimental. Com apalpadores

do tipo medidor pode-se, por um lado, estabelecer sistemas mais simples. Em aplicações mais complexas, o método de medição diferencial pode ser particularizado para o absoluto, devendo apenas o sistema atender a condições operacionais inerentes ao método.

Os procedimentos de medição exigem o conhecimento das condições geométricas em que ela ocorre, pelo que é feita uma abordagem da tecnologia de medição por coordenadas. De modo a abranger aspectos de flexibilidade para um SMCP, algumas possibilidades de aplicação são levantadas. A implantação de um sistema, por sua vez, requer uma definição detalhada das atribuições de cada módulo e das suas características necessárias. Do sistema experimental procura-se identificar as principais dificuldades técnicas de implantação.

## 2. O SISTEMA E SUAS FUNÇÕES

A seguir é descrito o princípio de funcionamento de um SMCP, abrangendo aspectos básicos que justificam a proposta deste trabalho. Algumas aplicações do método diferencial serão sugeridas, no sentido de explorar o potencial da tecnologia, e com isto levantar algumas características desejáveis dos sistemas.

### 2.1 MODOS DE OPERAÇÃO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Relativamente aos objetivos dos trabalhos de medição, pode-se ter:

- medição independente - onde se procede como em uma máquina de medir por coordenadas, com vistas a apenas levantar características geométricas;
- medição integrada - as etapas de medição, processamento de dados e realimentação constituem parte de um programa de fabricação, e ocorrem de modo intermitente ao processo de usinagem.

Podem ser caracterizados dois modos de utilizar a máquina ferramenta CN na medição por coordenadas:

- medição por comando manual - quando os movimentos para medição são controlados pelo operador através do painel do CN;
- medição por comando automático - quando existe um programa que comanda a movimentação para a medição.

A máquina ferramenta participa com os movimentos e sistemas de medição de deslocamento (ou de posição), definindo um sistema coordenado que, em geral, é bidimensional (2D) para tornos e tridimensional (3D) para fresadoras e centros de usinagem. Para medir, o apalpador é instalado no lugar da ferramenta, e, ao tocar a peça, permite determinar a posição do sensor em relação a

um ponto conhecido da máquina. Interfaces eletrônicas de aquisição e controle de sinais transferem o sinal do apalpador e as coordenadas para um processador capaz de determinar elementos e erros geométricos a partir dos pontos levantados. A associação do processador com aquelas interfaces é definida como o controlador do sistema.

Na medição independente, pode-se operar com a chamada pelo operador das funções de processamento geométrico, segundo um plano prévio que orienta a sequência de procedimentos, e os resultados devem ser informados por um meio de saída (impressora, vídeo, plotadora). Este modo de operação tem assim, como objetivo mais amplo, a medição de peças com geometria qualquer e desconhecida pelo uso da própria máquina ferramenta. Em um outro modo de operação, tem-se um programa constituído de funções para movimentação da máquina seguidas de funções de processamento, de modo que dispõe-se de uma medição totalmente automática. Este modo pode ser usado no controle geométrico de peças.

Em um sistema de medição para operar no processo (fig. 2.1) requer-se que sejam informadas ao processador quais as tarefas a executar, e quando efetivá-las. Assim, etapas de usinagem e medição se sucedem, constituindo um único programa de fabricação. Os valores de correção calculados (parâmetros de ferramentas, correções de origem, etc) são realimentados ao comando numérico automaticamente ou por intervenção do operador, conforme seus recursos disponíveis. Estas ações de correção devem estar também estabelecidas no programa de fabricação, que segue, após a efetivação daquelas, com as novas condições.

## 2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO

A figura 2.2 ilustra os pontos de maior interesse definidos no sistema coordenado de um torno. Os apalpadores do tipo medidor e ligador como citados no item 1.2 estão representados na figura

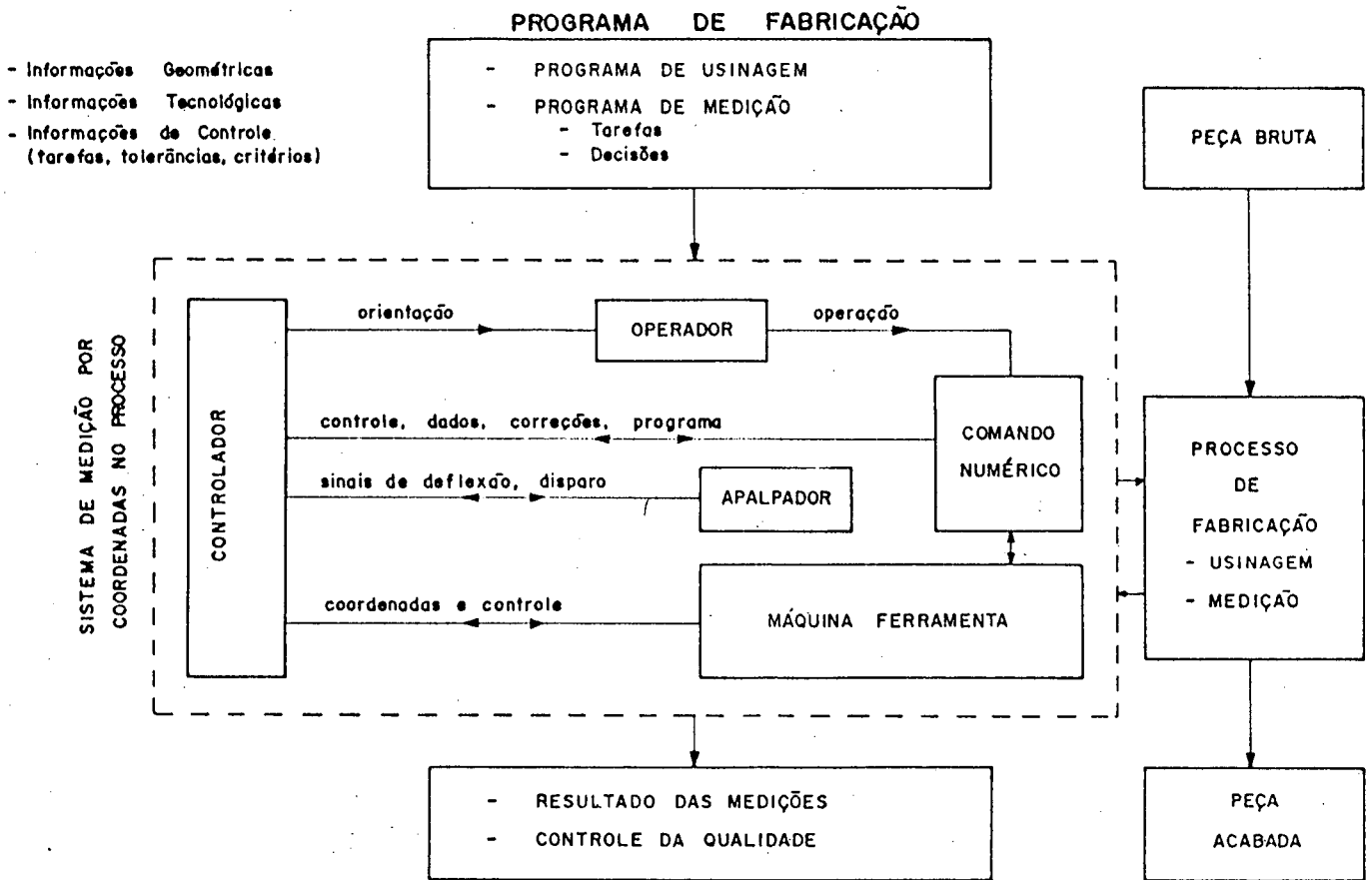


FIG. 2.1 : Sistema de medição por coordenadas em máquinas ferramentas com comando numérico

2.3; ao lado do exemplo da medição de um ponto da peça. Por ora, admitiu-se um sensor teórico pontual, sendo a condição real analisada no item 4.1. Relacionados a cada tipo de apalpador, são descritos a seguir os dois métodos para determinação de coordenadas.

#### 2.2.1 Método Diferencial

No método diferencial associa-se as coordenadas do ponto de referência do apalpador (ponto A) com a deflexão  $\overline{AS}$  indicada, obtidas após o contato do sensor com a peça e a parada do movimento de aproximação. O ponto A pode ser determinado (fig. 2.3):



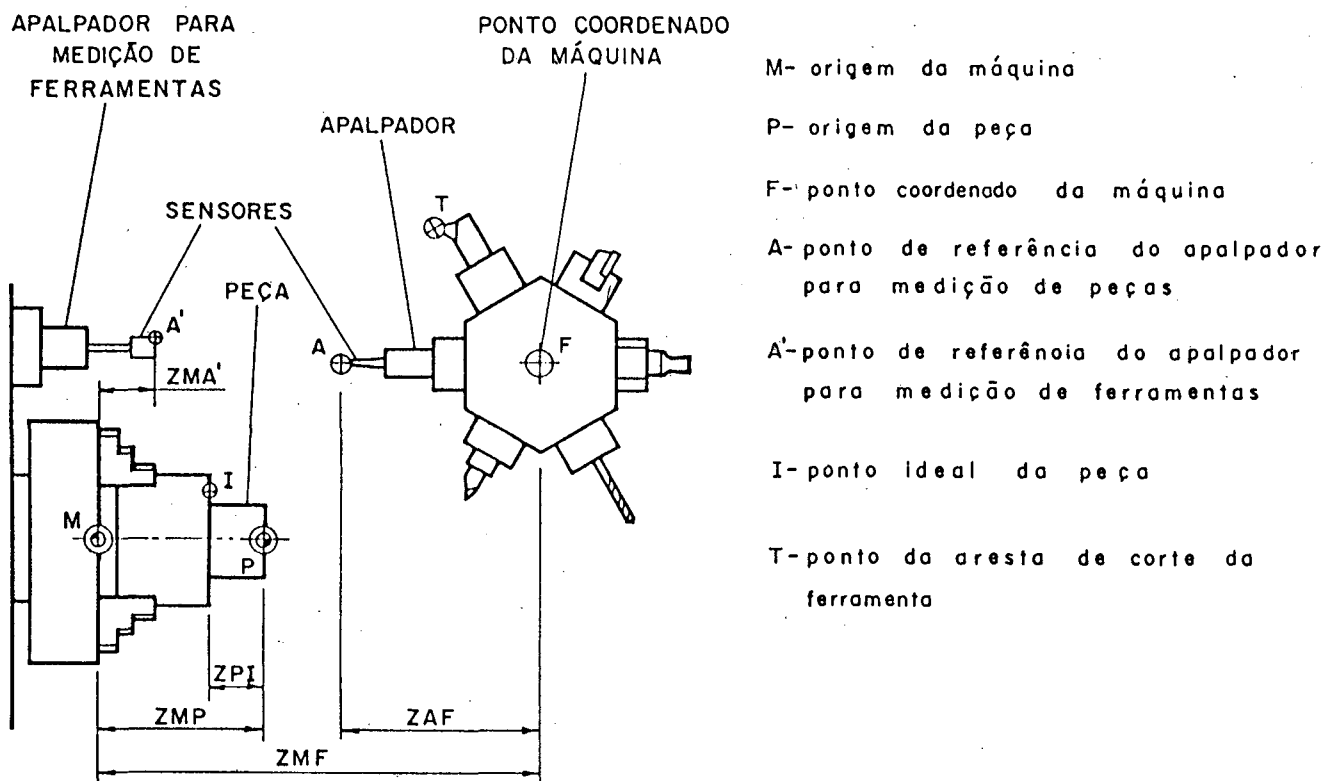


FIG. 2.2 : Sistema coordenado para medição em um torno revólver CN

- a partir da posição da máquina (ponto F), informada pelos seus sistemas de medição de deslocamento (posição), e que é corrigida pelos parâmetros do apalpador e origem da peça;
- pela própria posição programada N, caso a aproximação tenha resultado de um posicionamento programado, pois aqui  $A \equiv N$ .

Observa-se que na operação por comando manual é necessário o conhecimento das coordenadas de F. Por outro lado, na medição por comando automático de pequenos erros (inferiores à faixa de medição do apalpador), chega-se a uma simplificação pela "medição diferencial". Aqui, o apalpador, movimentando-se na direção de interesse, ocupa a posição nominal N, tocando a peça. Nesta condição, a deflexão medida pelo apalpador corresponde diretamente ao erro da posição da superfície.

A medição diferencial como descrita acima é bastante comum em processos de usinagem, servindo-se de instrumentos como

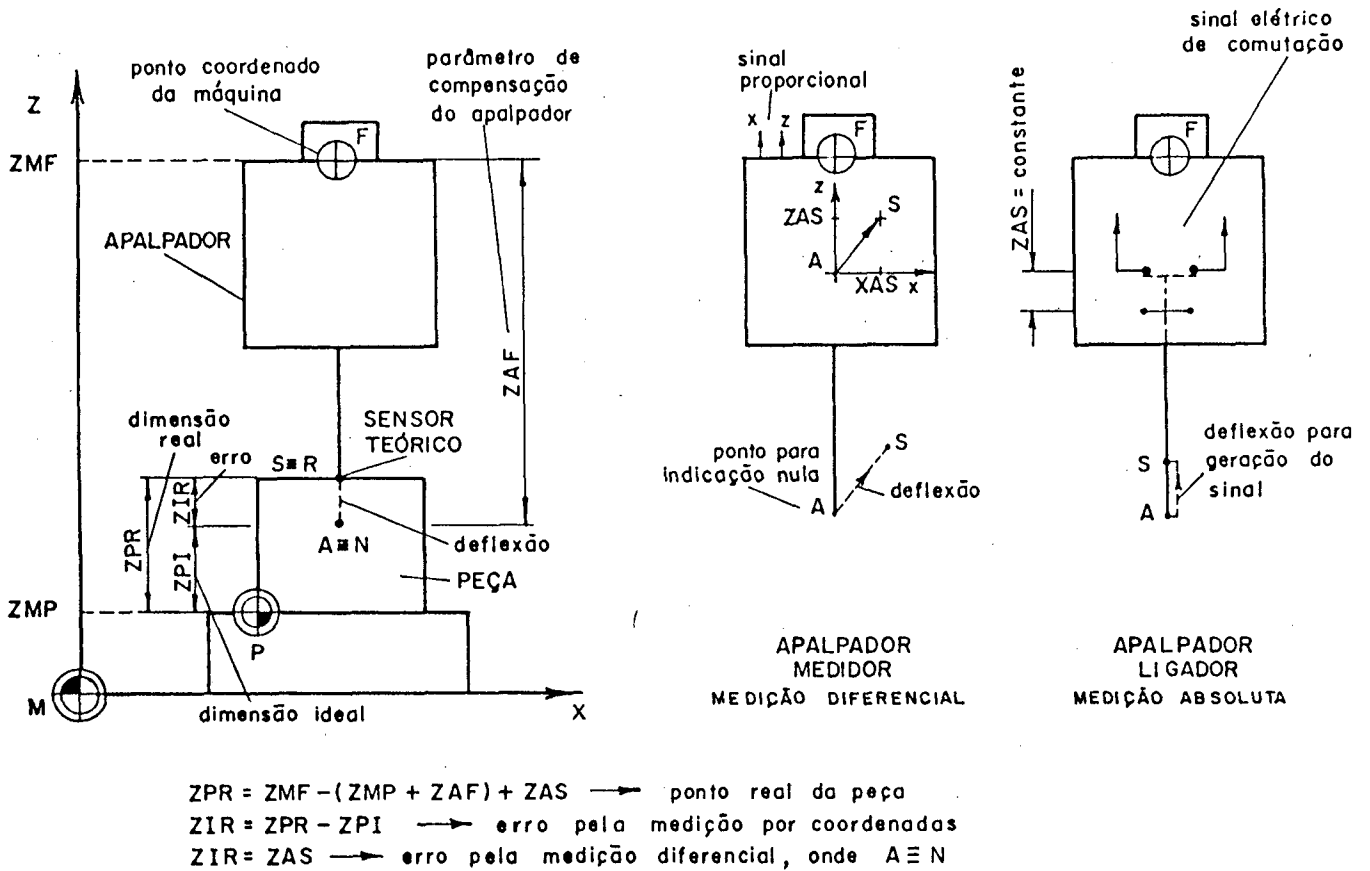


FIG. 2.3 : Determinação de coordenadas e erros com apalpadores dos tipos medidor e ligador

relógios comparadores. Assim, aplicações mais simples, como o ajuste de peças e ferramentas e a determinação de passes de acabamento, podem ser desenvolvidas sem necessitar das coordenadas da máquina. A medição por coordenadas pelo método diferencial é favorecida ainda pela condição estacionária da máquina no instante da leitura de sinais pelo controlador.

### 2.2.2 Método Absoluto

No método absoluto associa-se as coordenadas do ponto de referência do apalpador (ponto A) com a constante de comutação  $\overline{AS}$  do apalpador. Esta constante é um parâmetro metrológico do apalpador que corresponde à deflexão do sensor, relativamente à sua posição de referência, necessária para habilitar a leitura

das coordenadas de máquina (ponto F), após o contato com a peça (fig. 2.3).

Embora não de modo usual, este método é possível também com um apalpador medidor, se for prevista a geração do sinal de comutação após a deflexão ter atingido um valor pré-estabelecido.

O método absoluto traz como grande vantagem o uso do apalpador ligador, cuja configuração mecânica é em geral mais simples, de menor custo do que o tipo medidor, e seu uso é bastante generalizado em máquinas de medir por coordenadas. Em contrapartida, na medição absoluta a leitura de coordenadas da máquina ocorre durante o seu movimento, podendo-se requerer para tanto, circuitos eletrônicos mais complexos, especialmente em comandos numéricos que não preveem esta condição de leitura. Tratando-se de dispor o apalpador em um magazine de ferramentas, o apalpador ligador permite um mais simples desacoplamento do sinal elétrico.

## 2.3 APLICAÇÕES DO SMCP

A fim de ampliar a visão sobre os recursos de um SMCP, e ao mesmo tempo detectar suas limitações, serão descritas a seguir algumas propostas de aplicação. Espera-se não limitar o espectro da sua utilização, mas, ao contrário, estimular a identificação de novas alternativas do seu potencial.

### 2.3.1 Medição de Ferramentas

Objetiva-se determinar parâmetros de compensação de ferramentas, ou seus erros, pela medição após a sua instalação na máquina e antes da operação de usinagem.

Os parâmetros de compensação de ferramentas geralmente definidos são: comprimento, diâmetro gerado pelo movimento de rotação (ferramentas rotativas); parâmetros de posição, como gume teórico de corte e raio de arredondamento da ponta da

ferramenta (ferramentas não rotativas).

Os principais erros a serem detectados com o SMCP são:

- erros de ajuste da ferramenta, realizado em microscópios ou dispositivos de pré-ajustagem (pré-setting); com os primeiros, tem-se erros de até  $\pm 5 \mu\text{m}$ , e com os outros de  $\pm 20$  a  $\pm 30 \mu\text{m}$  /22, 23/;
- erros de instalação da ferramenta na máquina, em geral aleatórios, que atingem valores de  $\pm 3$  a  $\pm 5 \mu\text{m}$  /19/; podem estar incluídos erros de caráter sistemático quando originados por diferentes condições entre a máquina e o equipamento de ajuste;
- variações da geometria da ferramenta, devidas a avarias durante a usinagem; em operações de acabamento, o desgaste admissível depende da tolerância da peça, e em desbaste, depende de fatores como a potência disponível, a temperatura da ferramenta, vibrações, etc /24/;
- deformações térmicas em geral, que resultem em uma variação da posição relativa entre a peça e a ferramenta; podem atingir valores da ordem de 0,1 mm /12/.

Um apalpador é montado fixo na região de trabalho da máquina de modo a ser alcançado pelas ferramentas que tocam os pontos de seus elementos de corte. A figura 2.4.a ilustra a aplicação em um torno onde o apalpador é equipado com um sensor cúbico cujas faces são orientadas segundo os planos coordenados da máquina e têm suas posições ( $\overline{MA}$ ) conhecidas. No exemplo, o parâmetro do gume teórico na direção Z (ZTF) é obtido pelo processamento de coordenadas e deflexão após o contato. Na medição de erros, quando o movimento é programado com base nos parâmetros nominais, apenas a informação da deflexão pode ser suficiente. Em substituição ao apalpador, é possível utilizar um dispositivo como mostrado na figura 1.1, ou fotodetectores que forneceriam uma informação análoga à deflexão. Aspectos importantes a serem considerados são a instalação sem prejuízo da área efetiva de trabalho e a segurança dos condutores de sinais.

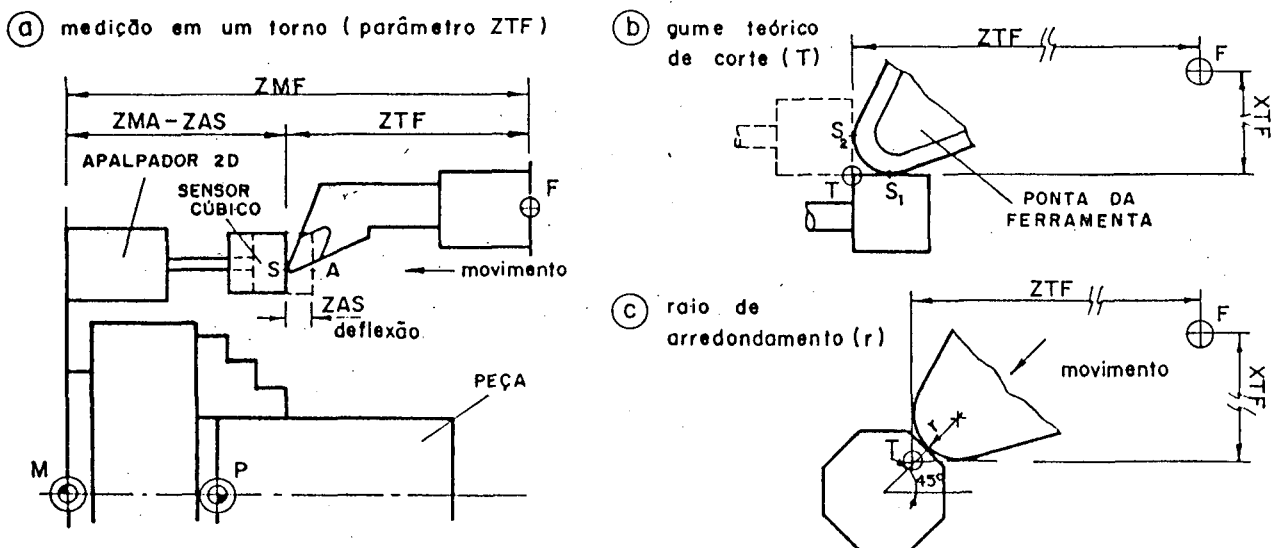


FIG. 2.4 : Medição dos parâmetros de compensação de ferramentas em tornos

Os parâmetros determinados ou corrigidos devem ser atualizados na memória do CNC.

Quanto ao instante em que ocorre, a medição de ferramentas pode atender os seguintes casos:

- medição inicial - após a montagem da ferramenta no seu suporte, pode ser aplicada ora à determinação de parâmetros, quando os movimentos para medição são controlados pelo operador, ora a corrigir erros de ajuste e instalação, sendo programados os movimentos levando em conta parâmetros nominais aproximados.
- medição entre operações de usinagem - aplica-se em especial à detecção de erros de instalação, desgaste e deformações térmicas, sendo executada de modo automático. Pode-se estabelecer limites, de modo que, de um lado, valores inferiores a um desgaste admissível dispensem a correção, e de outro, valores superiores a um desgaste máximo informem a necessidade de troca da ferramenta, ou a executem automaticamente.

Ferramentas do tipo monocortante são de medição mais

simples, pois os parâmetros são definidos a partir de apenas um ponto, como as ferramentas para torneamento (fig. 2.4.a e 2.4.b). Por uma sofisticação do método, a verificação do raio de arredondamento também é possível, empregando-se um sensor octagonal e algum cálculo adicional (fig. 2.4.c). Caso o comando numérico não disponha de compensação automática deste raio, deve ser prevista uma conveniente alteração do programa de usinagem.

A verificação de barras de mandrilhar requer o posicionamento da árvore em ao menos uma posição angular definida, de modo que o gume da ferramenta esteja orientado segundo uma das faces do sensor, permitindo determinar o raio de rotação. No sentido de eliminar algum desalinhamento entre os eixos geométricos de rotação e da ferramenta, uma segunda medição pode ser feita girando-se a árvore de  $180^\circ$ . Entretanto, este procedimento requer a capacidade de posicionamento angular da árvore também nesta segunda condição.

A medição de ferramentas circulares de corte múltiplo, como brocas e fresas, apresentam maiores dificuldades, requerendo um correto posicionamento angular da ferramenta e da árvore de modo a orientar a aresta a ser medida na direção do sensor (fig. 2.5.a). Livre desta restrição está a medição do comprimento de brocas (medição da alma) e de fresas com diâmetros inferiores à dimensão do sensor cúbico (medição do maior comprimento), conforme ilustrado na figura 2.5.b. Em fresas maiores, as arestas podem ser verificadas individualmente, consumindo entretanto maior tempo. O diâmetro de ferramentas com número par de arestas pode ser medido por duas arestas opostas; no caso de número ímpar, mede-se o raio por apenas uma aresta, como nas barras de mandrilhar.

A medição automática do diâmetro ou raio de ferramentas rotativas na própria máquina aguarda ainda o desenvolvimento de apalpadores ou outros sistemas mais adequados para indicar a efetiva dimensão que elas geram.

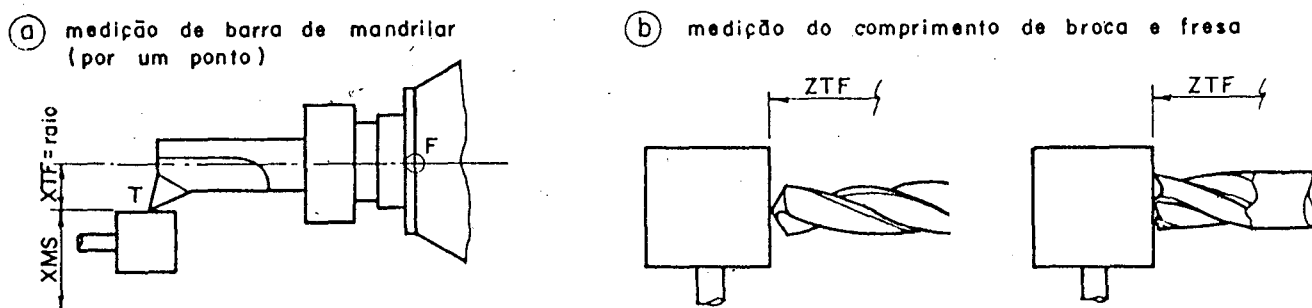


FIG. 2.5 : Medição de ferramentas rotativas em furadeiras, fresadoras e centros de usinagem

### 2.3.2 Verificação de Erros da Máquina Ferramenta

Objetiva-se determinar erros ou alterações geométricas da própria máquina ferramenta. Medições integradas ao processo levam a uma compensação dos erros enquanto que outras, independentes do processo, permitem qualificar a máquina quanto à precisão por ensaios geométricos específicos. Estes casos serão a seguir analisados em sequência.

As medições no processo visam detectar alterações causadas por:

- deformação de origem térmica, que pode resultar em erros da ordem de 0,1 mm /11/;
- deformação da máquina devida a massas que ocupam posições variadas, em especial a própria peça;
- mudanças de zero dos sistemas de medição de deslocamento;
- desajustes nos dispositivos de fixação das peças.

O tipo de aplicação baseia-se na localização de pontos de referência previamente dispostos no campo de trabalho da máquina, e que serão medidos pelo apalpador instalado no lugar da ferramenta. Tais pontos são estabelecidos por superfícies de referência como, por exemplo, de um cubo com suas faces paralelas aos planos coordenados. Uma adequada interpretação do

comportamento geométrico destes pontos permite avaliar efeitos que ocorrem no posicionamento da ferramenta relativamente à peça. A superfície de referência deve ocupar, portanto, uma posição representativa do efeito a observar. O armazenamento dos resultados das medições em diversos pontos é interessante por eliminar o tempo gasto nas sucessivas trocas entre ferramenta e apalpador.

Conta-se com as seguintes ações corretivas:

- alteração da origem da peça, levada a efeito temporariamente ou não;
- adequação de coordenadas programadas para usinagem.

Conforme as características do processo, realiza-se verificações a cada nova peça, entre lotes de peças, ou antes de operações específicas de usinagem.

A figura 2.6.a mostra a medição relativa a um ponto de referência para a direção do eixo coordenado  $y$ , admitindo que todos os pontos da peça estejam sujeitos ao mesmo comportamento, nesta direção. A origem da peça  $P$  é redefinida, de modo que, a exemplo, uma furação programada na altura  $ZPQ$  seja realizada corretamente.

Uma medição por dois pontos, visando detectar deformações lineares e verificar posições angulares, está esquematizada na figura 2.6.b. A origem  $P$  é corrigida para  $P'$  pela correção ponderada dos erros dos pontos  $Q1$  e  $Q2$  na direção  $z$ , devidos à inclinação do suporte. Ações desta natureza podem ser tomadas, por exemplo, quando da existência de diversas peças montadas em um mesmo suporte. Medições na direção  $y$  levam a compensar deformações lineares nesta direção. A figura 2.6.c mostra a detecção do erro angular da mesa coordenada, que pode ser corrigido por um giro programado ou pela adequação da origem do eixo de rotação  $b$ .

Os ensaios geométricos, propostos como aplicação do sistema de modo independente ao processo, baseiam-se em padrões materializados, podendo-se destacar:



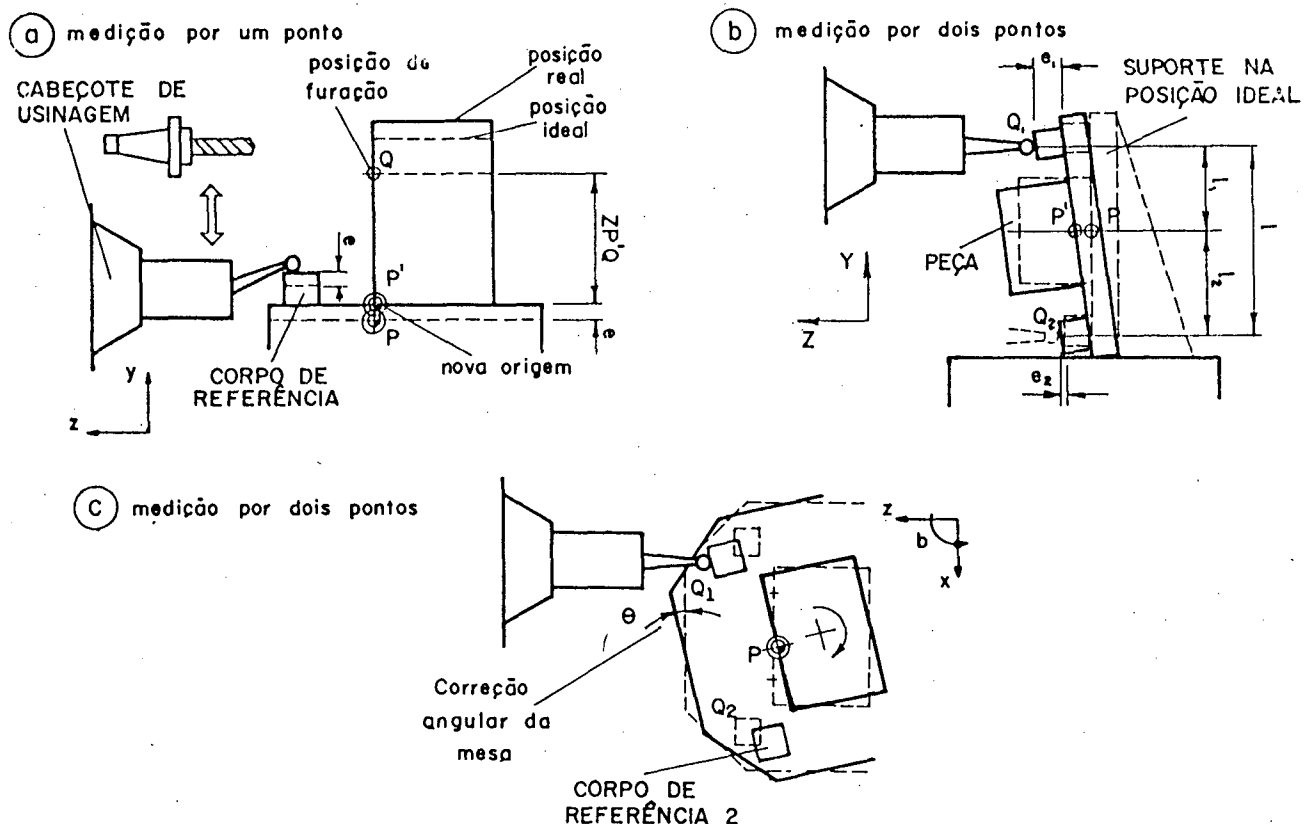


FIG. 2.6 : Verificações de erros da máquina ferramenta (centro de usinagem) com o SMCP

- posicionamento com coluna micrométrica (fig. 2.7.a);
- retitude e ortogonalidade, com régua e esquadros padrões (fig. 2.7.b);
- giro da placa porta-peça em tornos, com anéis ou pinos padrão;
- planicidade de trajetórias com desempenos ou régua (fig. 2.7.c).

Dispõe-se assim de uma autoverificação da máquina, com a grande vantagem da sistematização e automatização dos ensaios, processamento de dados e emissão de relatórios.

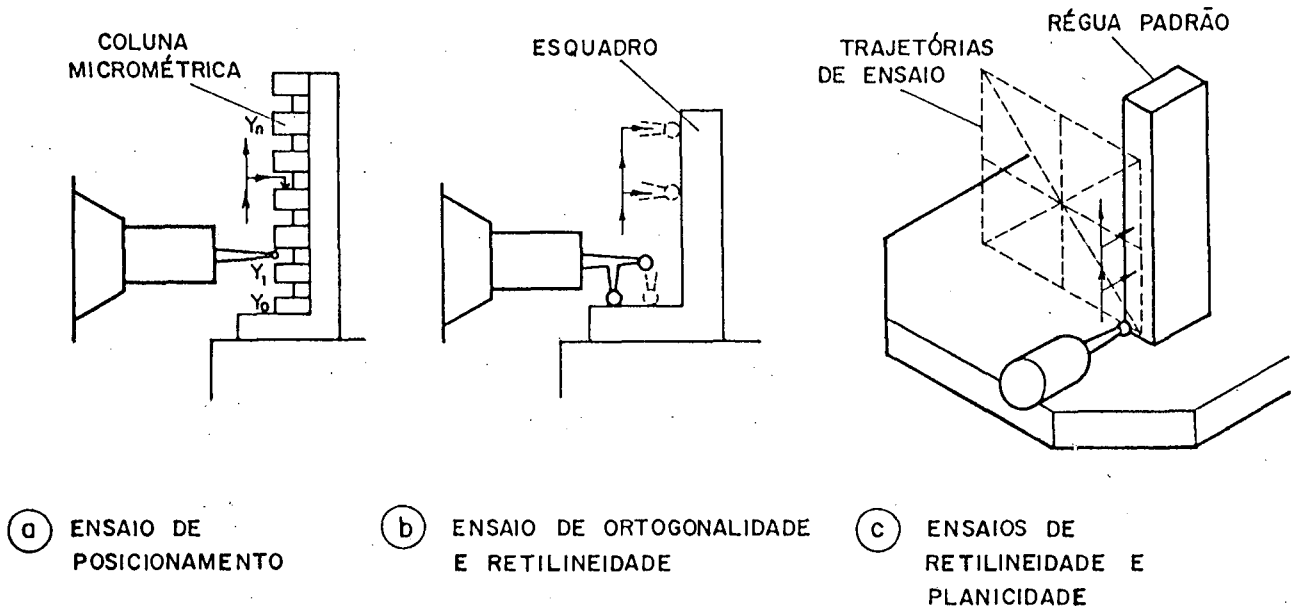


FIG. 2.7 : Ensaio geométricos da máquina ferramenta com o SMCP

### 2.3.3 Controle Dimensional de Peças

Objetiva-se o controle geométrico de peças geradas por usinagem na própria máquina ferramenta ou não. Abrange-se de modo mais específico os casos a seguir.

- a) Medições intermitentes ao processo, que possibilitam detectar danos de ferramentas e deformações em geral, que se refletem nas dimensões da peça. Este procedimento permite refugar peças de recuperação inviável que não devem continuar no fluxo de fabricação, corrigir erros de usinagem antes de retirar a peça da máquina, determinar o efetivo passe de acabamento, etc.
- b) Medições após o processo, pelas quais a máquina ferramenta desempenha o papel de uma estação de medição dentro do processo, permitindo uma qualificação da peça com base em tolerâncias pré-definidas para erros e dimensões;
- c) Medições fora do processo, quando a máquina ferramenta é utilizada como máquina de medir por coordenadas. O operador

controla os movimentos da máquina para a medição de diversos pontos, enquanto que o sistema processa as coordenadas e emite um protocolo com as características geométricas da peça.

As tolerâncias de fabricação em máquinas ferramentas CN atingem no seu limite inferior entre 10 a 15  $\mu\text{m}$  /19/, para as quais as medições com a máquina devem ser respondidas com mínimos erros. Dimensões obtidas por processos de precisão (retificação, alargamento, etc) atendem tolerâncias mais estreitas, da ordem de 6  $\mu\text{m}$  /25/.

Diferentes ações corretivas podem ser tomadas a partir dos resultados das medições intermitentes ao processo, como:

- repetir trechos de usinagem;
- executar subrotinas específicas que contém informações de correção;
- corrigir parâmetros de ferramentas e posição da origem da peça;
- corrigir valores programados.

A medição por pontos implica na sequência de posicionamento do sensor em um ponto remoto à superfície, aproximação contra a peça, medição propriamente, e afastamento do apalpador. Quanto ao elementos determinados na medição, podem ser:

- o erro da posição da superfície, obtido diretamente pela indicação do apalpador quando o sensor ocupa uma posição programada (medição diferencial); na figura 2.8, o erro da profundidade de uma cavidade é diretamente corrigido no parâmetro ZTF da ferramenta antes da usinagem final;
- coordenadas de pontos da peça, obtidas pela soma das coordenadas do centro do sensor, determinadas pelo SMCP, com o seu raio, em uma direção definida; a figura 2.9.a ilustra a determinação do diâmetro da peça a partir da coordenada de um ponto;
- elementos geométricos a partir de diversos pontos, calculados por funções específicas como distâncias, ângulos,

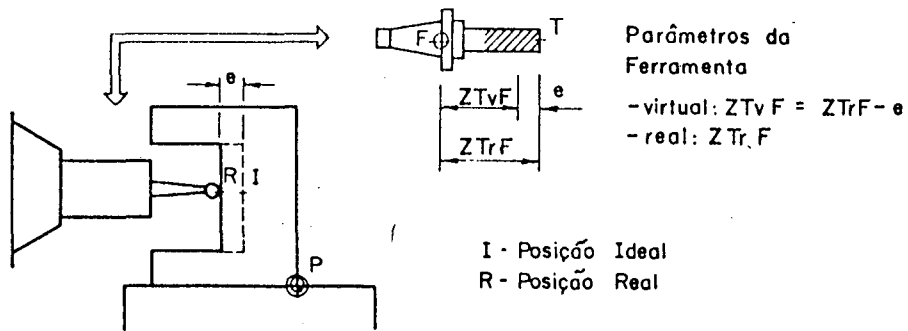


FIG. 2.8 : Medição do erro da posição de uma superfície e a correção pelo comprimento da ferramenta

circunferências, etc; a figura 2.9.b mostra a medição, com base em dois pontos, do ângulo do cone de uma peça, e na figura 2.10 uma tabela de funções propostas para o programa de processamento geométrico de um SMCP /12/.

As tareras de medição podem exigir diferentes formas de sensores que, eventualmente, são permutados entre etapas de medição. Para existir um correlacionamento entre estas etapas, ou entre elas e as operações de usinagem que se baseiam nos resultados das medições, os parâmetros de compensação do apalpador devem ser determinados pelo toque de superfícies de referência.

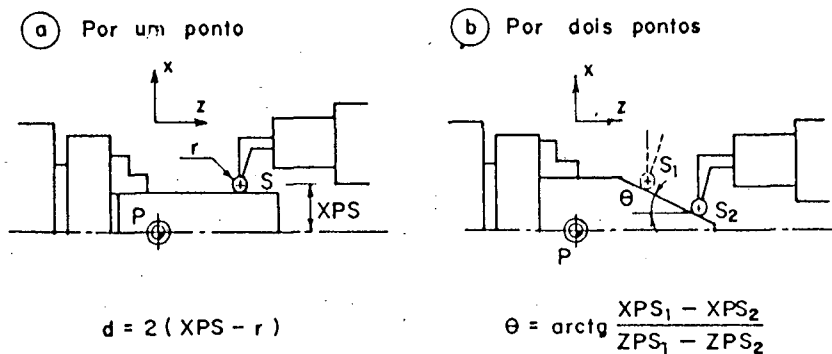
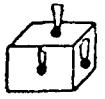

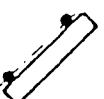
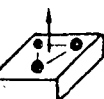

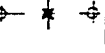
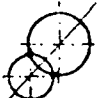
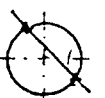

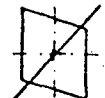



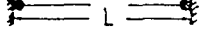
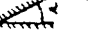
FIG. 2.9 : Medição de peças por coordenadas

Elementos Básicos				
Ponto (P)	Círculo (K)	Reta (G)	Plano (E)	Cilindro (Z)
				
$X_p \ Y_p \ Z_p$	$X_M \ Y_M \ (Z) \ \emptyset$	$W_x \ W_y \ (W_z)$ $X_G \ Y_G \ (Z_G)$	$W_x \ W_y \ W_z$ $X_E \ Y_E \ Z_E$	$W_x \ W_y \ W_z$ $X_M \ Y_M \ \emptyset$

Elementos Derivados					
P/P	K/K	K/G	G/G	G/E	E/E
					
Ponto Médio	Ponto de intersecção				Aresta

Relações entre Elementos					
Distância			Ângulo		
					
P-P	K-K	G-E	G-G	Z-Z	E-E
P-K	K-P	E-E	G-Z	Z-E	
P-G	K-G		G-E		
P-E					

$X, Y, Z$  - Coordenadas de Pontos

$W_x, W_y, W_z$  - Ângulos Diretores

FIG. 2.10 : Funções para determinação de elementos geométricos por coordenadas

#### 2.3.4 Localização e Ajuste da Peça para Usinagem

Objetiva-se localizar os elementos geométricos da peça em relação aos quais um programa, ou trecho dele, deve ser executado, alcançando-se uma simplificação do ajuste de peças brutas e uma maior precisão na usinagem.

Tem-se em vista determinar (fig. 2.11):

- a real posição da peça após a sua montagem, de modo a definir corretamente sua origem para a execução do programa de fabricação; erros de montagem podem atingir valores de

alguns milímetros;

- a posição de elementos de referência da peça, como furos, faces, cantos, etc, obtidos em máquinas diferentes ou em distintas condições de montagem, e em relação aos quais devem ser executadas operações de usinagem subsequentes.

Como ações viabilizadas pelo SMCP pode-se ter:

- a adequada definição ou correção da origem da peça;
- o ajuste manual ou programado da peça bruta;
- correção de parâmetros das ferramentas;
- alteração das coordenadas de um trecho de programa.

Observa-se que as duas primeiras ações visam simplificar a montagem de uma peça bruta sobre a máquina, e assumem um caráter mais permanente do que as seguintes.

Nestas aplicações são empregados os recursos da medição de peças (item 2.3.3), ou seja, a medição diferencial ou por

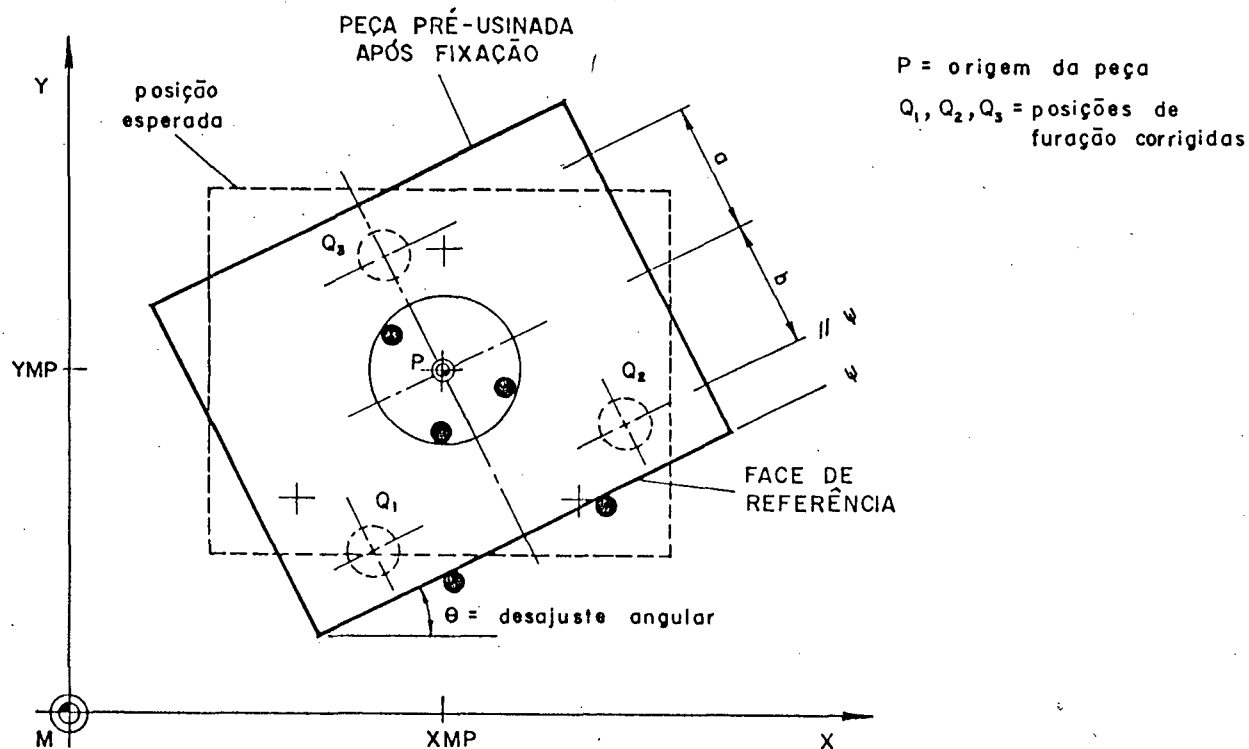


FIG. 2.11 : Localização de elementos de referência para usinagem

coordenadas. Neste segundo caso pode-se, por exemplo, determinar o centro de uma circunferência ou a intersecção de duas retas, e assim definir a origem do sistema coordenado da peça, como é ilustrado na figura 2.11. Ainda neste mesmo exemplo, uma série de furos deve ser realizada com posições bem definidas relativamente a uma das faces ( $\psi$ ) da peça. Para tanto, a orientação da face é determinada pela medição de dois pontos, e redefine-se as coordenadas programadas para furação. Procedimentos desta natureza permitem atender melhor a critérios de paralelismo, concentricidade, equidistância, alinhamento entre diversas partes da peça. Um ajuste programado da peça é viável, por exemplo, em mesas de centros de usinagem com movimentos de rotação controlados.

#### 2.3.5 Determinação de Sobremedidas para Programação da Usinagem

A espessura de material a ser usinada na peça, deixada por um processo anterior, pode ser determinada com os objetivos de:

- eliminar movimentos programados que sejam desnecessários;
- prevenir contra a usinagem de peças brutas defeituosas;
- evitar sobrecargas na usinagem de sobremedidas maiores do que aquelas esperadas;
- adequação das condições de corte.

As sobremedidas deixadas em peças podem ser muito inconstantes, dependendo de fatores ligados à repetibilidade do processo anterior, da estabilidade dimensional da peça, de imperfeições no material, etc. Em peças fundidas, por exemplo, são deixadas sobremedidas da ordem de 2 a 8 mm /25/, de modo que em um mesmo tipo de peça pode-se encontrar variações significativas.

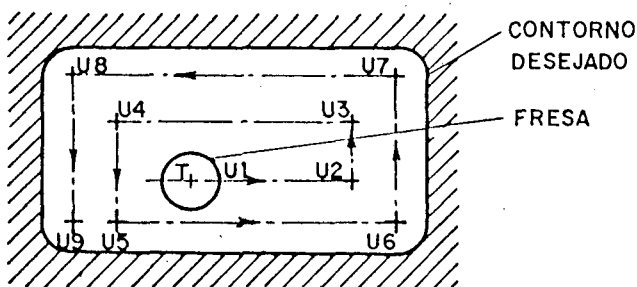
O procedimento compreende a medição de diversos pontos da peça de modo automático, fazendo-se a diferença entre dimensões/posições real e nominal corresponder à sobremedida

procurada. Para tanto, a peça deve já estar fixada e ajustada na máquina. Tratando-se de uma medição por pontos, pode tornar-se desinteressante a verificação de superfícies irregulares, pois grande é o tempo assim dispendido.

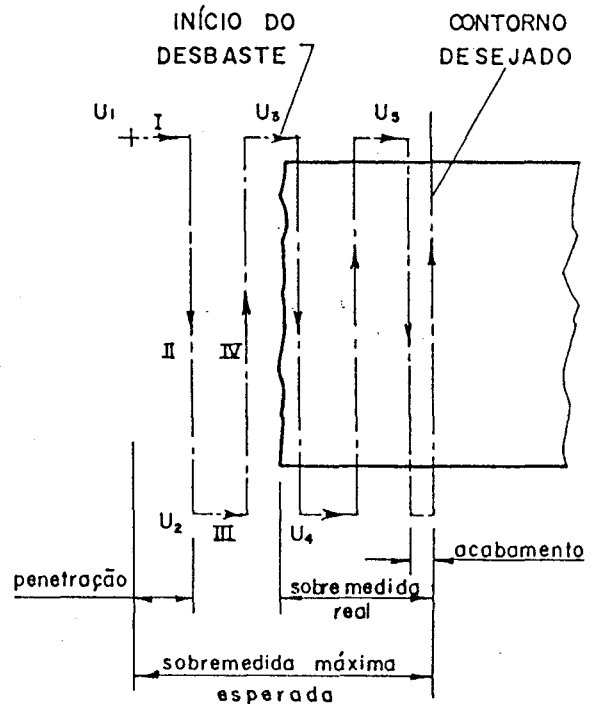
A figura 2.12 mostra alguns casos típicos de programação para desbaste. Os pontos  $U_i$  são posições para uma possível aproximação direta da ferramenta, pois correspondem ao início dos ciclos de desbaste. A escolha do ponto depende da sobremedida real determinada. A programação da usinagem pode ser realizada:

- sentença por sentença de todos os movimentos, como mostrado na figura 2.12.a; por um salto até a sentença de início da usinagem, os movimentos desnecessários ficam desconsiderados;
- por subrotinas (fig. 2.12.b e 2.12.c), devendo-se aqui

(a) Desbaste contínuo de uma cavidade



(b) Desbaste com usinagem no retorno



(c) Desbaste sem usinagem no retorno

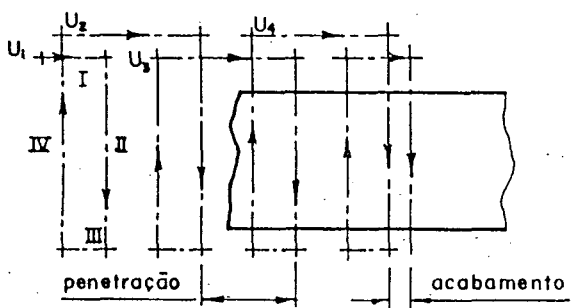


FIG. 2.12 : Modos de programação do desbaste de sobremedidas em peças



definir ou efetivar uma sentença para o posicionamento inicial da ferramenta e adequar o número de passagens da subrotina.

Alternativamente pode-se, em ambos os casos, redefinir os pontos  $U_i$  no sentido de se obter todos os passes com a mesma profundidade de penetração. A alteração das condições de usinagem visam a redução do tempo principal, atuando-se em especial sobre a velocidade de avanço. Para o critério da "área da secção do cavaco constante", tem-se velocidades inversamente proporcionais à espessura do passe. Sobremedidas de acabamento (conforme citado no item 2.3.2) podem também ser usinadas sob condições de usinagem corrigidas.

Os valores de sobremedida podem ainda ser controlados quanto a valores mínimo e máximo, indicando, respectivamente, defeitos superficiais e sobremedida excessiva ou desajuste da peça.

#### 2.3.6 Outras Aplicações

Uma outra aplicação do SMCP, especialmente em sistemas e células flexíveis de fabricação, é a identificação de tarefas específicas a serem executadas na peça que está na máquina. Assim, etapas opcionais de um programa podem ser executados ou não após a detecção de um indicador, na própria peça ou sobre o seu suporte. Como indicadores pode-se ter a existência ou não de um furo, de um ressalto, etc. Em um grau mais elevado de automatização, é possível a seleção do programa da peça a ser fornecido por um sistema DNC (Direct Numerical Control), após a medição de um bloco de identificação montado no palete de fixação da peça. A informação contida neste bloco está codificada na forma binária, definida por uma sequência de ressaltos.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS

Sob um enfoque técnico, o SMCP equivale a um sistema de medição e, para tanto, deve atender uma série de condições metrológicas e operacionais.

As principais características metrológicas são a seguir comentadas.

- Precisão do SMCP - Nas medições, o SMCP apresenta um erro que em parte assume caráter sistemático e em parte consta de variações de caráter aleatório, de modo que a máxima soma destas parcelas define o erro máximo do sistema, isto é, a sua precisão. A máquina ferramenta participa com significativa parcela devida aos erros geométricos que afetam a precisão do sistema coordenado de referência. Por outro lado, o apalpador possui também erros inerentes ao seu próprio sistema de medição, como erros de sensibilidade e linearidade, podendo haver ainda influências do eventual sistema de desacoplamento elétrico/mecânico do apalpador. Por ser o sistema de referência para as medições, o SMCP deve apresentar um erro máximo inferior a 1/10 a 1/5 da tolerância de fabricação. Assim, o controle de dimensões com tolerâncias de 20  $\mu\text{m}$  requerem um SMCP com uma incerteza de de  $\pm 2$  a  $\pm 4 \mu\text{m}$ .
- Resolução - Para coerência com a precisão mencionada, o SMCP deve ter uma resolução de pelo menos 1  $\mu\text{m}$ , que corresponde ao incremento digital usualmente encontrado nos CNC's.
- Estabilidade ao longo do tempo - Refere-se à repetibilidade com que as informações são obtidas por sucessivas medições sob as mesmas condições. Deseja-se um mínimo de variação da sensibilidade e de flutuação das posições relativas dos pontos de referência.

Entre as diversas características operacionais desejáveis, algumas estão a seguir enumeradas.

- Máxima faixa de operação, que é limitada pelo campo de trabalho da máquina ferramenta e pelas dimensões do apalpador.
- Força de medição, suficiente para um contato efetivo entre o sensor e a peça.
- Segurança do apalpador contra deflexão excessiva e contra colisões acidentais.
- Rapidez nas tarefas de medição, essencial à minimização do tempo no controle geométrico.
- Flexibilidade para ser aplicável em diferentes máquinas e comandos numéricos.
- Universalidade para a medição de quaisquer características e condições geométricas.
- Simplicidade de programação.

### 3. CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS

Os módulos de um SMCP que opera pelo método diferencial serão analisados quanto aos requisitos que devem atender, às fontes de erros, e às suas características metrológicas e operacionais. Dois modos de operação de um SMCP são propostos com vistas a atender diferentes graus de integração do controlador com o CNC. Ao final, resume-se algumas características especiais requeridas dos módulos, abrangendo-se ainda algumas configurações do controlador que conferem ao SMCP distintos níveis de automatização.

#### 3.1 MÁQUINA FERRAMENTA

A tecnologia de medição por coordenadas no processo tem se restringido a máquinas como tornos e centros de usinagem, cujas naturezas de operação permitiram ampla integração com o comando numérico. Para o desenvolvimento desta tecnologia, foi fator decisivo a compatibilidade dos controles (CN, CNC, CLP) com sistemas computacionais e suas interfaces.

A máquina ferramenta tem a função de realizar os movimentos coordenados do apalpador ou das ferramentas ao longo de posições desejadas.

O processo de usinagem está sujeito a um conjunto de fatores que resultam em erros geométricos de fabricação /26, 10/. Pode-se distinguir tais fatores como dependentes ou independentes da máquina ferramenta.

a) Fatores dependentes da máquina ferramenta:

- erros geométricos dos movimentos da máquina, devidos a erros da geometria dos componentes, da sua montagem do seu peso próprio e das folgas; surgem erros de retilineidade, ortogonalidade, paralelismo, etc;
- erros do sistema de posicionamento, envolvendo o sistema de

medição de deslocamento e o circuito regulador, com seus erros próprios e os de montagem;

- deformações térmicas diferenciais entre os componentes mecânicos;
- influências térmicas nos sistemas de medição de deslocamento;
- deformações da máquina devidas aos esforços de usinagem;
- vibrações devidas à usinagem, ao acionamento dos movimentos de deslocamento e rotação da peça/ferramenta.

b) Fatores independentes da máquina ferramenta:

- avarias e ajuste incorreto das ferramentas;
- erros do comando numérico, como a imprecisão de interpolação;
- erros de acoplamento da ferramenta;
- erros de fixação da peça;
- deformações dinâmicas da peça e da ferramenta, devidas ao esforço de corte;
- deformações térmicas da peça e da ferramenta;
- vibrações induzidas ou originadas no próprio processo, por corte descontínuo, excentricidade de elementos rotativos, etc;
- erros de operação.

Frente a uma série de erros que se refletem sobre a geometria da peça, pode-se constatar as seguintes vantagens pela utilização do SMCP /27/:

- as medições ocorrem com a peça livre dos esforços de usinagem;
- mediante estratégias adequadas, é possível identificar erros associados ao processo de usinagem, como deformações térmicas e desgaste da ferramenta;
- a precisão das medições pode ser incrementada pela compensação dos erros geométricos sistemáticos da máquina ferramenta, realizada pelo processador com base em resultados de ensaios específicos; esta compensação pode ser indispensável para atingir um nível satisfatório de precisão.

### 3.2 COMANDO NUMÉRICO

No contexto deste trabalho o comando numérico é um equipamento que recebe uma sequência de informações codificadas relativas a uma máquina ferramenta, e as executa automaticamente. Atualmente, estes equipamentos são baseados em microprocessadores, e constituem o grupo dos comandos numéricos computadorizados (CNC) que apresentam uma série de recursos com vistas, em especial, ao conforto operacional. Além do controle do programa, o CN é parte integrante do sistema regulador do posicionamento na máquina ferramenta.

A execução de instruções pelo comando numérico resulta em sinais codificados a serem transferidos para a máquina ferramenta. Um controlador lógico programável (CLP), através de unidades de entrada e saída de sinais, interpreta tais informações, efetivando-as e supervisionando a sua execução. É necessária a existência deste controlador lógico, de modo que um mesmo tipo de CNC possa equipar diferentes máquinas, cada qual com condições específicas de operação. A tecnologia do comando numérico e dos CLP's tem atingido crescentes níveis de flexibilidade, de recursos de programação e compactação física /28/.

Quanto à preparação dos programas para o CNC, dispõe-se basicamente de três alternativas, correspondentes cada qual a um estágio de informatização da empresa:

- pelo painel do comando, para o que os CNCs vêm oferecendo facilidades como a operação por subrotinas, ciclos fixos de usinagem, programação orientada, simulação gráfica, etc;
- por estações de programação, baseadas em microcomputadores, e que contam, além dos recursos mencionados acima, de diversos periféricos como impressora, plotadora, etc; a transmissão dos programas ao CNC pode ser via DNC;
- por sistemas CAM, que operam com linguagens de alto nível como APT, EXAPT, para programação automática; a transmissão de programas também pode ser via DNC.

Entre os modos com que o CNC controla os movimentos da máquina, dois deles têm importância para o SMCP:

- controle por eixos - quando os movimentos ocorrem apenas segundo os eixos coordenados, isoladamente; é o modo mais simples de operação das máquinas ferramentas;
- controle contínuo - quando existe uma relação funcional entre os movimentos de cada eixo, resultando então em interpolações dos tipos linear e circular; com este controle é possível atender às diversas direções de aproximação entre o apalpador e os objetos.

### 3.3 APALPADOR MEDIDOR

O apalpador é composto de duas partes básicas: o conjunto eletromecânico e o sensor. Na figura 3.1 estão ilustrados alguns tipos de apalpadores medidores e diversos sensores intercambiáveis, empregados em máquinas de medir por coordenadas.

O sistema mecânico que permite o movimento do sensor opera normalmente por flexão de molas, o que minimiza os problemas de atrito, desgaste e folgas. Os transdutores para medição do deslocamento mais utilizados são aqueles de princípio eletro-indutivo, pela sua simplicidade construtiva e de tratamento do sinal. A posição que o sensor ocupa para uma indicação nula do sistema de medição do apalpador corresponde ao ponto de referência para a medição da deflexão (ponto A, da fig. 2.3).

A transferência dos sinais do apalpador para a unidade de tratamento ou para o controlador pode se dar:

- por um desacoplamento sem fios, como por exemplo, a transmissão por sinais de rádio /16/; aplica-se especialmente para apalpadores dispostos em magazines de ferramentas;
- diretamente por fios /15/, quando o apalpador é fixo para

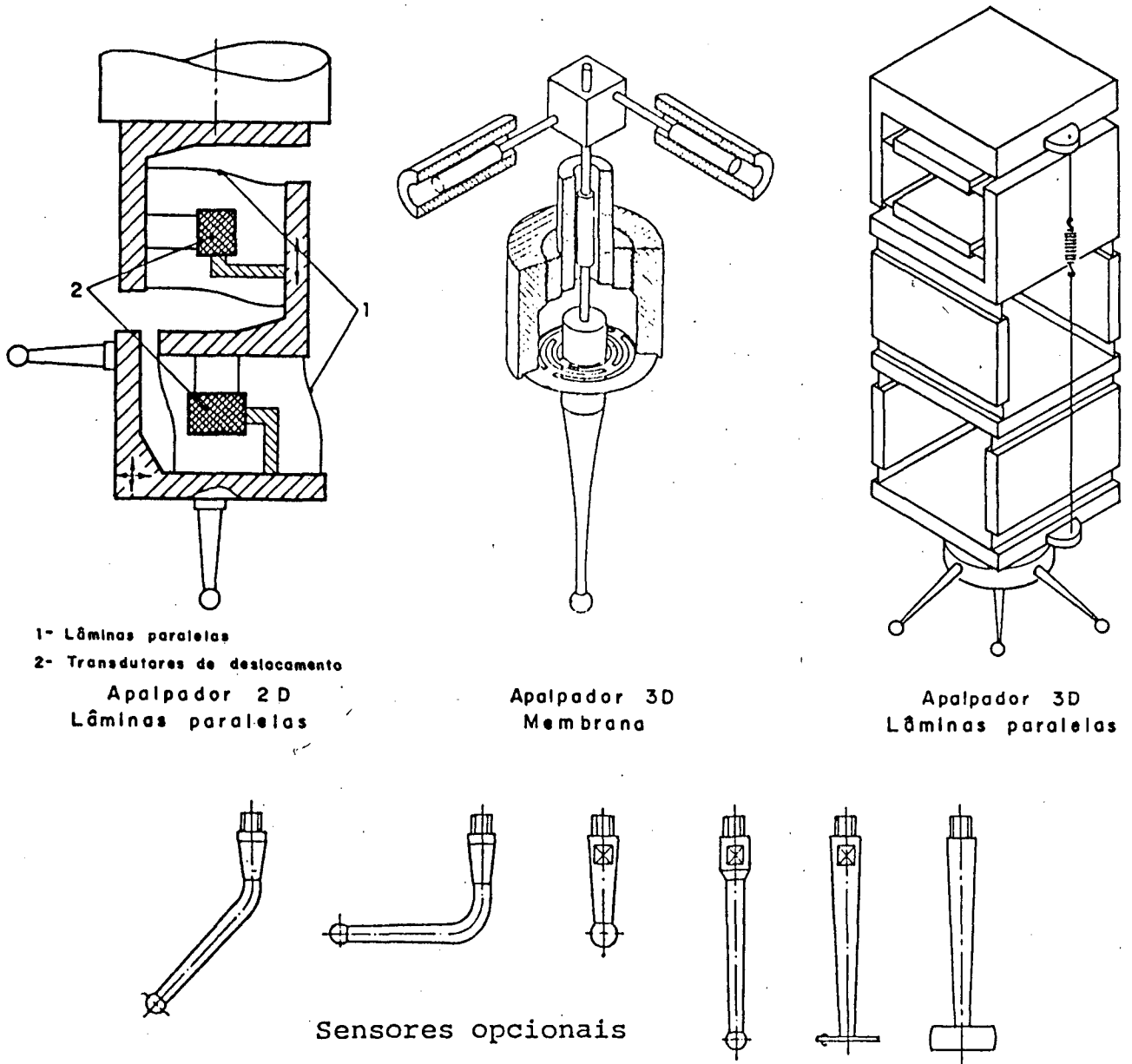


FIG. 3.1 : Configurações mecânicas de apalpadores do tipo medidor e sensores opcionais

medição de ferramentas, ou quando ele é instalado por um mecanismo específico (braço/ posicionador, por exemplo) que o mantém alojado fora do campo de trabalho durante as etapas de usinagem.

Os apalpadores podem ser configurados para medir em diferentes números de direções, estando associado a cada direção um sistema de medição de deslocamento (fig. 3.1):



- unidirecional (1D);
- bidirecional (2D), duas direções ortogonais;
- tridirecional (3D), três direções ortogonais.

Dispositivos especiais podem vir a compor o apalpador no sentido de habilitar o movimento apenas em direções específicas, bloqueando-se as demais. Objetiva-se aumentar a rigidez do conjunto mecânico e impedir um deslizamento do sensor sobre a superfície do objeto. Em função do princípio mecânico do apalpador ou da existência deste bloqueio, a direção do movimento do sensor após o contato com o objeto pode ser /29/:

- indefinida, isto é, não pode ser previamente conhecida; este comportamento, entretanto, é próprio dos sistemas mecânicos de alguns apalpadores ligados;
- definida, quando houver atuação de bloqueios;
- na direção normal à superfície.

Observa-se que um apalpador equipado com o sistema de bloqueio pode vir a operar segundo direções desejadas, como se fosse um apalpador 1D ou 2D.

Os principais erros com que o apalpador pode vir a interferir na precisão das medições são:

- instabilidade do ponto de referência, que possui caráter aleatório entre sucessivas medições; variações de temperatura influem significativamente sobre os sistemas mecânico e de medição do deslocamento;
- erros de linearidade, próprios do sistema eletromecânico;
- flutuações da sensibilidade do sistema de medição, em especial causadas por oscilações de temperatura;
- histerese;
- flexão da haste do sensor, variável para cada direção da deflexão e cada tipo de sensor;
- achatamento do sensor na região de contato;
- interferência entre as direções ortogonais de medição da deflexão.

As características metrológicas mais relevantes de um apalpador são comentadas a seguir:

- Faixa de operação - é o campo de medição do apalpador dentro do curso mecânico do sensor, limitado pela deflexão que resulta em erros abaixo de um valor admissível (fig. 3.2). São usuais faixas de  $\pm 0,5$  a  $\pm 2$ mm /18/.
- Resolução - está vinculada à resolução do tratamento de sinal ou da unidade de indicação do apalpador, que deve ser compatível com os demais módulos do SMCP. Dispõe-se normalmente de uma resolução de  $1 \mu\text{m}$  /15, 16/.
- Precisão - a relação entre a deflexão real do sensor e o valor indicado pelo sistema de medição é determinada por uma calibração do apalpador. Os erros de natureza sistemática remanescentes, como o erro de linearidade e a histerese,

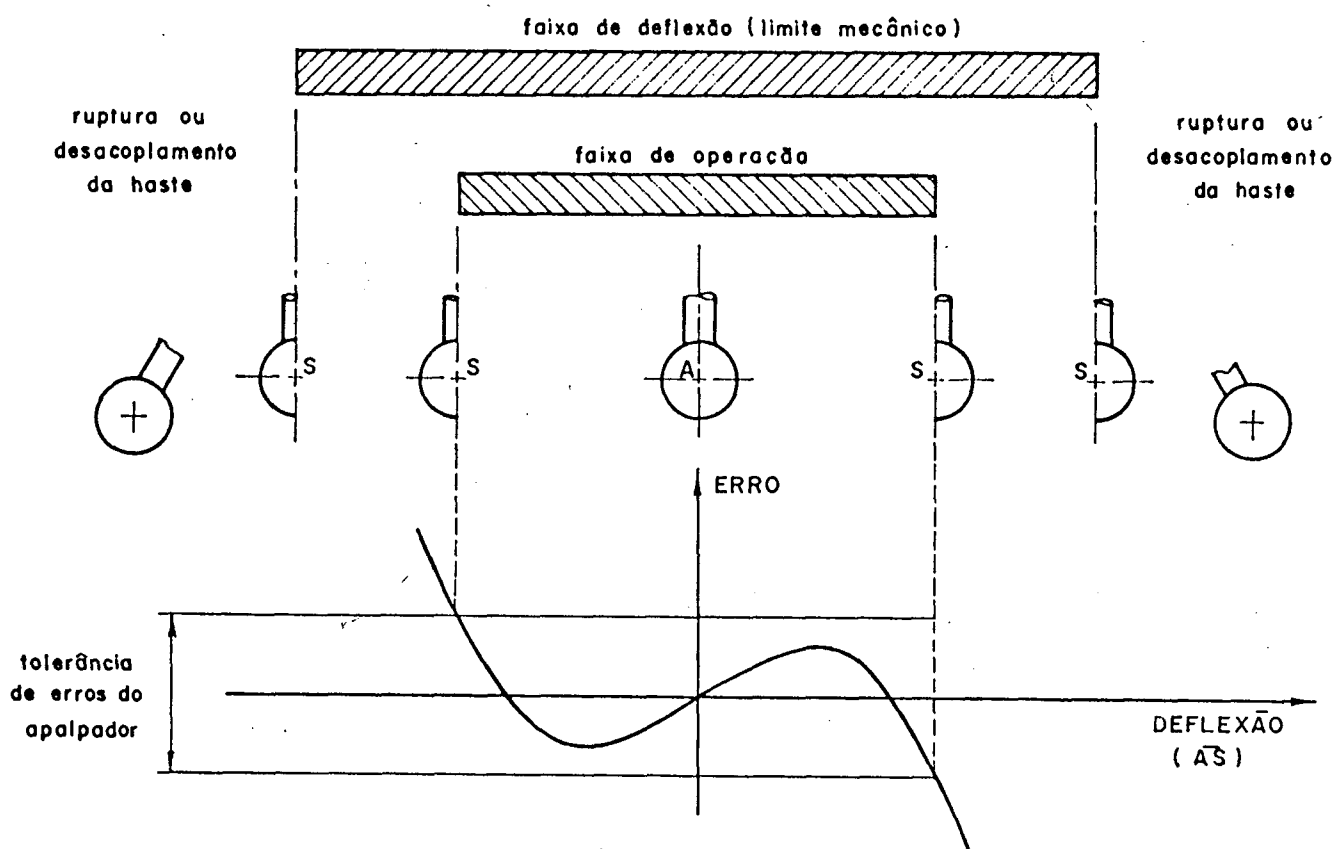


FIG. 3.2 : Faixas de operação e de deflexão dos apalpadores medidores

somam-se aos correspondentes erros de caráter aleatório, resultando no erro total do apalpador. Em apalpadores comerciais encontram-se especificações de erros sistemáticos na ordem de 1% da faixa de operação e dispersão de medição (repetibilidade) de  $\pm 1$  a  $\pm 2 \mu\text{m}$  /66/.

- Resposta dinâmica - refere-se ao comportamento do apalpador ao medir deflexões variáveis com o tempo. São de importância a máxima velocidade admissível de variação da deflexão e o tempo acomodação da indicação. Respectivamente, estes fatores limitam a velocidade de aproximação entre o sensor e o objeto, e estabelecem o atraso de tempo necessário entre a imobilidade da máquina e a leitura da deflexão.

O apalpador deve atender também a características operacionais, das quais destacam-se:

- força de medição - é necessária para um eficiente contato entre o sensor e o objeto; apalpadores comerciais operam na faixa de 0,1 a 1 N /18/;
- velocidade de medição - é limitada em um mínimo pela viabilidade do dispêndio de tempo no controle geométrico; superiormente, ela depende de fatores como a faixa de operação do apalpador, a sua resposta dinâmica, e o tempo necessário para ser atingida a imobilidade dos movimentos entre o apalpador e o objeto.
- faixa de deflexão - disponível para segurança do apalpador contra erros de programação, de operação, falhas, etc, (fig. 3.2); adicionalmente pode-se prever acessórios para proteção, como a existência de um segmento frágil na haste ou um sistema para seu desacoplamento mecânico.

De modo oportuno define-se a sobredeflexão como a deflexão que ocorre após ser atingido um valor de referência, que causa a atuação da parada do avanço da máquina. Ela depende da velocidade de medição e da resposta do controlador/CNC para atuar a parada do avanço.

### 3.4 CONTROLADOR

A definição da configuração de um SMCP tem sua maior dificuldade na otimização do uso dos recursos disponíveis na máquina ferramenta CN, uma vez que é grande a sua diversidade e constante o desenvolvimento que sofrem. Sendo o controlador o elemento que interliga os diversos módulos do SMCP, apenas uma análise técnica destes recursos e da potencialidade desejada, ponderada por fatores econômicos, permite estabelecer os requisitos necessários. Neste item são expostas inicialmente as características gerais a serem consideradas nesta análise, e, em seguida, propostos modos de operação e configurações que atendem a muitas funções desejadas do SMCP, e que são exequíveis com os recursos usuais das máquinas ferramentas CN.

#### 3.4.1 Características Gerais

Ao controlador do SMCP cabe executar e controlar as funções de comunicação, supervisão e aquisição de sinais, processamento de informações, e realimentação dos resultados ao processo (fig. 2.1).

Seus elementos básicos são:

- processador de dados, que propriamente assume o controle central do módulo e o processamento matemático e lógico de informações;
- interface modular de aquisição e controle (IMAC), que consiste de um conjunto de circuitos eletro-eletrônicos configurados de forma modular com o papel de interfacear o processador com os demais módulos;
- meios de comunicação com o operador, como unidades de teclado, de vídeo, mostrador alfa-numérico, etc.

Em um enfoque mais amplo, o controlador deve exercer /1, 11/:

- interpretação dos comandos de medição, codificados por teclas ou por instruções de uma linguagem;
- processamento de informações, como:
  - matemático - operações algébricas, trigonométricas, etc;
  - lógico - testes condicionais, saltos no programa de fabricação, subrotinas, etc;
  - geométrico - macrofunções para a determinação de circunferência, distância, etc;
- aquisição e controle de sinais como a deflexão, as coordenadas, os sinais relativos a funções do CN;
- realimentação sobre as condições do processo, a partir dos resultados obtidos nas medições, como correção de parâmetros de ferramentas, alteração da origem da peça, etc;
- correção de erros geométricos da máquina ferramenta, aplicada sobre as coordenadas obtidas das medições; para tanto, os erros devem estar convenientemente armazenados no processador.

A IMAC deve contar com unidades de:

- entrada e saída de sinais, para a transferência de sinais de estado, como sinalizadores, chaves fim de curso, atuação de controles, etc;
- chaveamento, para o controle de funções relativas ao CNC, como a simulação de teclas e chaves, e para a aquisição dos sinais analógicos do apalpador;
- conversão analógica - digital (A/D), para a leitura da deflexão de um apalpador com sinais analógicos;
- interfaces digitais para a transferência de informações codificadas, tais como:
  - coordenadas atuais da máquina ferramenta;
  - programas para o CNC, através de entradas paralela ou serial;
  - dados de correção que possam eventualmente ser transferidos ao CNC por uma entrada externa de dados;

- instruções do CNC ao controlador;
- circuitos eletrônicos específicos como:
  - adaptadores de níveis de tensão elétrica;
  - comparadores de tensão elétrica, aplicados em especial na proteção de um apalpador (transdutores de sinal analógico) contra deflexões excessivas.

#### 3.4.2 Modos de Execução dos Programas de Fabricação

De modo a capacitar o SMCP para operação automática e integrada ao processo de fabricação, é necessário que se estabeleça uma sequência lógica entre os comandos de medição executados efetivados pelo CNC, e os comandos de medição, executados pelo controlador. O programa assim constituído, denominado de programa de fabricação, é levado a efeito pelo sistema, que pode operar segundo um dos modos a seguir descritos.

a) O programa de fabricação é executado a partir da memória do CNC (fig. 3.3). Neste modo, os comandos de medição devem estar codificados por funções de programação livres do comando numérico /16/ (funções especiais do tipo miscelânea M são normalmente disponíveis nos CNC's). Para tanto, o CNC deve permitir ao controlador identificar estas funções pelo acesso a saídas próprias (binária, BCD).

A vantagem deste modo de operação reside na possibilidade de programar comandos de medição na própria linguagem do CNC e, portanto, diretamente pelo painel da máquina. Por outro lado, tem-se a desvantagem do tempo que pode vir a ser dispendido na transmissão pelo CNC e na interpretação pelo microcomputador.

b) O programa de fabricação reside na memória do processador (fig. 3.4). Neste modo de operação, o CNC deve dispor de uma entrada de programas, como as usuais entradas para leitora de fitas e do tipo serial, devendo o controlador ser equipado com a correspondente interface de comunicação /1, 30/. Nas etapas

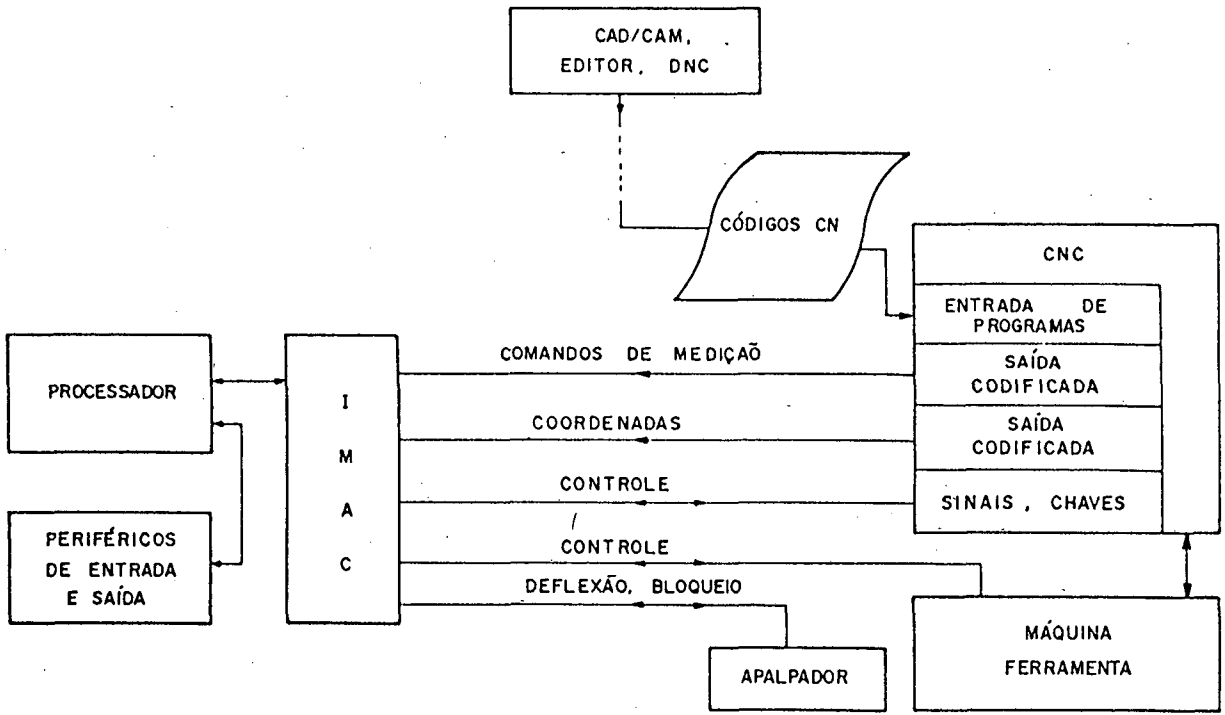


FIG. 3.3 : Execução dos programas de fabricação a partir da memória do CNC

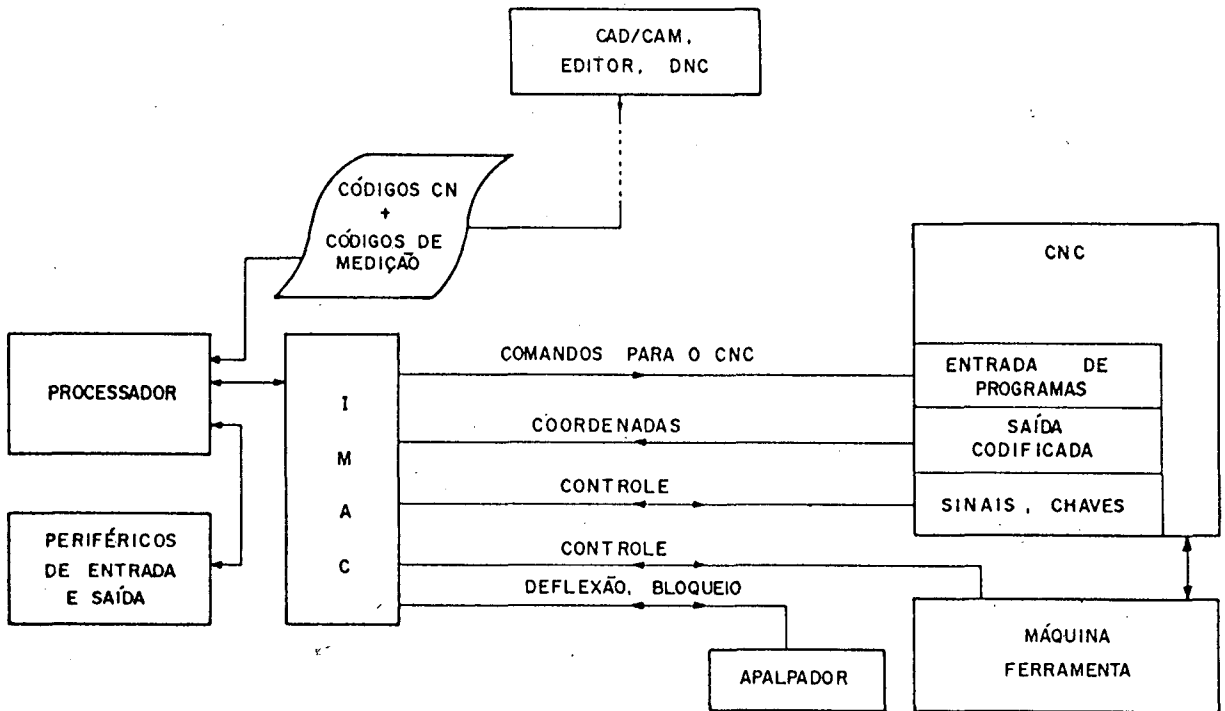


FIG. 3.4 : Execução dos programas de fabricação a partir do processador

de usinagem, os blocos de programa podem ser transferidos à memória do comando numérico, e a partir dela, efetivadas. Nas etapas de medição, o processador transfere os comandos da máquina, como aqueles de posicionamento, e identifica os comandos de medição a executar.

As principais vantagens são:

- grande flexibilidade de codificação dos comandos de medição, pela possibilidade em criar-se uma linguagem própria;
- a capacidade de memória do processador pode ser facilmente ampliada;
- o programa de fabricação está disponível ao processador para correções em função dos resultados das medições.

Como desvantagens menciona-se:

- o tempo dispendido na transmissão dos comandos ao CNC;
- a possível subutilização da memória do CNC.
- o mais alto custo do controlador.

Em ambos os modos expostos, existe a compatibilidade de codificação dos comandos de medição com a programação automática de alto nível para comando numérico, como EXAPT, APT, e outras, bem como é possível o tratamento por pós-processadores e a transmissão por DNC.

A correção de parâmetros de ferramentas e a alteração de origem da peça, de maneira automática, depende dos recursos que o CNC apresente para tanto, sendo possível, em alguns casos, a transferência de valores pela própria entrada de programas.

Com vistas a atender à medição por comando manual, o processador pode identificar os comandos através de instruções introduzidas por um teclado /30/. Assim, funções para a determinação de elementos geométricos são selecionadas pelo operador, dispensando a interpretação a partir de um programa como nos modos acima expostos.



### 3.5 INTEGRAÇÃO DOS MÓDULOS DO SMCP

#### 3.5.1 Características Adicionais

Tanto para a implantação de um SMCP como para o desempenho das suas funções junto ao processo, os módulos de um sistema devem atender a algumas características especiais. Da máquina ferramenta deve-se procurar dispor de recursos como:

- intercambiabilidade entre apalpador e ferramenta no instante de medição, seja pela ocupação de uma posição do magazine ou da torre porta-ferramentas, seja por um mecanismo específico para posicionar o apalpador;
- estabilidade, entre sucessivas trocas e ao longo do tempo, da posição do apalpador após seu posicionamento para medição;
- eventual necessidade de desacoplamento dos sinais do apalpador e de soluções específicas a condições particulares de troca de ferramentas, do comportamento da árvore, etc;
- meios para a limpeza da superfície a medir, como jatos de ar comprimido.

Com base nos modos de execução do programa de fabricação, propostos no item 3.4.2, requer-se, por sua vez, do CNC:

- acesso às coordenadas da máquina no instante das medições; alguns CNC's mais modernos, com vistas propriamente à medição junto ao processo, já oferecem este recurso /31/;
- sincronismo com o processador na execução do programa de fabricação, traduzido pelos meios alternativos de:
  - uma entrada de programas, como do tipo serial ou para leitora de fitas, quando aquele programa está armazenado no processador (modo de operação b, conforme item 3.2);
  - uma saída de funções programáveis no CNC, que serão interpretadas pelo processador como comandos de medição (modo de operação a, conforme item 3.2);
- acesso a registros armazenadores dos parâmetros de ferramentas e da alteração de origem da peça; alguns CNC's dispõem de uma

entrada digital codificada, para correções adicionais consideradas sobre os valores destes parâmetros;

- interrupção do movimento de avanço da máquina após serem ativadas condições de emergência do sistema, devidas à deflexão ter atingido valores pré-estabelecidos;
- controle de funções ligadas à máquina e à segurança de operação como: evitar trocas de ferramentas e giro da árvore principal durante as medições, controle sobre a velocidade de avanço, etc;

O apalpador deve também atender a características operacionais adicionais, como:

- adequado meio de transmissão dos sinais e da atuação de bloqueio (quando houver);
- massa do apalpador, que deve ser compatível com as recomendações da massa máxima das ferramentas; os apalpadores são encontrados com massa em torno de apenas 600 g /15/, devendo ser ponderada a existência ainda de acessórios ou mecanismos adicionais;
- dimensões externas, que devem ser consideradas na utilização do magazine de ferramentas e na maximização da faixa de operação do SMCP;
- resistência mecânica e ao meio de usinagem, pois o apalpador pode ser submetido a fortes acelerações na sua instalação e deve suportar a presença de cavacos, óleo de corte, calor, principalmente quando utilizados em medições de ferramentas.

As características de maior relevância, desejadas do módulo controlador, são:

- velocidade de resposta na detecção de deflexões excessivas e na atuação do controle de parada do avanço da máquina;
- velocidade de aquisição das coordenadas, da deflexão, dos sinais de controle, e de transmissão de programas ao CNC, fatores estes que impõem limitações sobre a velocidade operacional do controlador;

- precisão, que pode ser afetada principalmente por efeitos do chaveamento e erros do conversor A/D na leitura dos sinais analógicos do apalpador;
- segurança, traduzida pela confiabilidade dos seus elementos e da montagem, bem como pela qualidade do software do processador.

O módulo controlador, sendo o elemento de integração dos módulos, é analisado a seguir, considerando-se diferentes configurações conforme o nível de automatização.

### 3.5.2 Configurações Propostas

Tecnicamente, o nível de automatização e flexibilidade de um SMCP depende, além dos recursos do CNC, do potencial do processador para desempenhar as suas diversas funções. A fim de atender diferentes níveis, propõe-se a seguir algumas configurações possíveis, diferenciadas pelo tipo do processador.

a) Microcomputador dedicado - um microcomputador é elaborado com os componentes (unidades lógica e matemática, memórias, portas de entrada e saída, circuitos especiais, etc) e programação básicos para desempenhar um conjunto limitado e pré-definido tarefas. Esta configuração pode ser empregada em sistemas que visem tarefas mais simples e menos diversificadas, como a medição de erros de parâmetros de ferramentas e erros de dimensões de peças /16/. Suas principais limitações são:

- pequena capacidade de processamento matemático;
- dificuldade de programação, especialmente por utilizar linguagens de baixo nível;
- estreita capacidade de ampliação;
- comunicação com o operador restrita a mostradores alfanuméricos.

Como principal vantagem desta alternativa tem-se o seu baixo custo e a maior simplicidade de operação.

A configuração do SMCP mais conveniente para operar com um

microcomputador dedicado corresponde àquela que executa o programa de fabricação a partir da memória do CNC, modo descrito no item 3.3.2 (fig. 3.3). Ainda pelas limitações acima apresentadas, este sistema não tem capacidade para atender ao cálculo de elementos geométricos por coordenadas. À custo de uma perda do seu potencial, o sistema pode ser simplificado pela eliminação da aquisição automática das coordenadas da máquina, servindo-se assim, principalmente, da medição diferencial.

b) Microcomputador programável - baseada em microcomputadores de uso geral, esta configuração destina-se aplicações mais diversificadas e complexas, podendo contar com o processamento geométrico por coordenadas /11/. Suas principais vantagens são:

- amplos recursos e facilidades de programação, incluindo linguagens de alto nível (PASCAL, FORTRAN, etc);
- diversidade de opções, em termos de capacidade de memória e recursos operacionais (portas de entrada e saída, interrupção, etc);
- facilidade de ampliação da memória de massa, através de discos flexíveis, fitas magnéticas, etc;
- flexibilidade na implantação de novos desenvolvimentos de "software";
- possibilidade de integrar-se a sistemas de computação (centrais, distribuídos, etc);
- dispõe-se de grande variedade de periféricos, e com pronta compatibilidade de comunicação.

Como desvantagem, tem-se o mais alto custo a que podem chegar tais sistemas, no que concerne tanto aos equipamentos e, especialmente, à programação.

Esta alternativa leva a uma otimização dos recursos de um SMCP pela operação segundo o modo "b" apresentado no item 3.4.2 (fig. 3.4). Nesta configuração, estando o programa de fabricação armazenado no microcomputador, com facilidade é possível obter e corrigir informações de interesse.

c) Microcomputador programável associado a outro dedicado. Nesta configuração, a IMAC é uma unidade inteligente de aquisição e controle de sinais apenas supervisionada pelo microcomputador. Operações como a transmissão de sentenças ao CNC, a aquisição e o controle da deflexão, a aquisição das coordenadas, a supervisão de sinais de segurança do SMCP, podem passar integralmente a esta unidade. O microcomputador programável assume, então, as funções exclusivas de processamento.

Nesta configuração, às vantagens das demais alternativas, somam-se:

- maior velocidade do microcomputador em executar as funções relativas à IMAC;
- maior grau de modularidade, especialmente pela independência entre o microcomputador e os módulos da IMAC.

Lembra-se aqui por fim, do atual desenvolvimento tecnológico dos CNC's, que os capacitam a assumir também as funções do controlador. A tendência de configurar comandos com multiprocessamento permitirá uma expansão modular, em "hardware" e "software", do seu potencial para a medição no processo /11, 27/.

## 4. ESTRATÉGIAS DE MEDIÇÃO

Neste capítulo expõe-se, inicialmente, o resultado do estudo das condições geométricas da medição por coordenadas pelo método diferencial, com o que identificam-se algumas limitações da técnica. No sentido de permitir uma melhor visualização dos diversos casos apresentados, alguns conceitos serão introduzidos. Uma abordagem sobre a determinação de elementos geométricos é enfocada de modo sucinto, com vistas a apenas esclarecer alguns princípios de cálculo, deixando em aberto o estudo específico dos vários problemas que podem ser resolvidos pela tecnologia da medição por coordenadas. Com o intuito de indicar um modo para atingir a precisão desejada de um SMCP, é proposta a compensação de erros geométricos da máquina ferramenta, apresentando-se algumas sistemáticas com vistas à sua implementação no processador.

### 4.1 DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS

#### 4.1.1 Conceitos

A apresentação dos conceitos a seguir visa facilitar o entendimento dos tópicos seguintes. Pela figura 2.2 foi introduzida parte da nomenclatura a ser utilizada, complementada agora pela figura 4.1.

As análises consideram condições ideais de forma e acabamento superficial. Os conceitos apresentados são válidos tanto para a medição de peças como de ferramentas, que, conjuntamente, são tratadas por "objetos". Entende-se que na medição de peças, o apalpador se desloca relativamente à elas, sendo portanto, programado o ponto A para os movimentos de medição (fig. 4.1.a) e, respectivamente na medição de



da peça, etc). Em ferramentas, o ponto ideal corresponde à posição que deve ocupar um ponto da aresta de corte relativamente ao ponto coordenado da máquina.

- Superfície ideal: é geometricamente definida como o conjunto de pontos ideais de uma mesma superfície; no caso de ferramentas trata-se da aresta de corte ideal.
- Ponto real (R): é um ponto do objeto pertencente à sua fronteira. Neste trabalho, é tratado como o ponto de contato do objeto com o sensor do apalpador, supondo-se condições geométricas ideais.
- Superfície real: é o conjunto de pontos reais do objeto, que o limita; em ferramentas, trata-se da aresta de corte real.
- Posição angular da superfície: é a orientação do plano tangente por um dado ponto. De modo prático, ela é definida pela orientação do vetor normal  $\bar{n}$  deste plano.
- Erro da posição de um ponto: é a posição, relativamente ao ponto ideal, que ocupa a sua projeção sobre a superfície real, segundo a normal à superfície ideal. Pode-se em alguns casos projetá-lo segundo um dos eixos coordenados, referindo-se então ao erro da posição na direção deste eixo.
- Erro limite ( $\mathcal{E}$ ): é o erro máximo da posição de um ponto, para além e aquém do ponto ideal, esperado em função das diversas fontes de erro na usinagem, na montagem da peça ou da ferramenta, etc.
- Posição remota ( $\overline{PW}$ ): é a posição programada antes de iniciar o movimento de aproximação de medição.
- Posição nominal ( $\overline{PN}$ ): é a posição efetivamente programada para o posicionamento de medição.
- Orientação de aproximação: é a orientação com que o apalpador avança contra a peça, ou a ferramenta contra o apalpador. Na medição por comando automático, ela é definida entre os pontos remoto e nominal, correspondendo aos ângulos diretores da trajetória WN.
- Sobredeslocamento (p): na medição de peças, corresponde ao



deslocamento do ponto de referência do apalpador, programado para além do ponto ideal, segundo a orientação de aproximação. É previsto para favorecer o contato do sensor com a peça quando o ponto real está além da posição ideal. De modo correspondente, na medição de ferramentas, é o deslocamento do ponto da aresta de corte, programado além do ponto de referência do apalpador, segundo a orientação de aproximação. A figura 4.2 destaca a importância da consideração do sobredeslocamento na aproximação de medição.

- Erro de uma dimensão (linear, angular): é a diferença entre a dimensão real, ou aquela obtida por uma medição, e a dimensão ideal desejada.

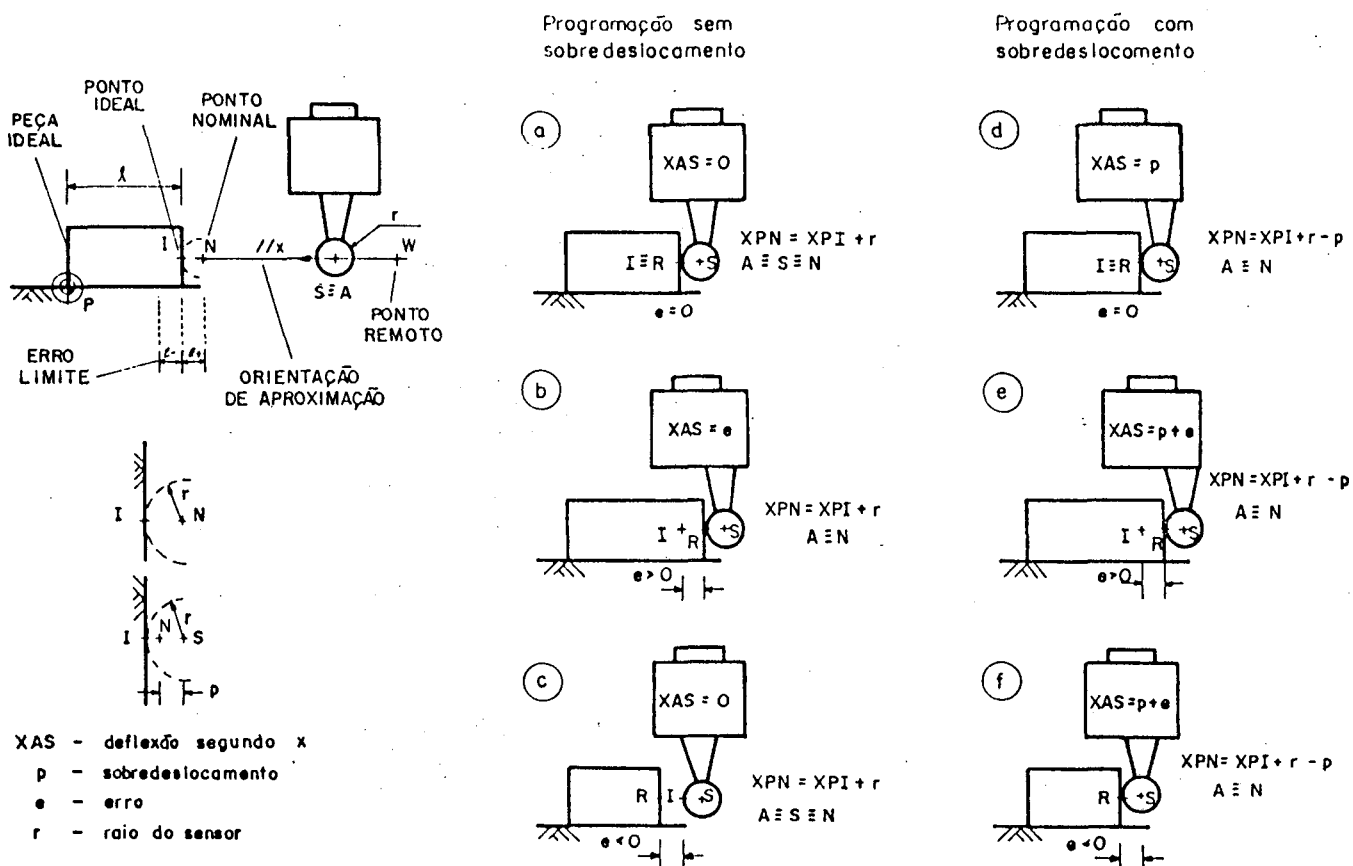


FIG. 4.2 : Importância do sobredeslocamento na programação dos movimentos de aproximação

#### 4.1.2 Condições Operacionais e Geométricas na Medição com um Apalpador Medidor

O procedimento de medição com apalpadores medidores é condicionado pela:

- capacidade da máquina ferramenta quanto ao movimento de aproximação em relação à superfície a ser tocada, podendo a orientação ser:
  - normal à superfície, sempre viável pela capacidade de interpolação linear do CNC;
  - inclinada em relação à normal à superfície, situação usual quando a movimentação da máquina é restrita aos eixos coordenados (comando por eixos)
- existência ou não de bloqueio da deflexão do sensor.

A figura 4.3 mostra as situações de maior interesse, considerando-se um sensor pontual. Observa-se que:

- os casos a e b requerem por parte do CN a capacidade de interpolação linear;
- nos casos b e c, ocorre um deslizamento do sensor sobre a superfície, prejudicial sob o aspecto de desgaste das superfícies em contato;
- o caso b implica ainda em esforços mecânicos sobre o apalpador, especialmente em superfícies com grande inclinação em relação ao eixo livre do apalpador (ângulo  $\theta$ ) e com alto coeficiente de atrito;
- o caso d tem como aspecto favorável a movimentação segundo os eixos coordenados, mais simples e genérica.

Conclui-se que condições mais favoráveis são obtidas ao operar-se com um apalpador com bloqueio na aproximação inclinada (fig. 4.3.d), e sem bloqueio na aproximação normal (fig. 4.3.a).

Na análise das condições geométricas na operação com um sensor real, assume-se as seguintes simplificações:

- as medições ocorrem segundo planos coordenados;
- as superfícies ideal e real são paralelas, tendo portanto a

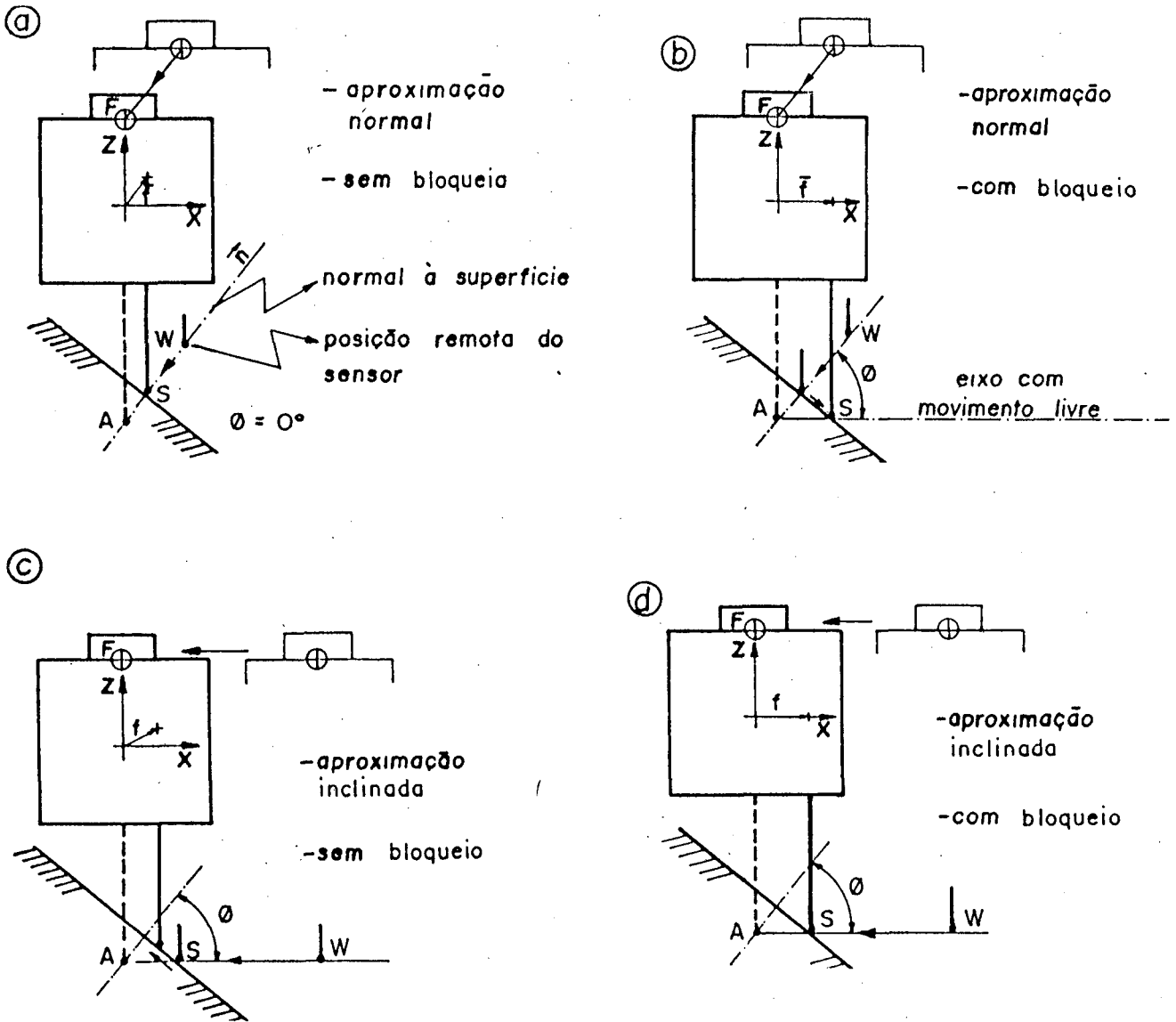


FIG. 4.3 : Condições operacionais da medição com apalpadores do tipo medidor

mesma orientação no sistema coordenado;

- o sensor possui forma esférica e os parâmetros de compensação do apalpador ( $\overline{AF}$ ) são definidos em relação ao seu centro geométrico.

De modo sistemático analisa-se separadamente a determinação de pontos de uma peça pela medição por comando manual e por comando automático. Os mesmos conceitos e uma análise semelhante podem ser considerados para a medição de ferramentas /32/.

a) Medição por comando manual - Não havendo um programa CN de

movimentação do apalpador no campo de trabalho da máquina, a posição que ocupa o ponto de referência do apalpador é conhecida apenas a partir da leitura das coordenadas da máquina ( $\overline{MA}$ ). Após o contato do sensor com a peça, tem-se a situação conforme mostra a figura 4.4.a. A posição do ponto real da peça é obtida pela expressão:

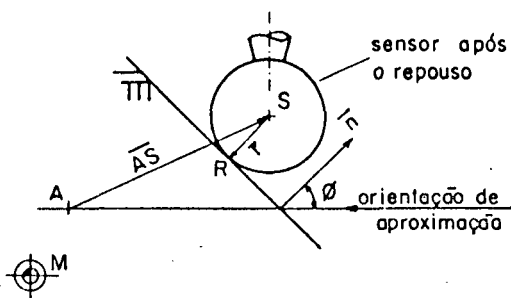
$$\overline{MR} = \overline{MA} + \overline{AS} + \overline{SR} \quad (4.1)$$

$$\overline{SR} = \overline{r} = r \text{ vers } \overline{n} \quad (4.2)$$

$r$  = raio do sensor

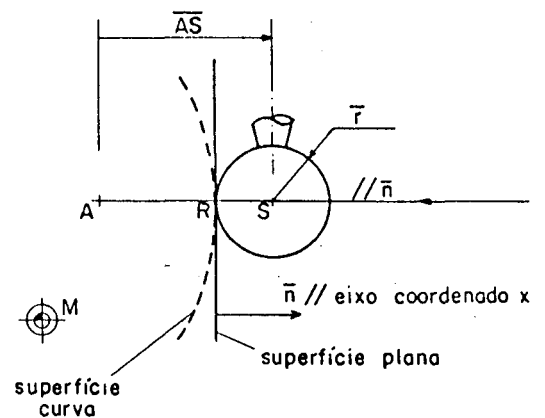
A deflexão  $\overline{AS}$  é conhecida a partir das componentes de deslocamento indicadas pelo apalpador, e o vetor  $\overline{SR}$  depende da orientação da superfície que está sendo medida, traduzida pelo seu vetor normal  $\overline{n}$ . A restrição do conhecimento de  $\overline{n}$  na medição por comando manual pode ser contornada, recorrendo-se à determinação de elementos geométricos, assunto a ser descrito no

(a) Aproximação inclinada sem bloqueio (caso geral)



$$\begin{aligned} \overline{MR} &= \overline{MA} + \overline{AS} + \overline{SR} \\ \overline{SR} &= \overline{r} = r \text{ vers } \overline{n} \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} \text{Equação} \\ \text{geral} \end{array} \right.$$

(b) Aproximação normal segundo um eixo coordenado



$$\begin{aligned} XMR &= XMA + XAS - r \\ YMR &= YMA \end{aligned}$$

FIG. 4.4 : Determinação de um ponto da superfície de uma peça na medição por comando manual

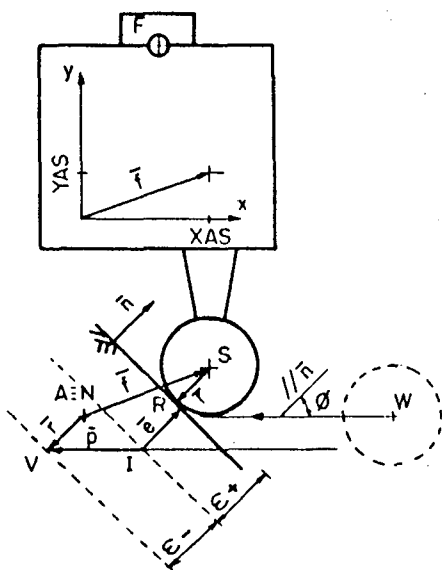
item 4.2. Entretanto, em superfícies orientadas segundo os eixos coordenados, com aproximação normal,  $\bar{n}$  é facilmente definida pela identificação do eixo e do sentido do movimento de aproximação (fig. 4.4.b).

b) Medição por comando automático - A programação dos movimentos de medição requer a determinação das posições nominais para posicionamento. A figura 4.5.a ilustra a situação mais genérica, ou seja, aproximação inclinada com o apalpador sem bloqueio. A posição nominal é determinada como a seguir:

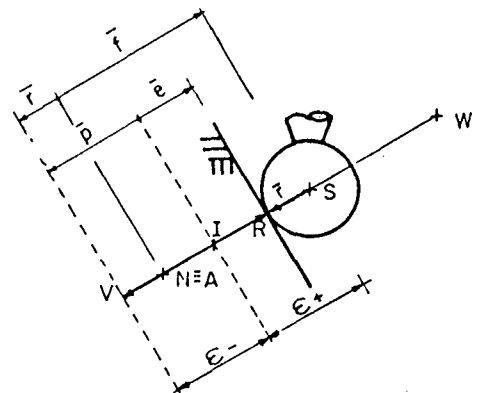
$$\overline{MN} = \overline{MI} + \overline{IV} - \overline{SR} \tag{4.3}$$

$$\overline{IV} = \bar{p} = \frac{\varepsilon}{\cos \phi} \text{ vers } \overline{WI} \tag{4.4}$$

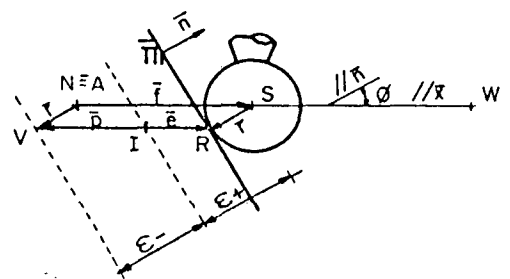
(a) Aproximação inclinada sem bloqueio



(b) Aproximação normal sem bloqueio



(c) Aproximação inclinada com bloqueio



$$\begin{aligned} \overline{MR} &= \overline{MA} + \overline{AS} + \overline{SR} = \overline{MI} + \overline{IV} + \overline{AS} \\ \bar{e} &= (\overline{IR}, \text{vers } \bar{n}) \text{ vers } \bar{n} && \text{medição} \\ \overline{IR} &= \overline{AS} + \overline{IV} = \overline{MR} - \overline{MI} && \text{diferencial} \end{aligned}$$

FIG. 4.5 : Determinação de um ponto da superfície de uma peça na medição por comando automático

$$\overline{SR} = \overline{r} = r \text{ vers } \overline{n} \quad (4.5)$$

$\phi$  = ângulo entre a normal à superfície e a orientação de aproximação.

O sobredeslocamento  $\overline{IV}$  é previsto em função do erro limite  $\mathcal{E}$ . A aproximação do sensor (ponto A) é efetivada a partir da posição remota ( $\overline{MW}$ ), localizada a certa distância de segurança do ponto ideal, até a posição nominal ( $\overline{MN}$ ). Como mostra a figura 4.5.a, determina-se o ponto real de contato calculando-se:

$$\overline{MR} = \overline{MI} + \overline{IV} + \overline{AS} \quad \text{ou} \quad (4.6)$$

$$\overline{MR} = \overline{MA} + \overline{AS} + \overline{SR} \quad \text{ou} \quad (4.7)$$

$$\overline{MR} = \overline{MN} + \overline{AS} + \overline{SR} \quad (4.8)$$

e o erro da posição da superfície por:

$$e = \overline{IR} \cdot \text{vers } \overline{n} \quad \text{ou} \quad (4.9)$$

$$e = (\overline{AS} + \overline{IV}) \cdot \text{vers } \overline{n} \quad (4.10)$$

Se o erro da posição é superior ao erro limite, o SMCP deve responder com as seguintes ações:

- interromper o movimento de avanço, caso a superfície esteja aquém do limite  $\mathcal{E} +$ ; como não foi atingida a posição nominal ( $\overline{MN}$ ), o ponto real deve ser calculado a partir da posição efetivamente atingida pelo apalpador ( $\overline{MA}$ ), aplicando-se a expressão 4.7;
- promover um deslocamento adicional do apalpador, caso a superfície esteja além do limite  $\mathcal{E} -$ , definindo uma nova posição nominal; após o contato, o ponto real deve então ser calculado pela expressão 4.8.

A figura 4.5.b ilustra a situação de aproximação normal à superfície, pela qual observa-se que o erro da posição pode ser obtido diretamente pelas grandezas tomadas em módulo. Tem-se da equação 4.10:

$$e = (\overline{AS} + \overline{IV}) \cdot \text{vers } \bar{n}$$

$$e = |\overline{AS} + \overline{IV}| |\text{vers } \bar{n}| \cos 0^\circ = |\overline{AS}| + |\overline{IV}| \quad (4.11)$$

Esta mesma formulação é válida para a aproximação inclinada segundo um eixo coordenado, e com um apalpador sob bloqueio da deflexão (fig. 4.5.c). Determina-se, entretanto, o erro da posição da superfície segundo a orientação do eixo livre, informação que pode ser interessante na medição de superfícies inclinadas obtidas por torneamento.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DE ELEMENTOS GEOMÉTRICOS

O conhecimento da posição angular da superfície a ser tocada é uma restrição bastante significativa para a medição por coordenadas, em especial na medição por comando manual, pois a geometria da peça é em geral desconhecida. Igualmente, na medição por comando automático, a orientação da superfície é necessária, se não para o cálculo do ponto real de contato, o é para a programação do movimento de aproximação na medição diferencial.

O caso agora tratado leva em conta conjuntos com números definidos de pontos, que permitem, por funções específicas de processamento, conhecer as características geométricas do elemento sobre o qual eles foram determinados. Tais funções compõem usualmente os recursos de processamento geométrico dos sistemas computacionais das máquinas de medir por coordenadas /33, 34/. Para o SMCP, esta metodologia tem importância relevante na medição de peças.

Sendo o vetor  $\overline{SR}$  a informação dependente da orientação da superfície, adota-se a sistemática de calcular cada elemento geométrico a partir dos pontos correspondentes ao centro do sensor, e compensar o seu raio diretamente sobre as características do elemento assim determinado. A figura 4.6 ilustra alguns casos para o plano e para o espaço. Na determinação da posição angular de uma reta relativamente a certo eixo coordenado (fig. 4.6.a), observa-se que, conhecendo-se as coordenadas de  $S_1$  e  $S_2$ , é dispensável a compensação do sensor para o cálculo do ângulo. O método requer, na maioria das vezes, uma informação complementar sobre a situação do elemento geométrico em relação aos pontos levantados. Assim, a medição do afastamento entre duas superfícies planas (fig. 4.6.b) requer

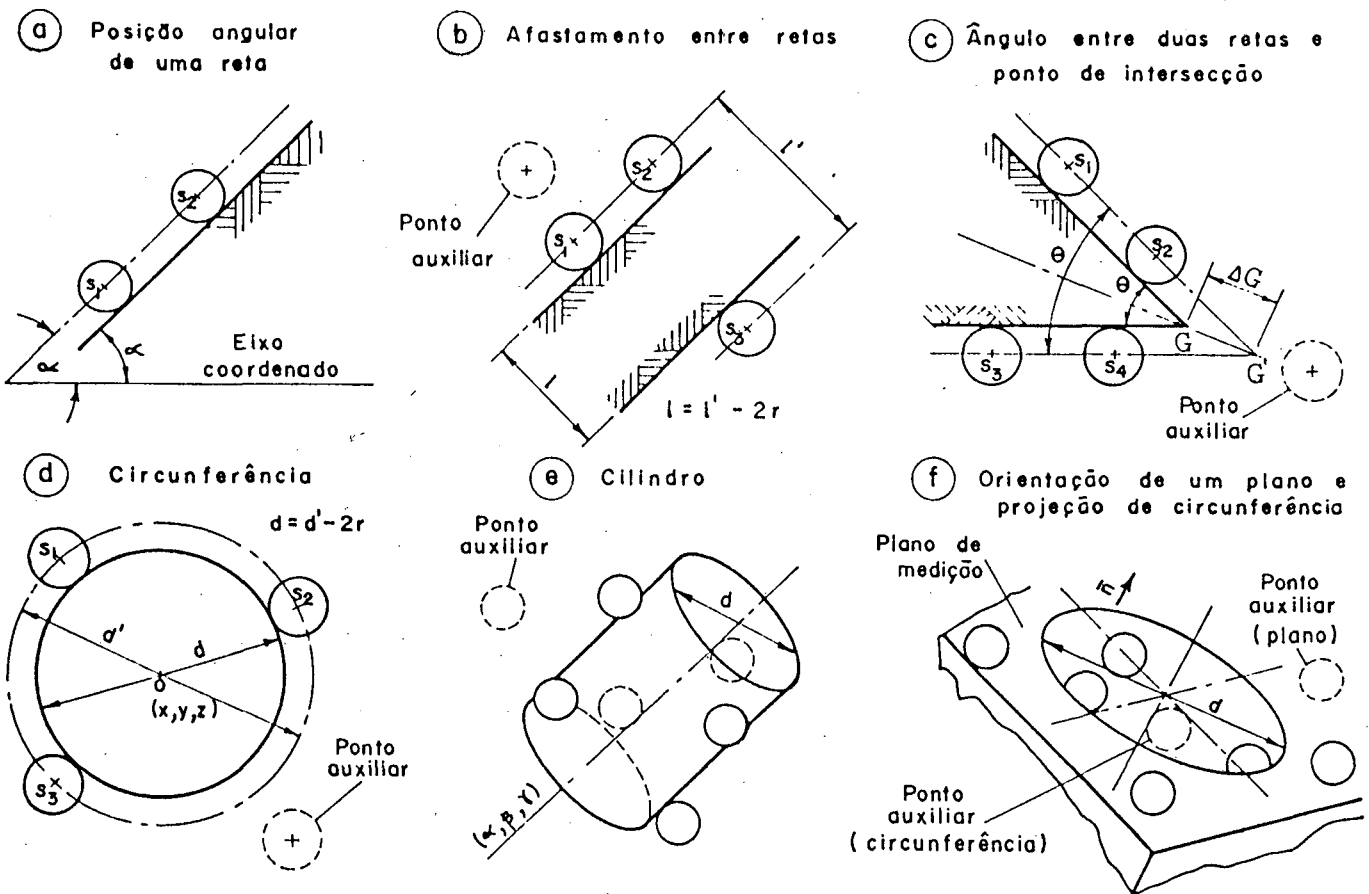


FIG. 4.6 : Determinação de elementos geométricos por coordenadas



especificar-se a medição como interna ou externa. Estas informações complementares podem ser fornecidas de modo codificado (teclas, comandos, etc), ou, o que confere maior simplicidade operacional às máquinas de medir por coordenadas, através de um ponto auxiliar /35/. Este ponto corresponde a uma estratégica posição onde o sensor é posicionado, não necessariamente em contato com uma superfície, de modo a estabelecer uma exata correspondência com as informações complementares. Como exemplo, na determinação do ângulo entre duas retas e seu ponto de intersecção (fig. 4.6.c), um ponto auxiliar pode indicar o setor angular e a condição de medição interna ou externa. Quando for necessário o conhecimento do ponto real de contato, a compensação do raio do sensor pode ser realizada agora a partir do elemento geométrico determinado. A figura 2.10 esquematiza um conjunto de funções de processamento geométrico implementado em um SMCP /12/.

Adequada às especificações de desenho mecânico, a metodologia de medições por planos simplifica e sistematiza os tarefas de levantamento geométrico de uma peça. Para tanto, define-se na peça planos de medição que correspondem aos planos onde os elementos geométricos têm suas características definidas. Os pontos levantados são projetados sobre seu respectivo plano de medição, calculando-se, a partir destas projeções, as características de cada elemento. A figura 4.6.f esquematiza a medição de um furo ortogonal à superfície da peça. A definição do plano de medição (por três pontos) permite que o diâmetro e a posição do centro do furo sejam determinados sobre a superfície da peça, mesmo que os seus pontos levantados não sejam coplanares.

O processamento geométrico pode também basear-se na determinação de elementos a partir de um maior número de pontos, além daquele mínimo necessário para a sua definição. Pela aplicação de métodos numéricos, como mínimos quadrados, calcula-se as características que melhor representam o elemento que está

sendo medido /35/. Minimiza-se, assim, a influência dos erros de forma do elemento real.

Outro recurso disponível em algumas máquinas de medir por coordenadas, e transferível para o SMCP, é a medição contínua de contornos ("scanning"), através da qual um perfil é conhecido pelo levantamento de um conjunto de sucessivos pontos, determinados por um deslizamento contínuo do sensor sobre a peça. Aplica-se a perfis complexos que não podem ser descritos por elementos básicos. A implementação desta alternativa em um SMCP requer, entretanto, um controle direto dos movimentos da máquina ferramenta.

Por envolver um intenso processamento de informações, a determinação dos parâmetros de elementos geométricos exige que o SMCP seja dotado de um processador com adequada capacidade computacional.

#### 4.3 COMPENSAÇÃO DE ERROS DO SMCP

Uma minimização dos erros do SMCP, de modo a atender o nível de precisão requerido, pode ser alcançada pela compensação dos erros sistemáticos da máquina ferramenta e do apalpador medidor. Os erros de cada um destes módulos, entendidos aqui como sistemas de medição, permanecem convenientemente armazenados em memória do processador, e são corrigidos sobre os valores de deflexão e coordenadas atuais da máquina, após cada medição.

Para o conhecimento dos erros do apalpador, é necessária uma calibração de cada eixo de medição, tratando-o como um medidor de deslocamento. De modo mais simples, pode-se detectar os erros de caráter sistemático, como linearidade, sensibilidade e histerese, a partir de ensaios em eixos isolados. Obtém-se assim, para valores pré-fixados de cada componente de deflexão, um valor de erro associado. Um levantamento mais detalhado pode, adicionalmente, abranger a determinação das componentes de

deflexão transversais a cada eixo principal ensaiado. Pode-se usar, neste caso, a mesma sistemática de composição do erro espacial da máquina ferramenta, como descrita a seguir neste mesmo item. Para tanto, faz-se equivaler o erro sistemático de cada eixo principal de deflexão ao erro de posicionamento, e as suas componentes transversais aos correspondentes erros de retilinearidade e ortogonalidade.

O levantamento de erros da máquina ferramenta baseia-se em ensaios geométricos /36, 37/ podendo-se ainda, no caso do SMCP, seguir recomendações de ensaios para máquinas de medir por coordenadas /38/. A determinação dos erros dos movimentos da máquina ferramenta implica na disponibilidade de adequados padrões de forma e de dimensão ou deslocamento. A sistematização dos ensaios segundo eixos e planos coordenados simplifica em muito a execução e análise dos mesmos. Os principais ensaios estão destacados a seguir /19/.

- a) Ensaio de posicionamento - um comando de posicionamento significa levar a ferramenta até uma posição desejada, relativamente a uma posição de referência (origem da máquina, da peça, etc). O erro de posicionamento é a diferença entre posição efetivamente alcançada pela execução de um comando, e a posição ideal programada. Podem ser utilizados padrões dimensionais, como uma coluna micrométrica, e padrões de deslocamento, como escalas eletro-ópticas e laser interferométrico.
- b) Ensaio de retilinearidade - considerando um ponto de um elemento da máquina ferramenta em movimento, o erro de retilinearidade da sua trajetória é determinado a partir do afastamento entre a sua posição em um dado instante, e a posição ideal definida por uma reta padrão. O eixo do movimento (reta de referência) é definido usualmente como a reta que melhor se ajusta aos afastamentos registrados ao longo da trajetória. Os erros de retilinearidade correspondem então aos afastamentos da trajetória real ao eixo do movimento. Na medição da

retilineidade é comum o uso de réguas padrão associadas a medidores diferenciais de deslocamento (por exemplo relógio comparador). Para máquinas de médio e grande porte utiliza-se sistemas com princípios ópticos, como telescópio de alinhamento e laser dos tipos de alinhamento e interferométrico.

c) Ensaio de inclinação - em máquinas ferramentas, os erros de inclinação expressam as componentes de movimentos angulares indesejáveis de um elemento da máquina que se desloca segundo determinada trajetória. Quando interpretados segundo planos específicos, relativos ao eixo de movimento, estes erros são divididos em: tombamento, rolamento e guinamento /37/. Para sua determinação são utilizados instrumentos como laser interferométrico, autocolinadores, nível eletrônico e outros.

d) Ensaio derivados - os principais são:

- Planicidade: resultam de uma conveniente associação de ensaios de retilineidade, realizados no sentido de varrer a região plana considerada;
- Paralelismo: corresponde ao ângulo entre as retas de referência obtidas por ensaios de retilineidade de duas trajetórias lineares, que deveriam ser paralelas;
- Ortogonalidade: o erro de ortogonalidade corresponde à diferença do ângulo formado pelas retas de referência, obtidas pelos ensaios de retilineidade de duas trajetórias lineares, e o ângulo ideal de  $90^\circ$ ; a condição de ortogonalidade entre as retas padrão é alcançada pelo uso de esquadros padrão e de espelhos especiais (pentaprismas).

Para o armazenamento dos erros no processador, pode-se fazer uso de, basicamente, dois métodos /59/:

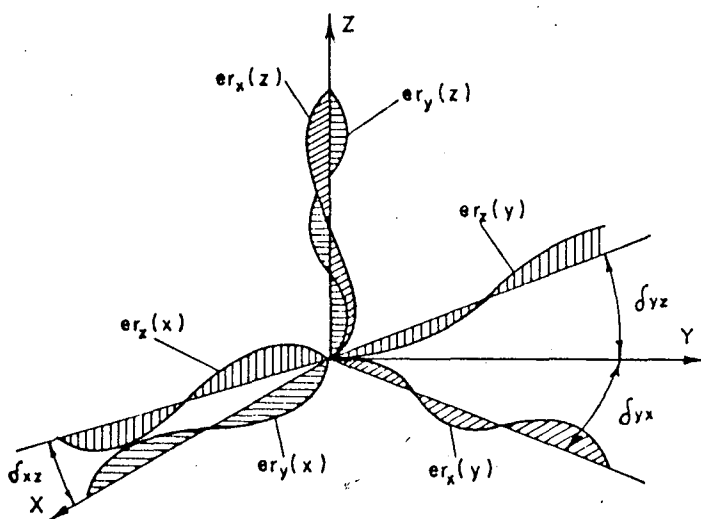
- por pontos discretos, onde valores de posição, ou deflexão, e os seus erros correspondentes são armazenados na forma matricial; para valores intermediários, o erro é obtido por interpolação linear;

- por funções matemáticas, que relacionam os valores de erro para as diversas posições ou deflexões medidas; funções mais simples são as algébricas e as trigonométricas (polinomiais e senoidais/cossenoidais).

O segundo método tem como grande vantagem a simplicidade de armazenamento, requerendo entretanto, um procedimento de cálculo prévio para determinar as funções desejadas. Em contrapartida à possibilidade do cálculo do erro para cada posição, sem a necessidade de interpolar valores, este método pode apresentar um erro residual maior do que o método por pontos discretos /30/.

Os principais erros (de primeira ordem) de uma máquina ferramenta são: posicionamento ( $ep$ ), retilineidade ( $er$ ) e ortogonalidade ( $\delta$ ). Uma sistematização para a composição destes erros, de modo que se obtenha o erro espacial, é representada na figura 4.7, juntamente com o equacionamento das suas componentes /30,39/. Esta formulação, que não considera os erros de inclinação, é bastante simples para aplicação ao caso bidimensional, como, por exemplo, em tornos.

Um outro método de composição dos erros considera, para cada componente da posição de um ponto, a soma do erro de posicionamento



$$e_x = ep(x) + er_x(z) + er_x(y) + y \cdot \text{tg } \delta_{yx}$$

$$e_y = ep(y) + er_y(x) + er_y(z)$$

$$e_z = ep(z) + er_z(x) + x \cdot \text{tg } \delta_{xz} + er_z(y) + y \cdot \text{tg } \delta_{yz}$$

FIG. 4.7 : Composição do erro espacial a partir dos erros de posicionamento, retilineidade e ortogonalidade

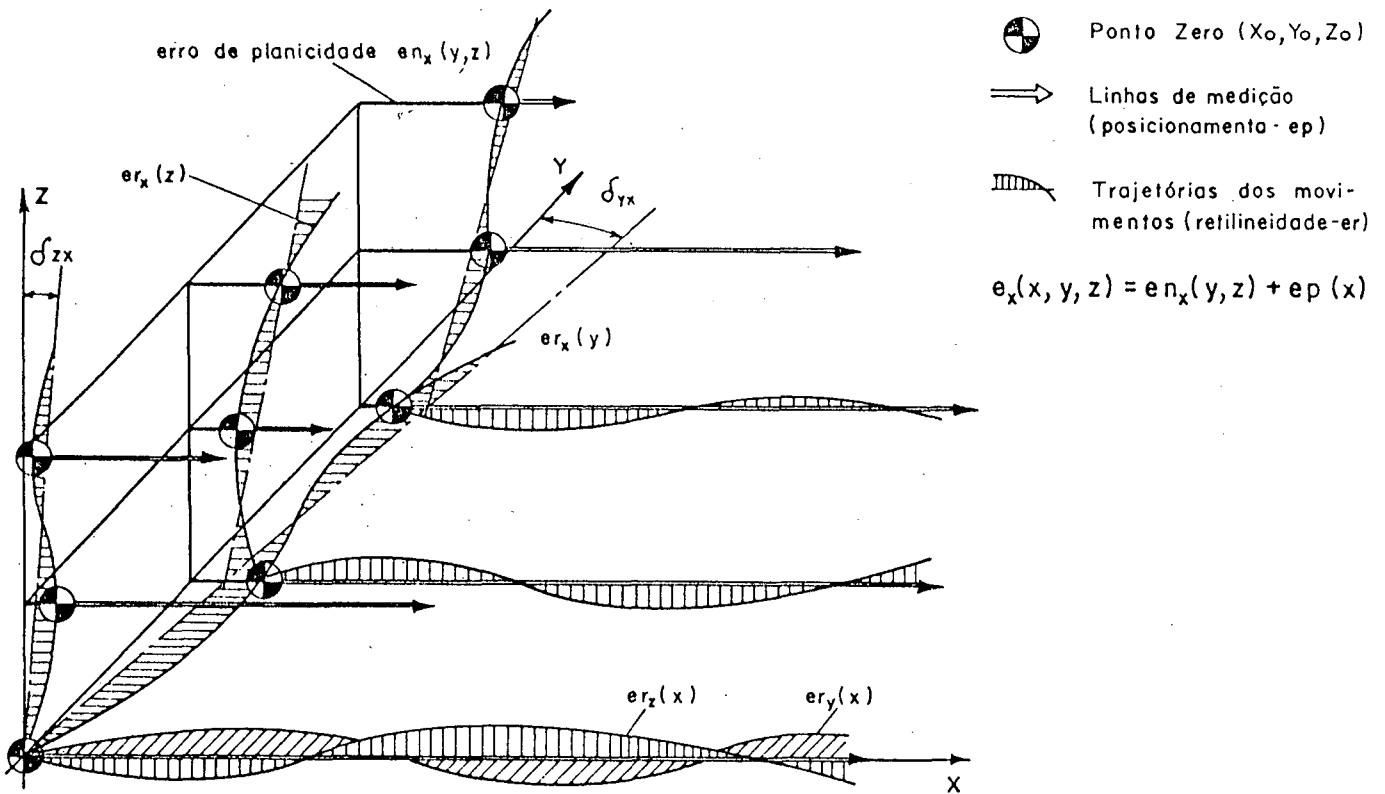


FIG. 4.8 : Composição do erro espacial a partir dos erros de planicidade e posicionamento /39/

na direção considerada com o erro de planicidade dos movimentos no seu plano ortogonal. A figura 4.8 ilustra a determinação dos erros de planicidade do plano yz, a partir de um conjunto de ensaios de retilidade, utilizados para cálculo dos erros na direção x /39/.

## 5. IMPLANTAÇÃO DE UM SMCP

No planejamento deste trabalho, previa-se o desenvolvimento de um SMCP para operar pela medição diferencial, o que configuraria um sistema simples, com capacidade bastante restrita. Durante a análise de tal sistema idealizou-se uma nova configuração com perspectivas de elevado potencial, mas que, por outro lado, demandaria esforços adicionais, especialmente na programação do processador. Tal sistema foi efetivado na forma experimental com os equipamentos disponíveis, como será descrito a seguir, com o objetivo principal de levantar as dificuldades para implementação de um SMCP e demonstrar a sua viabilidade técnica.

### 5.1 DESCRIÇÃO GERAL

O SMCP desenvolvido destinou-se a operar em um centro de usinagem com CNC pelo método diferencial, permitindo a medição tanto de peças como de ferramentas. A figura 5.1 ilustra o esquema geral, destacando-se que o sistema pode operar em medições por comando automático e manual.

Um apalpador e um dispositivo para medição de ferramentas, ambos para medição 2D, foram projetados para atender o sistema. Contando com transdutores indutivos de deslocamento, estes dois dispositivos servem-se de uma ponte amplificadora modular. O processador baseia-se em um microcomputador programável, apoiado por uma unidade de discos flexíveis e por uma impressora. A comunicação com os demais módulos do sistema é realizada por um circuito próprio para aquisição de coordenadas, uma interface modular de processos e um sistema de aquisição de sinais.

Com vistas às medições por comando automático, optou-se pelo modo de operação onde o programa de fabricação é executado a

partir do processador, conforme descrito no item 4. O processador interpreta o programa de fabricação, efetiva internamente os comandos de medição e transmite ao CNC os comandos para a máquina através da interface para leitora de fitas. As principais justificativas da escolha desta configuração são:

- elevadas flexibilidade e potencialidade do modo de operação;
- disponibilidade generalizada nos CNC's de uma entrada de programas, seja por leitora de fitas, seja uma entrada do tipo serial;
- facilidade de introdução dos programas de fabricação no próprio processador, por edição direta ou por recepção via DNC;
- disponibilidade de adequado equipamento experimental para configurar o módulo controlador;

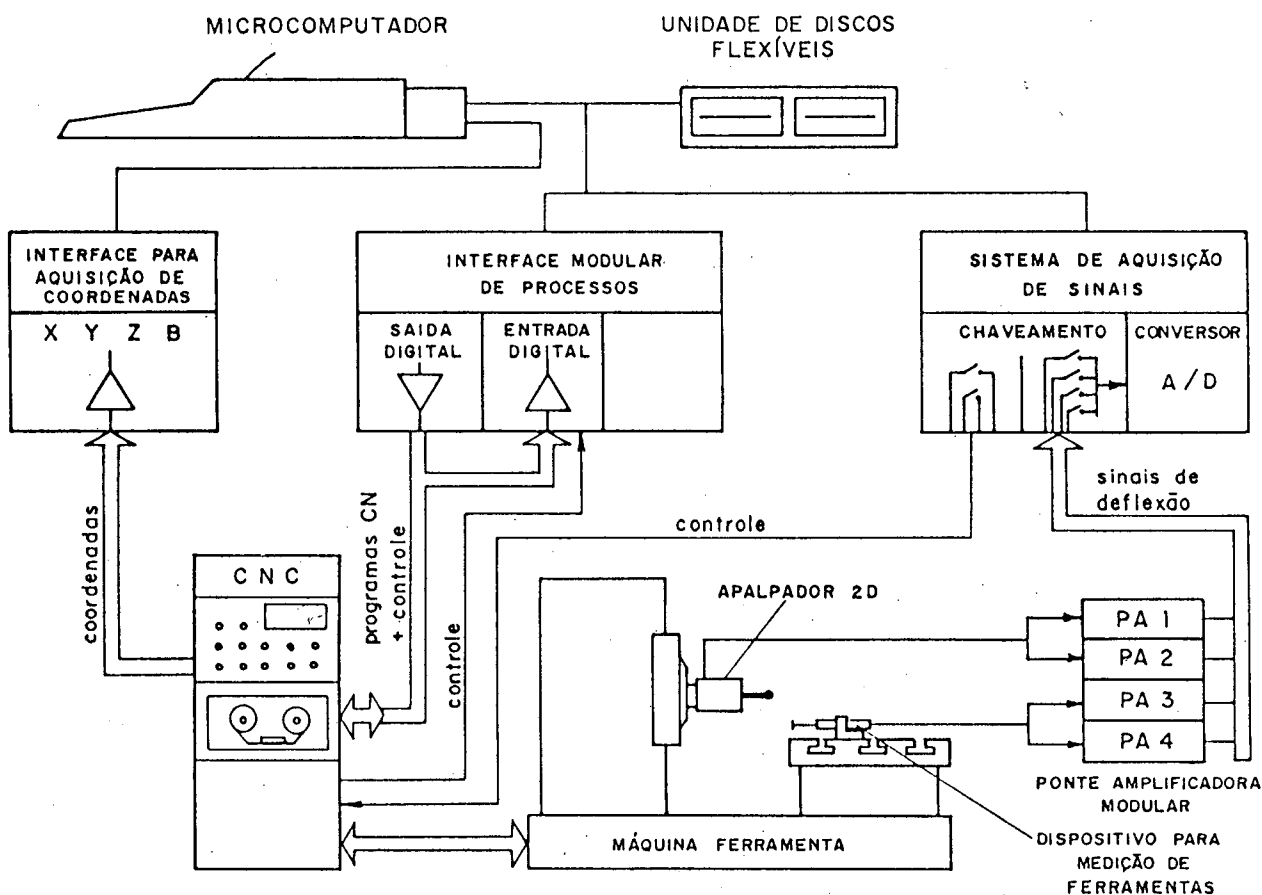


FIG. 5.1 : Esquema geral do SMCP implementado



- flexibilidade alcançável para a programação do controlador, essencial a um sistema experimental.

## 5.2 MÁQUINA FERRAMENTA COM COMANDO NUMÉRICO

O SMCP foi implantado em um centro de usinagem horizontal, equipado com CNC, e que possui três eixos ortogonais de deslocamento linear e um de rotação da mesa (fig. 5.2). Dispõe de dois paletes para fixação de peças, que podem ser alimentados alternativamente, e permite troca automática de ferramentas a partir de um magazine giratório.

Algumas das suas principais características são apresentadas a seguir /40/:

- campo de trabalho:  $X = 450$  mm       $Y = 400$  mm       $Z = 450$  mm
- potência do motor principal: 7,6 kW

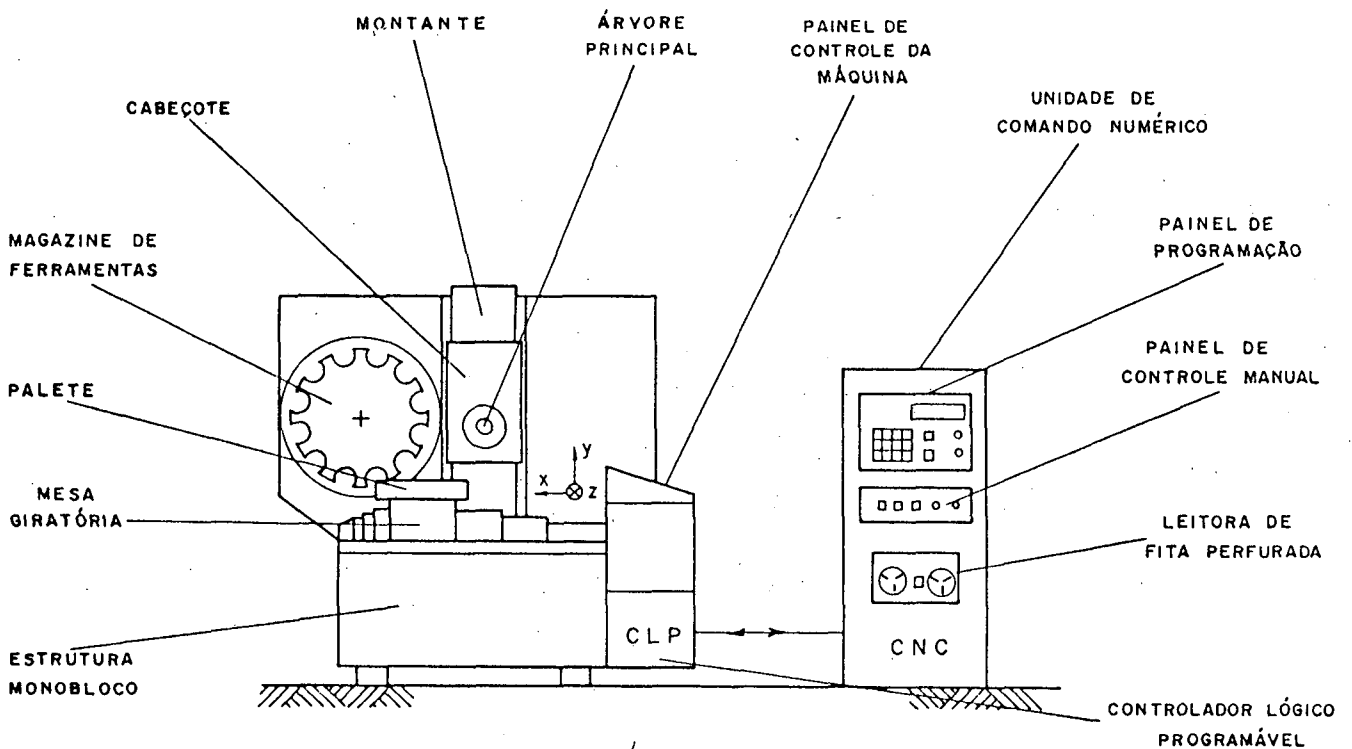


FIG. 5.2 : Centro de usinagem com CNC utilizado para o SMCP

- velocidade de avanço: de 1 a 8000 mm/min
- velocidade da árvore: de 25 a 4000 rpm
- resolução dos sistemas de medição dos deslocamentos (resolver-SINCRO): 1  $\mu$ m
- precisão de posicionamento (VDI 3254) /41/
  - erro máximo (tolerância de aproximação-TEU):
    - $\pm 0,020$  mm
  - dispersão de posicionamento (variação de posicionamento Rpu):  $\pm 0,010$  mm.
- transmissão do acionamento de avanço por fuso de esferas recirculantes
- guias com lubrificação hidrostática
- capacidade do magazine: até 20 ferramentas
- tempo de troca da ferramenta: 4 s
- posicionamento da árvore: apenas uma posição angular (através de regulação)
- controlador lógico programável (CLP) baseado em microprocessador.

O comando numérico é do tipo computadorizado (CNC), próprio para centros de usinagem e fresadoras, e previsto para controlar até quatro eixos de deslocamento. Permite operação com subrotinas, ciclos fixos de usinagem, e admite a entrada de programas, dados de ferramentas, e translação de origem pelo painel ou por leitora de fitas.

Suas principais características são /42/:

- unidade de processamento: 16 bit
- memória: 20 kByte PROM, 2 kByte RAM
- subrotinas programáveis: até 99, com 10 parâmetros livres.
- deslocamento programável: até 99 m
- capacidade de interpolação:
  - linear: 4 eixos simultâneos
  - circular: 2 eixos (planos coordenados)
  - roscas: circular (2 eixos) + linear (1 eixo)
- compensação automática dos parâmetros de ferramentas:

parâmetros de posição independentes para cada eixo, e diâmetro apenas em planos coordenados

- translação de origem: uma programável e quatro adicionais para definição externa
- compensação de erros de posicionamento, prevista para reduzir os erros sistemáticos a um máximo de  $\pm 2 \mu\text{m}$
- entrada externa adicional de dados:
  - sobre os parâmetros da ferramenta vigentes
  - sobre a translação de origem
  - do número de sentença para a partida do programa
- movimentação manual da máquina apenas segundo eixos independentes, com velocidade de avanço regulável e possibilidade de deslocamentos incrementais de  $1 \mu\text{m}$  a  $10 \text{ mm}$ .

Para acoplamento do SMCP, os seguintes sinais do CNC foram acessados pelo controlador:

- entrada para leitora de fitas;
- parada e liberação do movimento de avanço;
- partida do programa CN;
- cancelamento da sentença em execução;
- indicador de máquina em movimento.

Nesta implementação não se realizou a automatização de todas as funções necessárias para o controle do CNC, embora viável o seja, tendo em vista garantir assim maior segurança operacional do sistema experimental. A operação do SMCP requer, portanto, ainda alguns procedimentos manuais sobre o painel do comando numérico.

O recurso de introduzir-se os parâmetros de ferramentas e translação de origem pela entrada da leitora de fitas é aproveitada para a realimentação automática durante o processo de fabricação.

## 5.3 APALPADORES

Um apalpador medidor 2D foi desenvolvido para os testes do SMCP, tendo em vista, por um lado, a sua simplicidade construtiva e, por outro, a sua capacidade de atender alguns casos da medição espacial.

Como representado na figura 5.3, o apalpador baseia-se na flexão de um elemento elástico que, para simplificação, é assumido como uma rótula. Deste modo, o movimento angular da haste transmite a deflexão do sensor aos dois transdutores indutivos de deslocamento, dispostos ortogonalmente às faces de um segmento da haste com secção quadrada. Estes transdutores podem medir assim, segundo seus respectivos eixos, as componentes proporcionais ortogonais da deflexão do sensor. A função transferência real de cada medidor é determinada através de uma calibração do apalpador após a sua montagem. Molas de ajuste foram previstas a fim de garantir a força de medição necessária e compensar o peso próprio da haste/sensor, visto que o apalpador

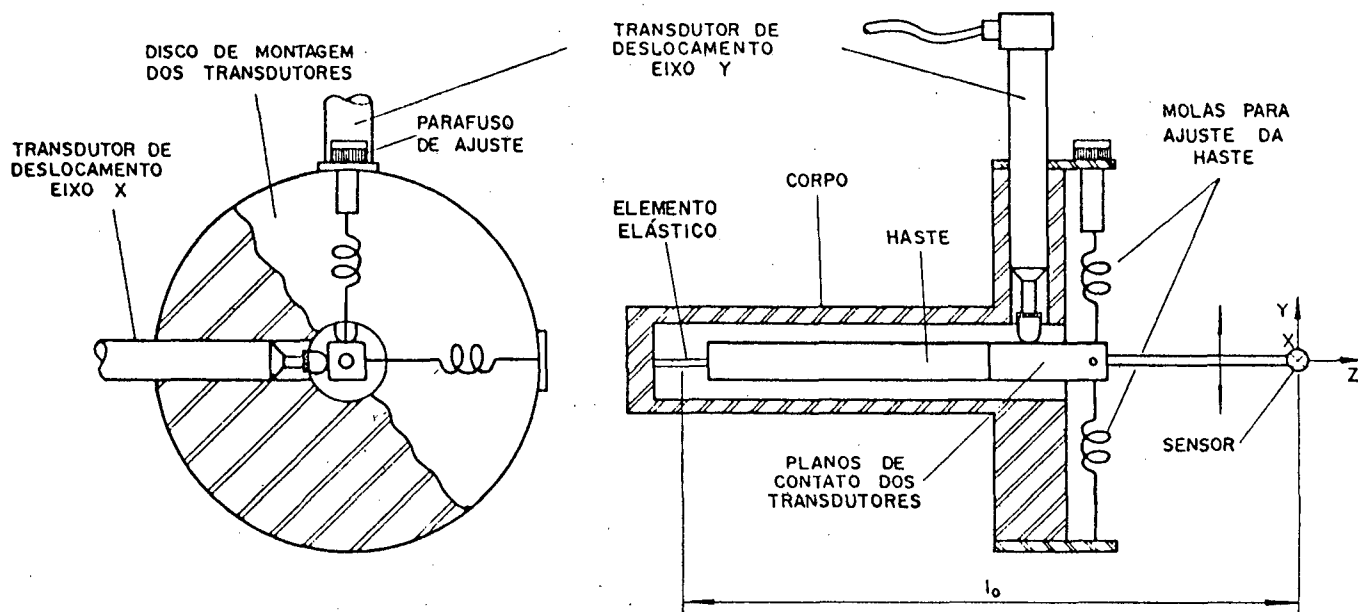


FIG. 5.3 : Apalpador 2D desenvolvido para os testes do SMCP

deve operar na posição horizontal.

É utilizado um sensor básico, o esférico, que é intercambiável com sensores de outros tipos. Através do corpo, o apalpador é fixado por uma pinça em um suporte de ferramentas padronizado.

Em função do apalpador não dispor de um sistema de desacoplamento dos sinais dos transdutores, que são conectados portanto diretamente à ponte amplificadora, fica impedido o seu alojamento no magazine de ferramentas. Deste modo, o acoplamento do apalpador é manual, e realizado apenas após a instalação do suporte de ferramentas e o posicionamento angular da árvore (fig. 5.4). Este procedimento é facilitado por um encaixe do tipo chaveta/entalhe entre o apalpador e o suporte, que garante a sua posição angular paralela aos eixos coordenados. Os parâmetros de compensação do apalpador são determinados através de um

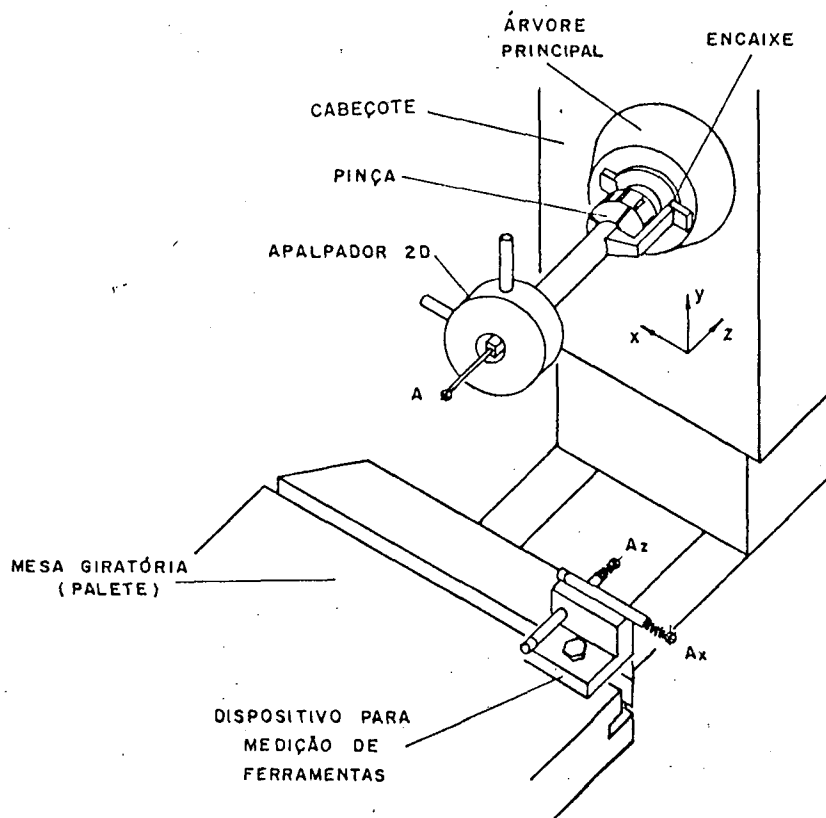


FIG. 5.4 : Instalação na máquina ferramenta

procedimento inicial automático, onde o sensor toca as faces de um cubo de referência orientado segundo os eixos da máquina, e cuja posição é conhecida no campo de trabalho.

Em função da análise das tarefas a realizar, o projeto do apalpador está baseado nas seguintes características desejáveis:

- faixa de operação:  $\pm 2$  mm
- erro máximo:  $\pm 10 \mu\text{m}$
- força de medição: 1 a 2 N.

Uma elevada precisão, embora desejável, não assumiu neste trabalho um papel restritivo. O SMCP, entretanto, dispõe da compensação automática de erros sistemáticos de cada componente da deflexão, levada a efeito pelo processador ao executar as medições.

O dispositivo para medição de ferramentas (DMF) é mostrado na figura 5.5, constituindo-se de dois medidores indutivos de deslocamento, montados sobre uma mesma base. É prevista a sua fixação sobre o palete, como ilustrado na figura 5.4, dispondo de um transdutor orientado para a medição do comprimento e outro

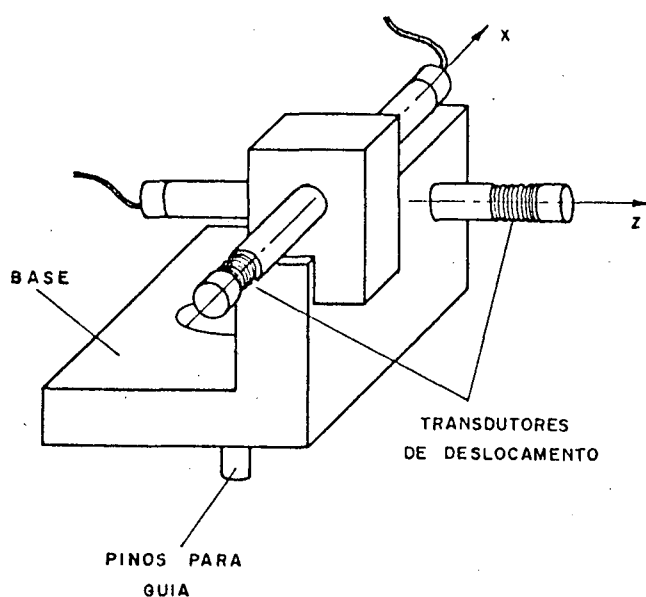


FIG. 5.5 : Dispositivo para medição de ferramentas

para o raio das ferramentas. Cada medidor é caracterizado por uma posição de referência própria (por exemplo,  $\overline{M\text{Ax}}$  e  $\overline{M\text{Az}}$ ), determinada com auxílio de uma ferramentea padrão cujos parâmetros são precisamente conhecidos. Para a medição de ferramentas, deve-se levar em conta o paralelismo entre as faces dos sensores e os respectivos planos coordenados, condição aqui auxiliada por pinos-guia sob a base, que se encaixam em uma ranhura do palete (fig. 5.4 e 5.5).

Destacam-se as seguintes características dos transdutores de deslocamento /44/:

- tipo: indutivo (indução própria)
- faixa de operação:  $\pm 2$  mm
- erro máximo:  $\pm 2\%$  da leitura.

Para o SMCP foram utilizadas as saídas analógicas das pontes amplificadoras /44/. Suas principais características são:

- Erro de linearidade: 0,1% da leitura
- Erro por variação de temperatura (0 a 40 °C): 0,5% da leitura
- Ruído: 1%

#### 5.4 CONTROLADOR

Na figura 5.6 apresenta-se esquematicamente os sub-módulos do controlador e os canais de comunicação internos e com os demais módulos do SMCP. Estes sub-módulos estão descritos a seguir:

- a) Unidade para Discos Flexíveis /45/ - armazena os programas e arquivos de dados do microcomputador, bem como os programas de fabricação e resultados das medições. Pode operar com dois discos, cada um com capacidade de 1.2 MByte.
- b) Microcomputador /46/ - é responsável pelo controle geral do módulo, comunicando-se com as demais unidades através de interfaces adequadas (IEC 422, BCD). Pelo seu teclado, o operador introduz programas e dados. Suas principais

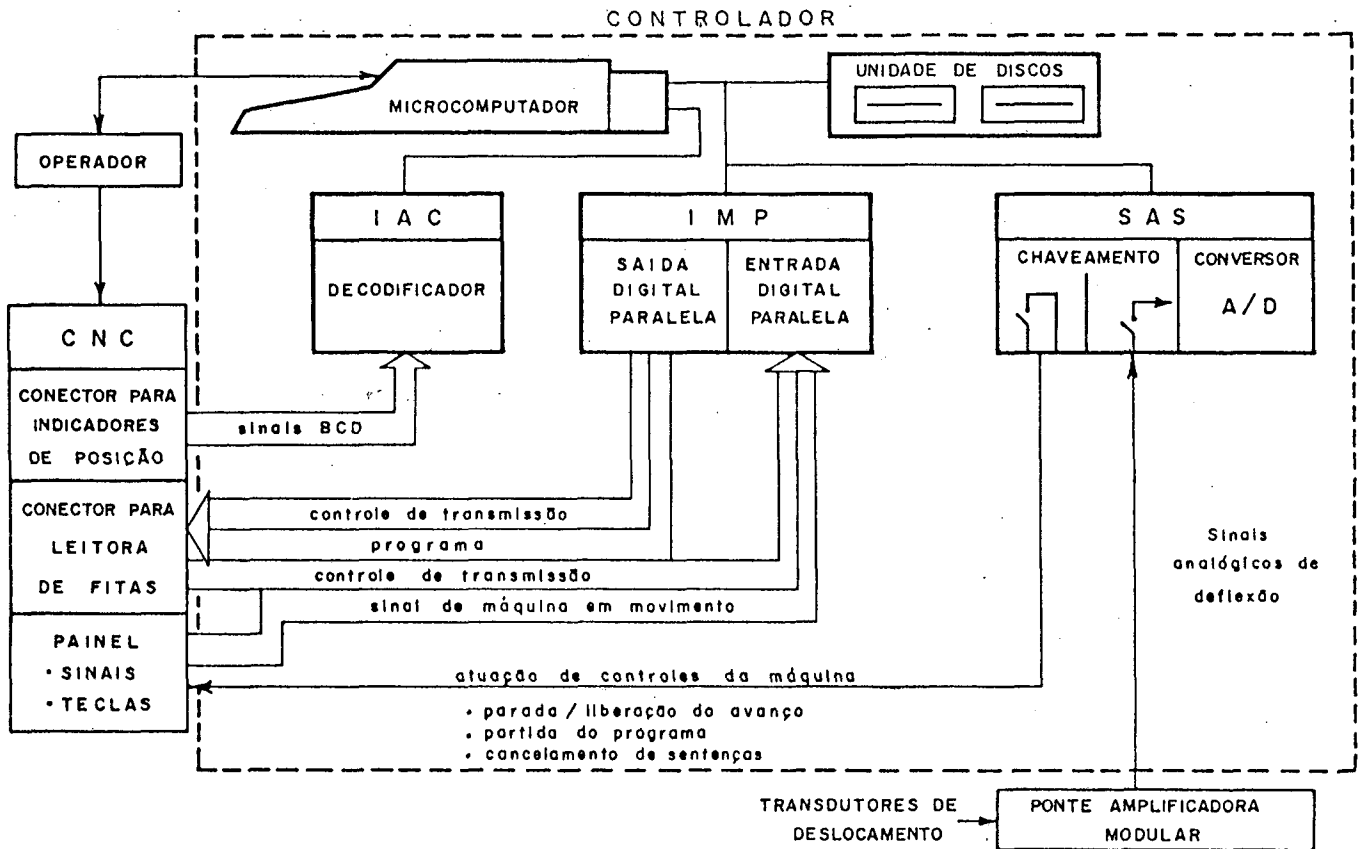


FIG. 5.6 : Módulo controlador do SMCP

características são:

- memória principal: 64 KByte (56 K disponíveis ao usuário).
- linguagem: HPL
- impressora interna: 16 caracteres por linha
- indicador alfa-numérico: 32 caracteres

c) Interface de Aquisição de Coordenadas (IAC) /47/: recebe do CNC as coordenadas atuais da máquina, transmitidas sequencialmente, dígito a dígito. Após a ordenação das coordenadas de cada eixo, os valores podem ser lidos pelo microcomputador. O desenvolvimento desta interface objetivou atender ao protocolo de comunicação específico do CNC disponível.

d) Interface Modular de Processos (IMP) /48/: é responsável pela comunicação com a interface para leitora de fitas e pela recepção do sinal indicador de máquina em movimento. Durante



as medições, este sinal é supervisionado de modo a ser realizada a leitura da deflexão somente após condição estacionária da máquina. As principais características da IMP são:

- unidade lógica: 16 bit
- capacidade: até 16 cartões
- cartões utilizados:
  - entrada digital: paralela, 16 bit, nível TTL
  - saída digital: paralela, 16 bit, nível TTL

e) Sistema de Aquisição de Sinais (SAS) /49/: por um cartão de relés (chave seletora), os sinais analógicos da ponte amplificadora modular são selecionados a um mesmo conversor A/D, que permite ao microcomputador obter o valor das componentes de deflexão. Atua também nos controle do CNC, simulando algumas teclas do seu painel. Tem-se como características mais importantes:

- cartão de conversão A/D
  - número de dígitos (selecionado): 5
  - resolução: 0,1 mV
  - incerteza de medição: 0,002%
  - taxa de conversão: 50 por segundo
- cartão de relés:
  - número de relés: 20, com três contatos cada
  - resistência de contato:  $< 1 \Omega$
  - máxima frequência de atuação: 500 Hz.

## 5.5 PROGRAMAÇÃO

O SMCP conta com programas principais para medições por comando automático e por comando manual, apoiados por arquivos de dados e um editor para os programas de fabricação.

### 5.5.1 Programa para a Medição por Comando Automático

O programa principal do controlador é denominado de "executor". Um programa de fabricação é codificado de modo que os comandos de medição possam ser identificados pelo executor, que os efetiva, e os comandos CN sejam transferidos ao CNC. Esta codificação serve-se de um caracter especial, distinto daqueles que compõem a linguagem de programação CN. Cada comando de medição é tratado como uma linha de programa, codificado em um formato fixo, próprio às informações que deve conter. O programa executor é empregado tanto para a medição integrada ao processo como para a independente, dispondo dos mesmos recursos de processamento, inexistindo, no segundo caso, as etapas de usinagem.

O programa executor conta com variáveis livres, utilizadas na codificação e execução dos comandos de medição, sendo elas:

- pontos: corresponde a uma tripla de coordenadas;
- componentes: relativas a cada coordenada de um dado ponto;
- escalares: sem vínculo com coordenadas.

Apresenta-se abaixo os principais tipos de comando de medição:

- matemáticos: atribuição e operações matemáticas (+, -, \*, /,  $\sqrt{\quad}$ , valor absoluto, seno, cosseno, arco tangente, etc);
- lógicos: testes condicionais, saltos, subrotinas (medição e usinagem);
- medição: determinação de um ponto, por comando automático ou manual;
- geométrico: circunferência, afastamento entre planos paralelos, definição de planos de medição, translação de origem, etc;
- realimentação: correção de origem da peça, de parâmetros de ferramentas, alteração de sentenças CN;
- comunicação: entrada, impressão de dados, gravação e carregamento de dados de medição.

A figura 5.7 esquematiza a operação do sistema, envolvendo os programas e arquivos de dados. Os comandos CN e de medição são

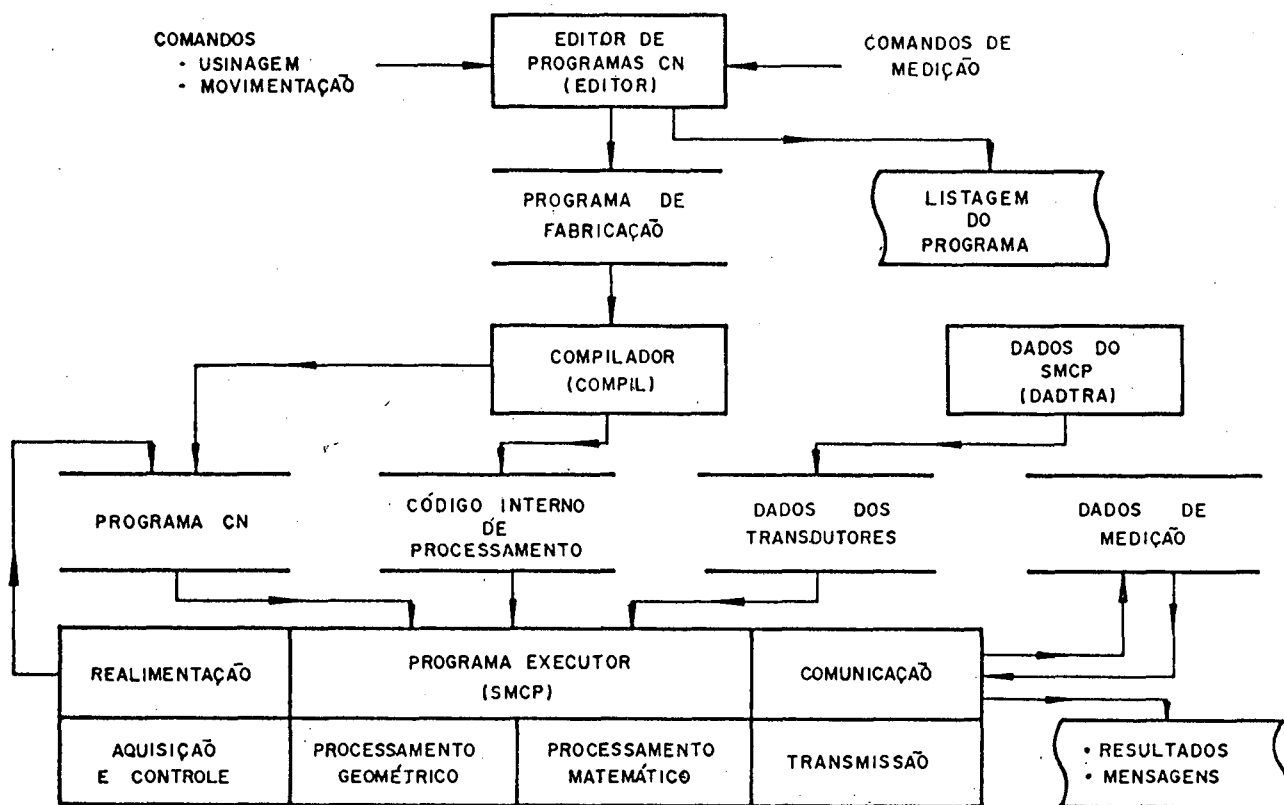


FIG. 5.7 : Conjunto de arquivos e programas do SMCP

introduzidos por um editor de programas (EDITOR), que permite manipular confortavelmente o programa de fabricação. Dispõe-se de recursos como movimentação, inserção, repetição, e cancelamento de linhas e caracteres, busca e transferência de linhas, busca de caracteres. Após a edição, o programa de fabricação é armazenado em disco.

Um compilador (COMPIL) interpreta o programa de fabricação, gerando, a partir dos parâmetros de cada comando de medição, um arquivo de tabelas onde as informações para processamento permanecem armazenadas de modo simplificado. Esta compilação é prevista para aumentar a velocidade do executor, dispensando-o da tarefa de interpretação dos comandos de medição, e detectar previamente erros de codificação.

O programa executor serve-se de um arquivo de dados do SMCP, gerado por um programa próprio (DADTRA), onde estão armazenadas

as informações de cada transdutor do apalpador 2D e do DMF, como sua função transferência, deflexão admissível, eixo de medição, erros sistemáticos para compensação, etc.

Como o programa executor admite a determinação de pontos pela medição por comando manual, é possível a elaboração de um programa onde toda a sequência de comandos para medição e processamento esteja definida. Resta ao operador, assim, apenas controlar os movimentos da máquina ferramenta.

Ressalta-se por fim, que os programas de fabricação poderiam ser gerados em um processador de linguagem de alto nível e transferidos ao microcomputador via DNC. Deve-se prever uma análise da necessidade de adequar a codificação dos comandos de medição e de adaptar o tratamento dos pós-processadores frente a estes novos códigos. De forma direta, pode-se codificar os comandos de medição como comentários do programa CN.

#### 5.5.2 Programa para Medição por Comando Manual

Com o objetivo de medir peças com geometria desconhecida, o programa dispõe de algumas rotinas independentes de processamento geométrico básico. Tais rotinas são acionadas por teclas do microcomputador, selecionadas pelo operador conforme as tarefas a executar. São oferecidas, em seu atual estágio de desenvolvimento experimental, as seguintes funções, previstas para medição em planos coordenados:

- determinação de um ponto
- afastamento entre superfícies planas
- distância entre dois pontos
- ponto médio entre outros dois
- circunferência.

## 6. DESEMPENHO DO SMCP IMPLEMENTADO

Com o objetivo de avaliar o desempenho do SMCP implementado, foram desenvolvidos alguns ensaios específicos, apresentados resumidamente a seguir com seus respectivos resultados. Foram realizados, entre outros, a qualificação do apalpador 2D e do dispositivo para medição de ferramentas, bem como a determinação das velocidades de aproximação recomendáveis. Apresenta-se os procedimentos preparatórios para medição com o sistema e alguns exemplos da sua utilização, elaborados primordialmente com vistas à sua operacionalização, sem perseguir níveis ótimos de precisão.

### 6.1 COMPORTAMENTO METROLÓGICO E OPERACIONAL

#### 6.1.1 Qualificação do Apalpador 2D e do Dispositivo para Medição de Ferramentas (DMF)

A qualificação destes sistemas de medição tem como objetivos conhecer algumas das suas características metrológicas e minimizar a influência dos seus erros sobre a precisão do SMCP.

Uma calibração da deflexão segundo cada direção de medição permite determinar o valor da sensibilidade média efetiva para cada transdutor, dentro de uma faixa de operação definida. Para tanto, são levantados os valores de tensão analógica da ponte amplificadora para correspondentes deflexões, dadas por um medidor de deslocamento padrão do tipo eletro-óptico. A relação média entre a deflexão e a tensão analógica de saída (inverso da sensibilidade) é obtida pelo método dos mínimos quadrados, e, nas medições com o SMCP, este valor é utilizado como fator de conversão das leituras. O erro para cada deflexão medida é dado por:

$$\text{erro} = \text{tensão analógica} \times \text{fator de conversão} - \text{valor verdadeiro convencional (padrão)} \quad (6.1)$$

Por esta calibração podem ser ainda determinados o erro de linearidade, a dispersão de medição e a histerese em cada eixo de medição. Os principais resultados estão transcritos a seguir.

a) Apalpador 2D (fig. 6.1.a) /50/

- Faixa de operação:  $\pm 2$  mm
- Incerteza de medição (precisão):  $\pm 5 \mu\text{m}$
- Erro sistemático máximo:  $- 5 \mu\text{m}$
- Dispersão de medição máxima (95%, m=5):  $\pm 3 \mu\text{m}$
- Erro de linearidade:  $3 \mu\text{m}$
- Histerese máxima:  $2 \mu\text{m}$ .

b) Transdutores do DMF (fig. 6.1.b) /51/

- Faixa de operação:  $\pm 1,2$  mm
- Incerteza de medição (precisão):  $\pm 5 \mu\text{m}$
- Erro sistemático máximo:  $- 3 \mu\text{m}$
- Dispersão de medição máxima (95%, m=4):  $\pm 3 \mu\text{m}$
- Erro de linearidade:  $3 \mu\text{m}$

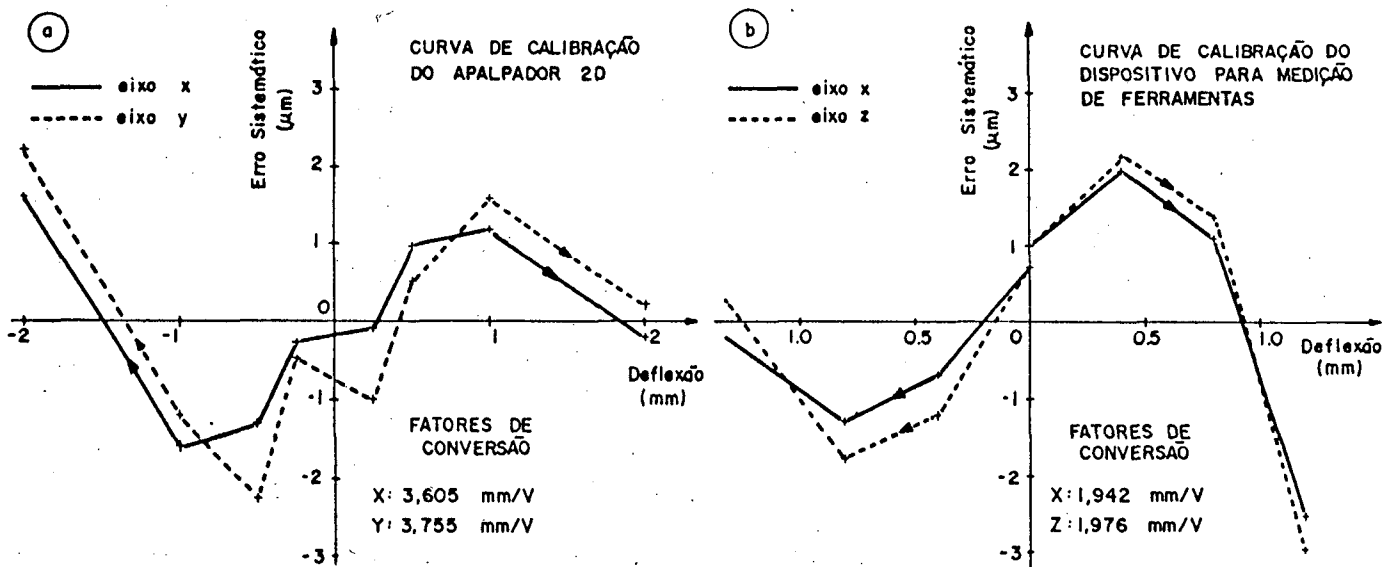


FIG. 6.1 : Curvas de erros do apalpador 2D e do dispositivo para medição de ferramentas

- Histerese máxima: 1  $\mu\text{m}$ .

A calibração do apalpador quanto à força de medição tem como objetivo verificar se as condições previstas no projeto foram alcançadas. Em cada eixo é determinada a força necessária para que se obtenha uma dada deflexão; a relação média entre estas duas grandezas traduz a constante de mola do apalpador. O ensaio, abrangendo a faixa de  $\pm 2$  mm de deflexão, confirmou as constantes esperadas:

- eixo x : 0,94 N/mm

- eixo y : 1,04 N/mm

#### 6.1.2 Determinação da Máxima Velocidade de Aproximação

Objetivou-se determinar as máximas velocidades de aproximação sob as quais ocorram sobredeflexões ainda admissíveis (item 3.3). É necessário que na medição, a deflexão após a imobilidade da máquina esteja dentro da faixa de operação do apalpador. Durante os movimentos intermediários de ponto a ponto, o apalpador está desprotegido contra colisões acidentais.

A parada do avanço implementada para o SMCP é atuada de modo normal, por um sinal de entrada próprio do CNC. Aqui, um relé do controlador simula a tecla "stop" do painel do centro de usinagem (fig. 5.6, item 5.4). Uma outra alternativa consta da atuação direta sobre o controle dos reguladores de posicionamento, sinais que comandam os movimentos dos diversos eixos, e que são acessíveis entre o CNC e o CLP. Embora não utilizada, esta opção foi avaliada quanto a sua eficiência de atuar na parada do avanço.

O método de ensaio consistiu em avançar o apalpador contra a superfície de uma peça padrão segundo uma dada orientação de medição, sob diferentes velocidades de avanço da máquina ferramenta. A sobredeflexão é calculada como a diferença entre a deflexão final (com a máquina parada) e o valor de referência adotado, valor este que define o instante de atuação da parada do

avanço.

Foram ensaiadas as direções y e z, no sentido negativo, pois as massas dos componentes da máquina envolvidas nestes movimentos sugerem as situações mais críticas (fig. 5.2). Dois tipos de ensaios foram realizados, distintos pelas seguintes condições:

- supervisão direta da deflexão: o sinal da tensão analógica, correspondente a um transdutor indutivo de deslocamento em ação, é continuamente lido pelo microcomputador e comparado com o valor de referência, enquanto avança contra uma superfície; embora o controle da deflexão e a atuação sejam realizados pelo microcomputador, procurou-se garantir máxima velocidade de processamento na execução destas tarefas, com vistas a simular um possível circuito baseado em comparadores de nível de tensão elétrica; foi avaliado o comportamento da parada do avanço sob atuação normal e pelo controlador;
- supervisão da deflexão nas condições efetivas do SMCP: o controle da deflexão é realizado como parte do comando de medição que determina a posição de um ponto; esta rotina, ao lado da supervisão de sinais de controle, realiza a leitura da tensão analógica de todos os transdutores ativos e compara com o valor de referência; a atuação da parada do avanço foi avaliada apenas pelo modo normal.

A figura 6.2 mostra os resultados obtidos para as diversas condições de ensaio. Pelas curvas correspondentes à supervisão direta, observa-se que:

- os eixos y e z têm comportamentos equivalentes;
- a relação média entre a sobredeflexão e a correspondente velocidade equivale ao tempo de atraso do sistema em detectar a deflexão de referência e prover a imobilidade da máquina; para atuação normal tem-se 0,14 s, e pelo regulador, 0,07 s;
- a eficiência da atuação sobre os reguladores é significativamente maior do que aquela alcançada pelo modo normal.

Pela curva do ensaio nas condições efetivas do SMCP (eixo -y



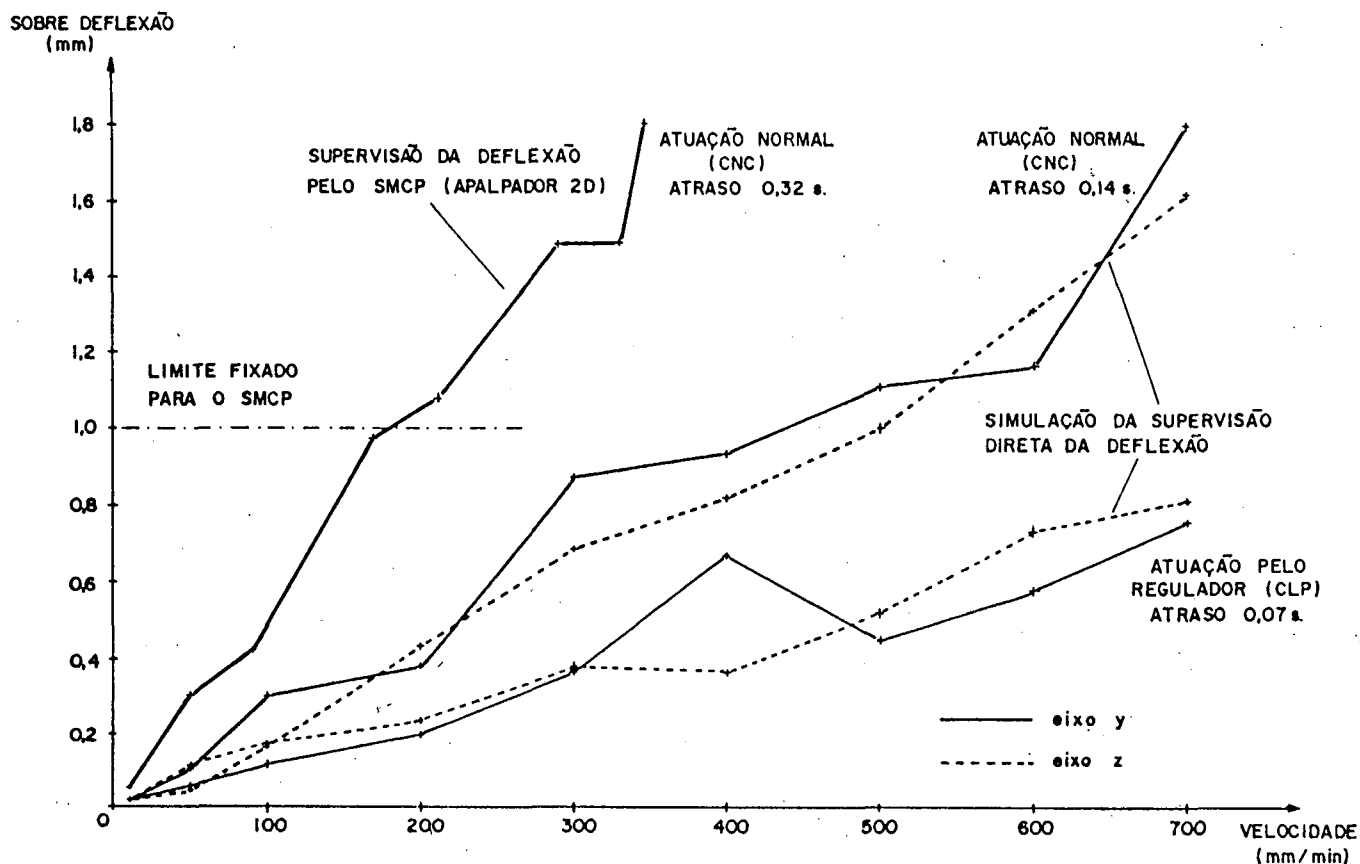


FIG. 6.2 : Condições da interrupção dos movimentos da máquina ferramenta sob diversas velocidades de avanço.

apenas), tem-se que:

- a sobredesflexão atinge valores em dobro daqueles ocorridos sob a supervisão direta, expressando a influência do número de transdutores e da velocidade do programa do processador sobre a rapidez das medições;
- a relação média entre a sobredesflexão e a velocidade vale (tempo de atraso) 0,32 s.

A partir desta última observação, limita-se a velocidade do movimento de aproximação em 100 mm/min, levando em conta uma sobredesflexão de 1 mm e a segurança adicional pela sua variação obtida no ensaio.

### 6.1.3 Comportamento da Árvore Principal do Centro de Usinagem

As medições com um apalpador requerem o seu preciso posicionamento para operação, de modo que os seus parâmetros de compensação ( $\overline{AF}$ ) sejam constantes, e que, sendo do tipo medidor, tenha seu sistema coordenado interno paralelo ao sistema da máquina. O posicionamento angular da árvore, neste caso particular, é levado a efeito por um comando do CNC, e mantido por um sistema regulador que gera, no entanto, pequenas oscilações angulares da árvore. Por outro lado, a instalação do suporte do apalpador (fig. 5.5) está sujeita a influências como a presença de óleo e impurezas, que podem resultar em variações da sua posição entre sucessivas trocas, especialmente na direção axial (eixo z). Estas variações refletem-se sobre os parâmetros de compensação do apalpador e das ferramentas. Foi realizada uma série de ensaios /52/, dos quais destaca-se aqui a verificação da oscilação angular da árvore.

Como dispositivo de ensaio, serviu-se de uma barra retangular fixada em um suporte de ferramentas, perpendicularmente ao seu eixo. Um transdutor de deslocamento é montado sobre o cabeçote, tocando transversalmente a extremidade da barra, tangente ao movimento de rotação. Com um erro desprezível, o deslocamento angular pode ser calculado em função da deflexão e da distância do transdutor ao eixo de rotação.

Observou-se que, sob um movimento do cabeçote (eixo y), ocorre um acentuado deslocamento angular da árvore, que é rapidamente corrigido pelo circuito regulador. A oscilação da árvore, após a estabilização, não excede  $\pm 10'$ . A sua influência sobre a medida da deflexão assume caráter aleatório, pois a oscilação é contínua, podendo entretanto ser minimizada através de múltiplas leituras da tensão analógica. O erro manifesta-se em cada componente de deflexão proporcionalmente à outra, transversal. Avalia-se que, em deflexões da ordem de 2 mm, as medidas possam apresentar variações de até  $\pm 5 \mu\text{m}$ .

#### 6.1.4 Tempo de Medição

Cada comando de medição possui características próprias, sendo as mais demoradas aquelas que exigem a intervenção do operador, como a entrada de dados e a correção de origem e de parâmetros de ferramentas. A transmissão de sentenças ao CNC não dispense um tempo significativo, especialmente nas etapas de usinagem.

A implementação experimental deste SMCP não levou em conta a minimização do tempo consumido nas etapas de medição. Estima-se que em medições por comando automático, a determinação de um ponto consome o tempo aproximado de 20 s, considerando-se o deslocamento até o ponto remoto, a aproximação de medição e o processamento (controle, cálculo, impressão). Na medição por comando manual o tempo é bastante variável seguramente supera este valor.

#### 6.1.5 Procedimentos Preparatórios

São consideradas aqui as determinações das posições de referência dos transdutores do DMF e dos parâmetros de compensação do apalpador, informações geralmente necessárias para operação do SMCP.

##### a) Determinação da posição do DMF (fig. 6.3.a)

O DMF deve ocupar sobre o palete uma posição perfeitamente definida, o que na sua montagem é alcançado apenas de modo aproximado. Um programa de medição permite determinar automaticamente as coordenadas mais críticas dos pontos de referência, ou seja, correspondentes às direções  $x$  e  $z$ .

A determinação de  $A_x$  e  $A_z$ , conforme ilustrado na figura 6.3.a, é realizada por meio de uma ferramenta padrão que, na posição de definição dos seus parâmetros, é feita tocar nos sensores do DMF. A ferramenta padrão é constituída basicamente de um pino padrão com diâmetro e posição axial medidos por meio

convencional. A posição  $X_{MAx}$  é obtida pelo toque radial da ferramenta padrão, e a posição  $Z_{MAz}$ , pela face de encosto. Quanto às demais coordenadas, é suficiente o seu conhecimento apenas de modo aproximado.

Entre sucessivos procedimentos desta tarefa de medição, envolvendo a reinstalação da ferramenta padrão na árvore, e outros procedimentos associados, observou-se uma repetibilidade com um desvio padrão  $s = \pm 3 \mu m$  ( $m=4$ ).

b) Determinação dos Parâmetros do Apalpador

Sendo o apalpador do tipo 2D, seus parâmetros podem ser determinados como exposto a seguir (fig. 6.3.b):

- tocando um cubo de referência, cujas faces ortogonais aos eixos  $x$  e  $y$  ocupam uma posição conhecida no campo de

Ⓐ Localização da Posição do Dispositivo para Medição de Ferramentas

Ⓑ Determinação dos Parâmetros de Compensação do Apalpador

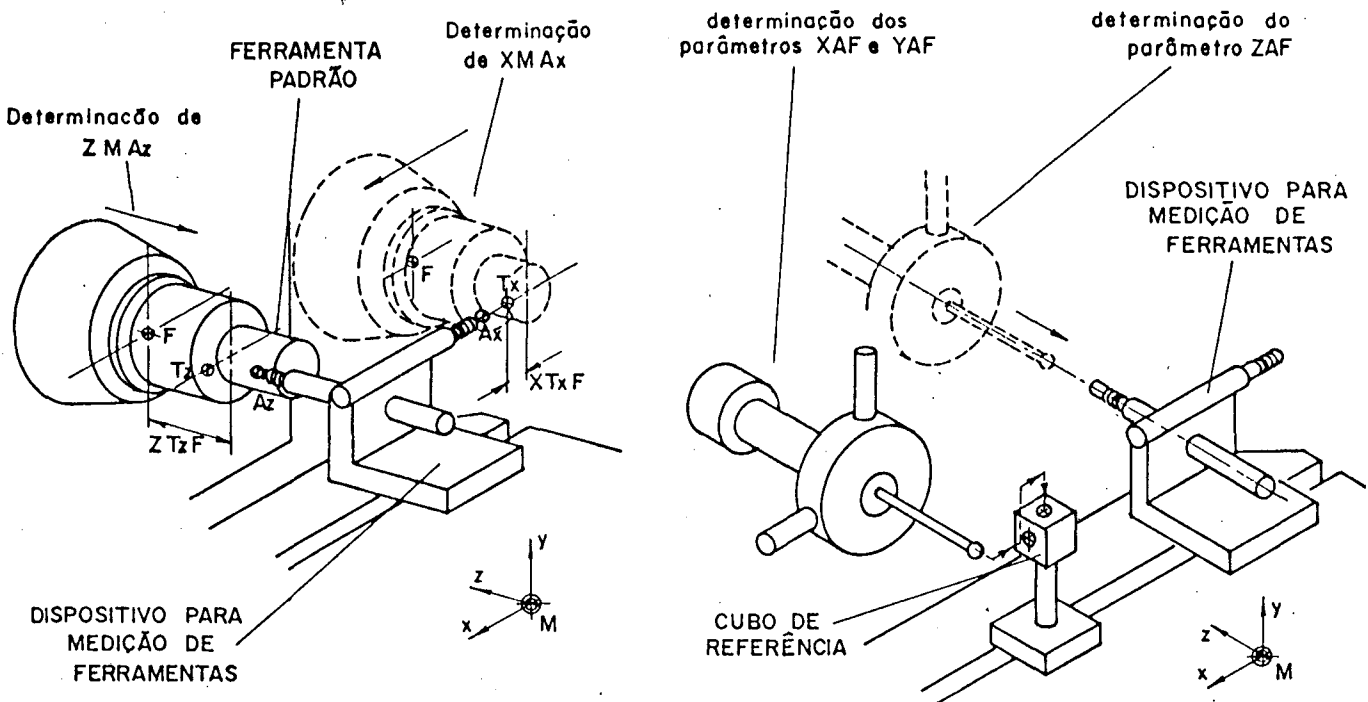


FIG. 6.3 : Localização do DMF e determinação dos parâmetros de compensação do apalpador 2D

trabalho; na preparação da máquina ferramenta para operação, a posição deste cubo é determinada com auxílio da ferramenta padrão;

- pelo DMF, o parâmetro na direção z (ZAF) é determinado pelo mesmo procedimento adotado na medição do comprimentos de ferramentas.

O parâmetro ZAF é determinado através de uma medição por comando manual, sendo as demais medidas automaticamente por um programa próprio. Como alternativa deste programa, conhecendo-se a dimensão do cubo de referência na direção x, pode-se medir também o raio do sensor. Entre sucessivos procedimentos de instalação/medição, os valores ( $\overline{AF}$  e raio) foram determinados com um desvio padrão  $s = 2 \mu\text{m}$  ( $m=3$ ).

## 6.2 MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DE FERRAMENTAS

Foram elaborados dois programas para testes do SMCP aplicado à medição de ferramentas.

- a) Determinação inicial dos parâmetros: através de medições por comando manual, o operador pode medir as ferramentas na própria máquina, dispensando a pré-ajustagem. É programada a sequência de medição do comprimento e do diâmetro da ferramenta.
- b) Verificação dos parâmetros da ferramenta: o programa permite que a partir de parâmetros nominais conhecidos, ferramentas como brocas, fresas, e barra de mandrilar, sejam automaticamente verificadas quanto aos erros da pré-ajustagem ou devidos ao desgaste durante a usinagem. É prevista a comunicação ao operador sobre a necessidade de substituir a ferramenta ao ser detectado um erro (por quebra ou desgaste) superior a um limite pré-estabelecido.

Para o caso da medição inicial (caso a) avaliou-se os resultados nas seguintes aplicações:

- medição da própria ferramenta padrão, utilizada na determinação da posição do DMF (item 6.1.5), obtendo-se:
  - para o comprimento: erro sistemático =  $1 \mu\text{m}$ , desvio padrão =  $1 \mu\text{m}$  ( $m=3$ )
  - para o diâmetro: erro =  $5 \mu\text{m}$ , desvio padrão =  $3 \mu\text{m}$  ( $m=3$ )
- medição de uma fresa, diâmetro nominal de 25mm, obteve-se:
  - para o comprimento: desvio padrão =  $5 \mu\text{m}$  ( $m=3$ )
  - para o diâmetro: erro sistemático =  $35 \mu\text{m}$ , desvio padrão =  $4 \mu\text{m}$  ( $m=4$ )
- medição de uma broca, com diâmetro nominal de 11,5 mm, obteve-se:
  - para o comprimento: desvio padrão:  $4 \mu\text{m}$  ( $m=4$ )
  - para o diâmetro: erro sistemático =  $140 \mu\text{m}$ , desvio padrão =  $8 \mu\text{m}$  ( $m=4$ ).

O erro na medição dos comprimentos não foi avaliado por não ser disponível equipamento para pré-ajustagem. Observa-se a inadequação do dispositivo e do método à medição de diâmetros, ao contrário da medição de comprimentos, vindo de encontro à simplificação da pré-ajustagem de brocas e fresas.

Os erros observados nas medições de diâmetro são excessivos, podendo-se atribuí-los a: excentricidade da ferramenta, ângulo da hélice da broca, posição angular da broca, não paralelismo da face do sensor com o plano coordenado yz.

Acrescenta-se que, na determinação de um diâmetro, os erros manifestam-se em dupla magnitude, uma vez que é o raio propriamente medido. Melhores resultados podem ser alcançados com o uso de um apalpador (ou dispositivo de medição) apto a medir nos dois sentidos, ou ainda, sensores ópticos capazes de medir a ferramenta sob movimento de rotação.

Para o caso da verificação automática dos parâmetros (caso b), avaliou-se apenas a medição de uma fresa (diâmetro de 25 mm) simulando diferentes erros pela definição de distintos parâmetros nominais. Frente aos erros, o programa pode tomar ações como citadas a seguir, estando na figura 6.4 ilustrado o

## a) SIMULAÇÃO 1

```

COMPR NOMINAL
Z      53.000
      112000.000
DIAM NOMINAL
r      53.000
      25000.000
COORD DMF EM Z
r      37.000
      246684.000
COORD DMF EM X
r      38.000
      12920.000
MED PROG FER
Pto 39
X      54254
Y      15000
Z      338951
COMPRIMENTO L
      112266.982
ERRO EM L
      266.982
Pto 39
X      20356
Y      25000
Z      289975
DIAMETRO=
      25127.369
ERRO EM D
      127.369
Faca mop ED,SE,
CLR, fcont, AVF
CLR, ret mop ant
Faca mop ED,SE,
CLR, fcont, AVF
CLR, ret mop ant
INSTRUÇÕES PARA CORREÇÃO
AUTOMÁTICA DOS PARÂMETROS
NO CNC

PARÂMETROS REAIS:
COMPRIMENTO: 112,265 mm
DIÂMETRO: 25,130 mm

```

## b) SIMULAÇÃO 2

```

COMPR NOMINAL
Z      53.000
      112500.000
DIAM NOMINAL
r      53.000
      25400.000
COORD DMF EM Z
r      37.000
      246684.000
COORD DMF EM X
r      38.000
      12320.000
MED PROG FER
Pto 39
X      54055
Y      15000
Z      338946
TPOCAR FERRAM
DESVIO TOTAL
      -238.012
COMPRIMENTO L
      112261.938
ERRO EM L
      -238.012
Pto 39
X      20366
Y      25000
Z      289969
TPOCAR FERRAM
DESVIO TOTAL
      -291.339
DIAMETRO=
      25108.881
ERRO EM D
      -291.339
Faca mop ED,SE,
CLR, fcont, AVF
CLR, ret mop ant
Faca mop ED,SE,
CLR, fcont, AVF
CLR, ret mop ant
INSTRUÇÕES PARA CORREÇÃO
AUTOMÁTICA DOS PARÂMETROS
NO CNC

MENSAGEM DE ALERTA
ERRO TOTAL ACUMULADO
LIMITE ADOTADO:-200 µm
ERRO PELA MEDIÇÃO ATUAL
MENSAGEM DE ALERTA
ERRO TOTAL ACUMULADO
LIMITE ADOTADO:- 200 µm
ERRO PELA MEDIÇÃO ATUAL

```

FIG. 6.4 : Ações simuladas do programa para verificação automática de ferramentas

relatório impresso, obtido em duas medições simuladas:

- erro inferior a um valor admissível: é ignorado;
- erro positivo: o parâmetro é corrigido;
- erro acumulado negativo e inferior a um limite máximo: o parâmetro é corrigido (fig. 6.4.a);
- erro acumulado negativo e superior a um limite máximo: é emitido um alerta ao operador e o parâmetro é corrigido (fig. 6.4.b).

Observou-se que a repetibilidade dos resultados é melhor do que aquela alcançada na medição por comando manual, justificada pela semelhança das condições em que ocorrem as medições. Como o posicionamento da ferramenta é programado, entre sucessivas medições obtém-se os mesmos valores de deflexão e é a mesma, também, a posição de contato entre o sensor e a aresta de corte.

### 6.3 COMPENSAÇÃO DE ERROS NA MONTAGEM DA PEÇA PARA USINAGEM

Como trabalho de pesquisa na área de comando numérico, envolvendo o centro de usinagem utilizado neste SMCP, tem-se a fabricação de engrenagens cilíndricas de dentes curvos. A figura 6.5.a esquematiza o método de usinagem: o deslocamento angular da mesa determina o passo da engrenagem; por outro lado, com um movimento conjunto dos eixos x, z e b, uma ferramenta de forma (tipo barra de mandrilar) gera o perfil do dente.

O desalinhamento entre o eixo do pino de montagem da engrenagem e o eixo de rotação da mesa afeta diretamente a qualidade da peça obtida, por resultar em dentes com altura variável. Propôs-se, com auxílio do SMCP, determinar a excentricidade do pino e compensar os erros durante usinagem da engrenagem. Pela sua simplicidade e flexibilidade, o método mostra-se adequado à fabricação de peças em pequeno número e que exijam suportes variados.

A excentricidade do pino de montagem é analisada a partir da medição do seu deslocamento segundo a direção x, em diversas posições angulares da mesa (fig. 6.5.b). Estes deslocamentos são memorizados pelo processador, e, na fase de usinagem, são corrigidos para cada dente alterando-se a posição da origem da peça. Como o número de posições medidas certamente é inferior ao número de dentes a usinar, o erro para as posições intermediárias são calculados por interpolação linear.

Foram desenvolvidos dois programas para testar o método:

- programa para a determinação dos erros, previsto para medir um pino qualquer em oito posições angulares simétricas, pelo método ilustrado na figura 6.5.b;
- programa para simular a fabricação de uma engrenagem, onde a usinagem de cada dente é substituída pela medição do próprio pino na direção z, com um transdutor de deslocamento (fig. 6.5.c); esta medição é diferencial e informa o erro residual na direção z após a compensação.



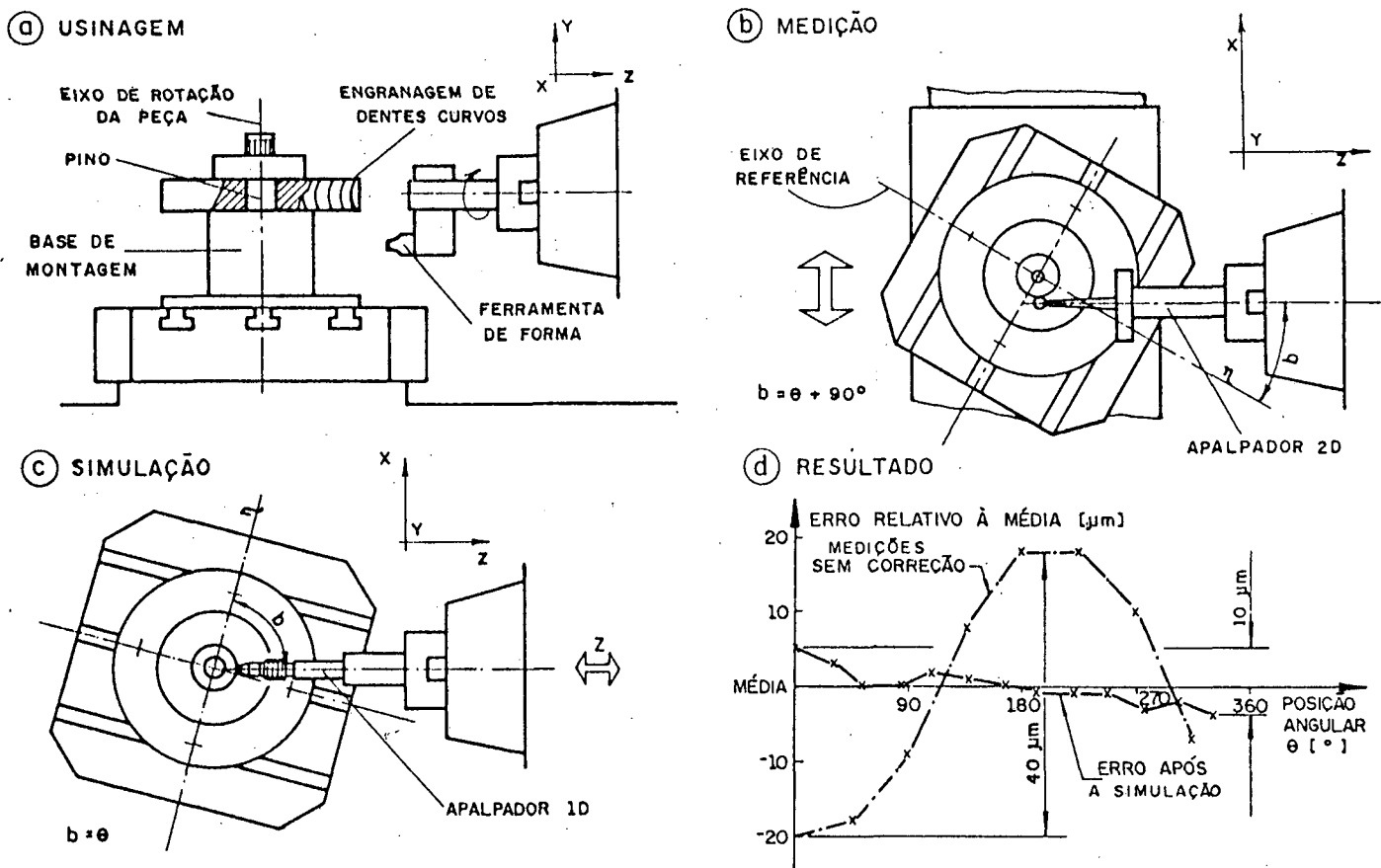


FIG. 6.5 : Medição e compensação da excentricidade de um suporte para a fabricação de engrenagens

Uma comparação de resultados é mostrada na figura 6.5.d, pela qual observa-se que:

- o pino de montagem possui um desalinhamento (excentricidade) de  $\pm 20 \mu\text{m}$ ;
- na simulação da usinagem, detecta-se um desalinhamento residual de  $\pm 5 \mu\text{m}$ , o que expressa a melhoria alcançada.

Acrescenta-se que os erros determinados inicialmente foram confirmados pela execução da simulação, realizada com base em valores de compensação nulos.

Destaca-se que este método de detecção e compensação de erros pode ser aplicado, por exemplo, para corrigir deformações localizadas devidas aos esforços de usinagem.

### 6.4 VERIFICAÇÃO DA PRECISÃO DA MÁQUINA FERRAMENTA

Objetiva-se demonstrar a aplicação do SMCP na realização de ensaios geométricos da própria máquina ferramenta de modo automático (autoverificação), com base em padrões materializados. Pela sua importância, escolheu-se o ensaio de posicionamento, que, mediante uma adequação do procedimento matemático, pode ser utilizado ainda como um ensaio de precisão do SMCP, aplicado à determinação de coordenadas.

Como padrão de comprimento, serve-se de uma coluna micrométrica, esquematizada na figura 6.6. O erro de posicionamento corresponde à diferença entre a posição de cada face de referência da coluna, determinada pelo SMCP, e a sua

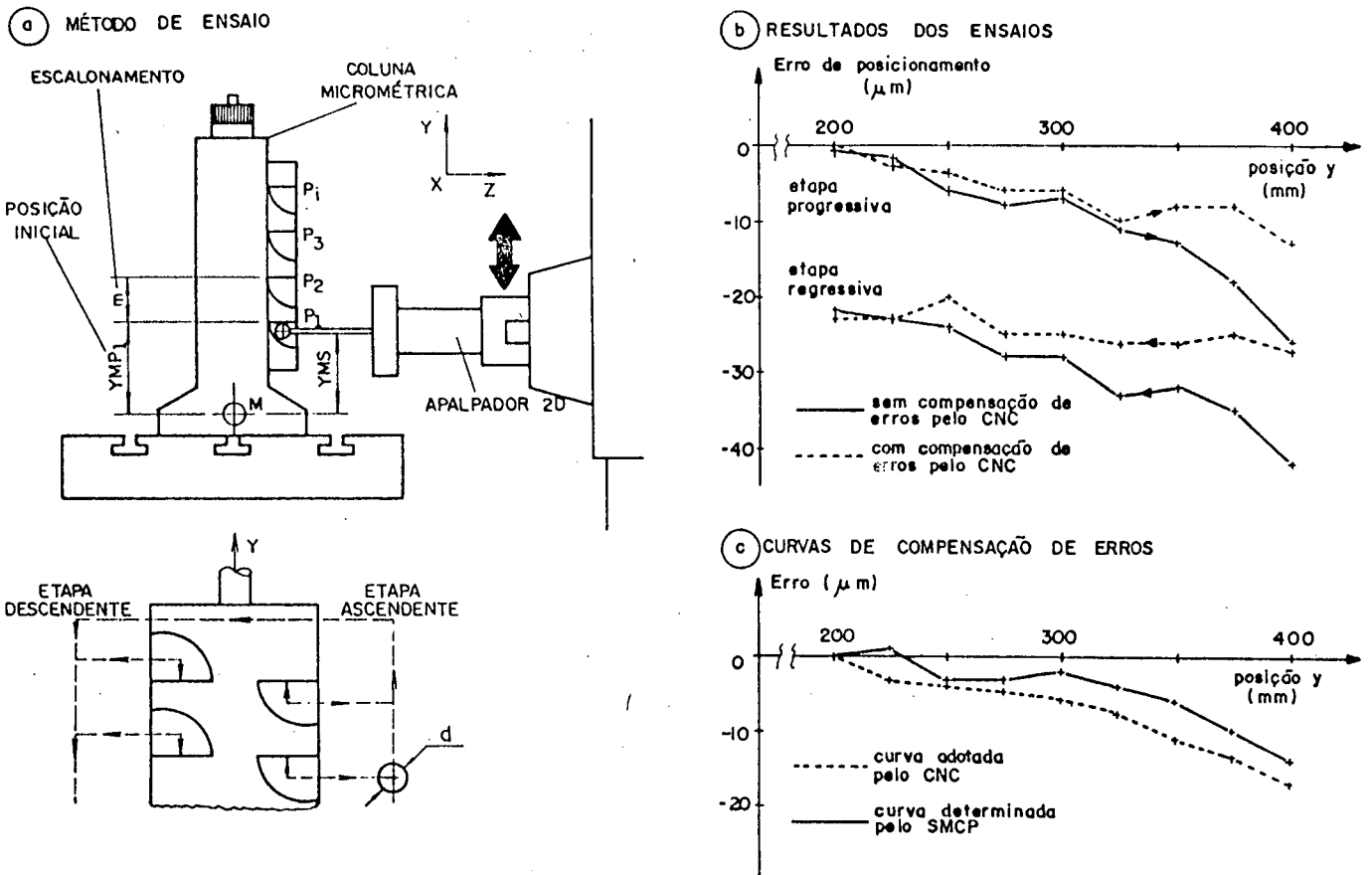


FIG. 6.6 : Ensaio de posicionamento pelo SMCP

posição nominal conhecida. Como a coluna dispõe de faces de referência para ambos os sentidos, é possível a verificação do posicionamento nos modos progressivo e regressivo, ou seja, para valores de coordenadas crescentes e decrescentes, respectivamente /37/.

O ensaio foi realizado apenas para o eixo y, que corresponde à condição mais desfavorável, podendo-se realizá-lo para os demais eixos segundo a mesma sistemática. Um programa de medição conduz o desenrolar das seguintes operações:

- verificação do alinhamento da coluna com o eixo de medição;
- ajuste da primeira face de medição da coluna micrométrica, de modo que ocupe uma posição de referência desejada;
- desenvolvimento automático de um número desejado de ciclos de medição, envolvendo as etapas progressiva e regressiva.

O CNC do centro de usinagem utilizado possui, para cada eixo de movimento, a capacidade de compensação interna dos erros de posicionamento. Como não se dispõe de um ensaio de posicionamento para comprovação dos resultados alcançados pelo SMCP, lançou-se a seguinte proposta: confrontar a curva de compensação adotada pelo CNC (obtida pelo fabricante) com a determinada pelo SMCP. Para tanto foram realizados dois ensaios de posicionamento: um com a compensação dos erros pelo CNC, e outro dispensando-a. Os valores calculados como diferença entre os erros determinados em cada ensaio, definiram a curva de compensação determinada pelo SMCP.

Sobre os dados brutos do ensaio são aplicadas correções relativas à posição da face inicial e à temperatura diferencial entre a coluna e máquina, chegando-se aos resultados representados na figura 6.6.b. O ensaio foi realizado com a máquina em condições de temperatura fora de operação. Destaca-se que a grande histerese observada pelas curvas dos erros deve-se, não propriamente à máquina, mas à uma pequena inclinação da coluna, do que decorre uma diferença das posições das faces opostas de um mesmo escalão. Obteve-se um desvio padrão inferior a  $2 \mu\text{m}$  ( $m=3$ ).

A figura 6.6.c representa a curva de compensação dos erros, média entre as etapas progressiva e regressiva, determinada pelo SMCP. Observa-se a boa concordância desta curva com aquela adotada pelo CNC. Uma comprovação segura dos resultados depende, entretanto, de um criterioso ensaio de posicionamento, realizado, por exemplo, com laser interferométrico.

A maior importância neste tipo de aplicação do SMCP está na facilidade e na rapidez de execução dos ensaios. Neste exemplo, para a ajustagem da coluna e a realização de 4 ciclos de medição, foi consumido um tempo total de 40 min.

## 6.5 MEDIÇÃO DE PEÇAS

A medição de algumas peças teve como objetivos avaliar a precisão oferecida pelo SMCP, comprovar a operação das funções de medição implementadas no sistema, e ainda demonstrar uma medição automática de peças.

Foram desenvolvidas medições:

- por comando manual, de um bloco padrão (50 mm) e de um anel padrão (diâmetro de 50 mm), sob as condições mais críticas, ou seja, sob diferentes orientações de aproximação e diversas posições de montagem;
- por comando automático, de uma peça modelo, constituída de diversos corpos geométricos montados sobre uma mesma base (fig. 6.7.a).

Neste segundo caso, foi elaborado um programa de medição da peça modelo no plano x y, contendo as seguintes etapas:

- determinação da origem da peça por comando manual;
- verificação automática da posição angular da peça;
- desenrolar da sequência automática de medição do prisma, do escalonado e do cilindro (fig. 6.7.b);
- medição do anel padrão por diversos pontos, em duas sequências distintas pelo modo de aproximação: uma normal à superfície, e

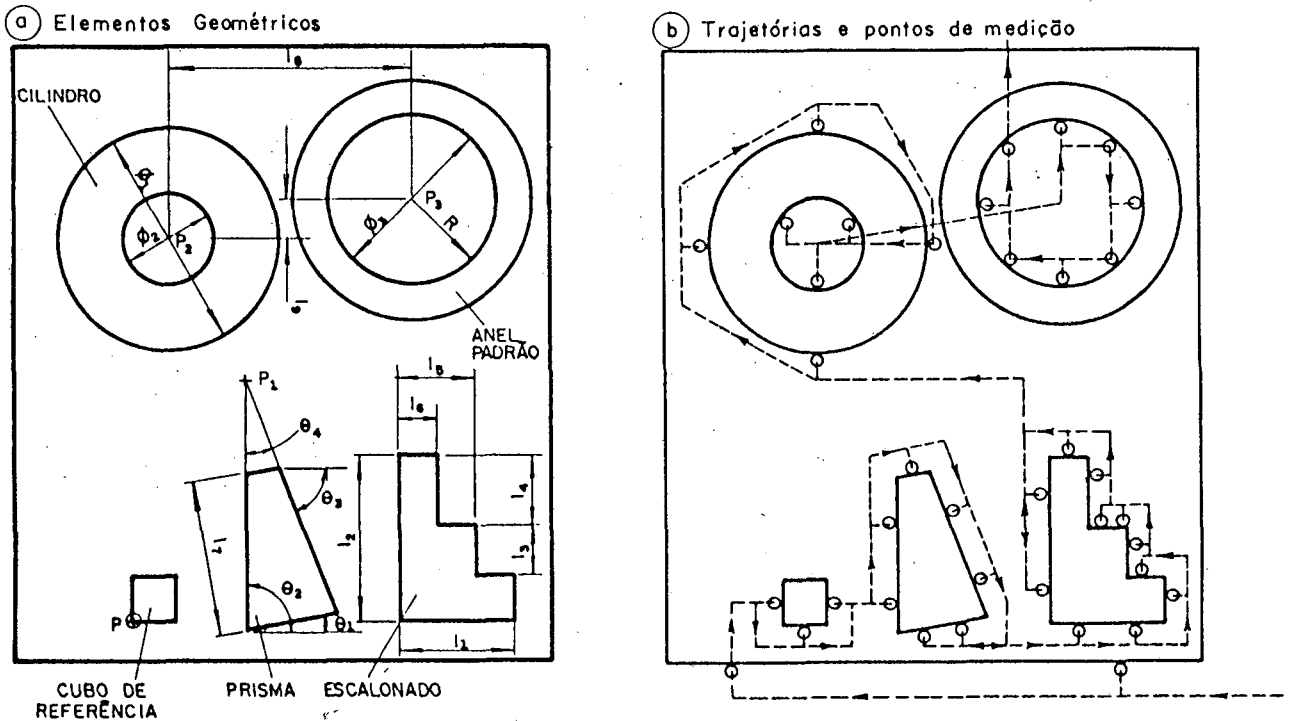


FIG. 6.7 : Peça modelo - elementos geométricos e pontos de medição

outra, segundo os eixos coordenados (x ou y).

A última etapa foi prevista para avaliar a influência do modo de aproximação sobre os resultados de uma medição.

As diversas medições por comando manual resultaram em valores com as seguintes características:

- comprimento do bloco padrão: erro médio:  $4 \mu\text{m}$   
desvio padrão:  $1 \mu\text{m}$  ( $m=6$ );
- diâmetro do anel padrão: erro médio =  $5 \mu\text{m}$   
desvio padrão =  $2 \mu\text{m}$  ( $m=8$ ).

A medição da peça modelo apresentou resultados com as seguintes características ( $m=3$ ):

- medições de comprimentos:
  - faixa dos erros: até  $30 \mu\text{m}$
  - faixa dos desvios padrão: até  $3 \mu\text{m}$
- medições angulares
  - faixa dos erros: até  $1'$

- faixa dos desvios padrão: até 5"
- medições dos diâmetros (internos e externos, por três pontos):
  - faixa dos erros:  $\pm 15 \mu\text{m}$
  - faixa dos desvios padrão: até 2  $\mu\text{m}$ .
- posição dos centros do cilindro e do anel padrão:
  - faixa dos desvios padrão: até 2  $\mu\text{m}$ .

As posições dos centros de circunferências não foram analisadas quanto à exatidão pois dependem da posição angular da peça, obtida na montagem. Nas etapas executadas automaticamente, dispende-se um tempo aproximado de 10 minutos.

Destas medições pode-se concluir que:

- para adequada segurança, as medições por comando manual devem ser conduzidas sob baixas velocidades de avanço, pois o centro de usinagem é preparado para uma operação automática;
- em contrapartida, a medição por comando automático pode ser desenvolvida com rapidez, demonstrando a sua adequabilidade ao controle geométrico na própria máquina ferramenta; o tempo de execução do programa para a peça modelo pode ainda em muito ser minimizado;
- o apalpador utilizado constitui uma fonte significativa de erros, tendo-se observado que as medições apresentam melhor repetibilidade quando desenvolvidas nas mesmas condições de deflexão;
- nas medições do anel padrão não foi observada diferença significativa entre os erros obtidos por aproximação normal e inclinada.

## 7. CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho empreenderam-se esforços para obter um amplo levantamento de informações sobre a temática da medição por coordenadas no processo. Ao final, tendo-se alcançado o domínio da tecnologia, a implantação e operacionalização de um sistema experimental, e o desenvolvimento de alguns programas aplicativos, pode-se apresentar como conclusões mais importantes:

### a) Sobre a tecnologia

- A medição por coordenadas no processo vem de encontro ao princípio da flexibilidade, continuamente buscada pelos modernos sistemas de fabricação.
- A análise da viabilidade de implantação de um SMCP deve considerar tanto os fatores de custo e exeqüibilidade técnica, como a potencialidade do sistema em oferecer uma racionalização do processo com ganho de tempo de máquinas e/ou assegurar ganho de qualidade na fabricação.
- Um SMCP traz consigo a exigência de uma maior especialização do pessoal técnico envolvido com a máquina ferramenta CN e o controle de qualidade, de modo que o programador e o metrologista passam a interagir.
- A maior difusão das técnicas de medição por coordenadas no processo requer dos fabricantes de comandos numéricos integrar no próprio CNC recursos de medição, para o que já existem algumas iniciativas, ou colocar à disposição meios para a implantação de sistemas complementares.
- As configurações de SMCP's propostas neste trabalho visaram a sua implementação em máquinas ferramentas CN convencionais. Entretanto, para chegar a termo, a tecnologia deve ser transferida aos comandos numéricos (CNC), através de uma integração global a nível de "hardware", "software", e programas aplicativos.
- Ao lado de SMCP's programáveis, permanecem campos abertos a

sistemas dedicados, por exemplo, para a medição diferencial de peças e ferramentas ou para a medição por comando manual de peças. Um amadurecimento técnico deve ser alcançado por configurações modulares, em "hardware" e "software", que atendam de um lado à diversidade dos sistemas de fabricação, e, de outro, implementações progressivas dos recursos do SMCP.

- Em sistemas flexíveis de fabricação ou grupo de máquinas, duas ou mais máquinas ferramentas podem ser controladas por um mesmo processador, capacitado para operar com processamento múltiplo. A IMAC deve entretanto ser dotada de conveniente autonomia para o desempenho das suas funções.

b) Sobre o sistema implantado

Alcançou-se um SMCP com elevado potencial para a medição com a própria máquina ferramenta, destacando-se como principais vantagens:

- universalidade, favorecida pela configuração adotada, podendo ainda ser facilmente adaptado para operar em tornos;
- flexibilidade na programação das tarefas de medição, graças à existência de uma linguagem própria às funções do controlador;
- disponibilidade de amplos recursos para realimentação nas medições integradas ao processo;
- viabilização da operação do centro de usinagem como máquina de medir por coordenadas.
- exeqüibilidade desta configuração, residindo os principais trabalhos no desenvolvimento da interface modular de aquisição e controle, e na programação do processador;
- simplicidade na conversão do sistema para operar pelo método absoluto, com apalpadores do tipo ligador.

As principais fontes de erro detectadas no sistema são:

- o apalpador 2D, desenvolvido com o objetivo primeiro de operacionalizar o sistema; níveis de precisão mais apropriados devem ser galgados com um novo protótipo;
- a máquina ferramenta, que apesar da compensação dos erros de posicionamento pelo CNC, apresentou ainda significativos erros



- residuais; somente com ensaios geométricos, que envolvam também condições efetivas da máquina em produção, pode-se avaliar a influência dos seus erros sobre a precisão do SMCP;
- a oscilação angular da árvore do centro de usinagem, que deve ser solucionada com um sistema para sua estabilização, ou ser contornada por um mecanismo total ou parcialmente independente da árvore;
  - o ajuste dos sensores do dispositivo para medição de ferramentas, que deve ser alcançado por um projeto mais favorável e maior precisão na fabricação.

As principais dificuldades para implantação do SMCP residiram em:

- estabelecer a configuração genérica e exeqüível do sistema, os modos de operação, e definir todas as funções de medição por comando automático;
- implementar o programa do processador;
- definir o projeto da interface de aquisição das coordenadas, por tratar-se de um circuito específico a esta saída do CNC;
- operacionalizar o sistema, devido ao elevado risco envolvido nos testes, em função da complexidade e autonomia do sistema.

As principais desvantagens do sistema são:

- sua relativa dificuldade de programação, dado o caráter protótipo da sua linguagem;
- sub-utilização da memória do CNC.

c) Sobre a possível continuidade do trabalho

Sugere-se as seguintes atividades:

- estudo de uma sistemática adequada e a implantação da compensação dos erros geométricos da máquina ferramenta pelo processador;
- implantação da supervisão direta da deflexão e atuação da parada do avanço da máquina pelo controlador, com vistas à segurança operacional do SMCP;
- pesquisa de metodologias, dispositivos e sensores mais adequados à medição de ferramentas;

- elaboração de programas aplicativos especiais, com vistas a, por exemplo, medição de peças e ferramentas por famílias;
- implementação de mais recursos de processamento geométrico, em especial, para a determinação de elementos geométricos por coordenadas;
- estudo da metodologia de medição, das condições operacionais e a adequação do SMCP para a medição contínua de contornos;
- desenvolvimento de programas específicos para o processamento de um controle estatístico de qualidade com o SMCP;
- implementação de macrofunções no editor de programas, de modo que algumas tarefas de medição sejam automaticamente convertidas nos trechos de programa de medição a partir das informações características destas tarefas;
- integração do SMCP a uma rede de comunicação, com vistas ao compartilhamento de periféricos, bancos de dados, etc.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ GRUPO DE TRABALHO Prozessnahes Messen-Steigerung der Automatisierung/sicherung der Qualität; Industrie Anzeiger; vol. 103; n. 62; pág. 171-180; 7/1981.
- /2/ ARNOLD, W. SCHERER, J. Adaptative Control Beim Drehen, Fräsen und Bohren; Werkstatt und Betrieb; vol. 115; n. 8; pág. 489-572; 8/1982.
- /3/ STÖFERLE, Th. BELLMANN, B. Verschleissensoren für Adaptative Regelungen bei der Drehbearbeitung; Werkstatt und Betrieb; vol. 105; n. 8; pág. 577-582; 8/1972.
- /4/ GANTZLIN, J. GAST, Th. Ein schnelles automatisches Antastsystem für die Im-Prozess-Messung bei der Drehbearbeitung; Feinwerktechnik und Messtechnik; vol. 87; n. 5; pág. 221-226; 5/1975.
- /5/ Rollrad- Messsystem zum rationellen Erfassen von Durchmessern; VDI-Z; vol. 10; pág. 336; 5/1984.
- /6/ BAUMGARTNER, H. Messgeregeltes Drehen - ein Schritt zur unbemannten Fertigung; Werkstatt und Betrieb; vol. 115; n. 6; pág. 367-371; 6/1982.
- /7/ STÖCKMANN, P. Itegrierte Mess-Steuerung einer Drehmaschine. Werkstatt un Betrieb. vol. 105; n. 9; pág. 637-639; 9/1972.
- /8/ ARMBRUSTER, N. BADUR, K. Messsteuerung für CNC-Drehmaschinen; wt-Z.ind. Fertigung; vol. 70; n. 8; pág. 511-514; 8/1980.

- /9/ PRITSCHOW, G. Automatisierte Qualitätssicherung in der NC-Fertigung; ZWF; vol. 74; n. 5; pag. 226-229; 5/1979.
- /10/ PFEIFER, T.  
FÜRST, A. Advantages and Conditions for a Direct Measurement of the workpiece-geometry on NC-Machine Tools; Preprint of IFAC Symposium of Information Control Problems in Manufacturing Technology; Tokyo; 1977.
- /11/ PFEIFER, T.  
FÜRST, A. Werkstückvermessung auf NC(CNC)-Werkzeugmaschinen; IFAC Symposium; Stuttgart; 10/1979.
- /12/ PFEIFER, T.  
FÜRST, A. Prozessintermittierende Werkzeug - und Werkstückmessung auf NC-Werkzeugmaschinen Industrie Anzeiger; vol. 104; n. 27; pag. 18-23; 4/1982.
- /13/ PFEIFER, T.  
FÜRST, A.  
VOLLARD, W. In-Process Measurements of Workpieces and Tools; Seminar on Present Use and Prospects for Precision Measuring Instruments in Engineering Industries; 9/1982.
- /14/ SCHNEIDER, C.A.  
LÜCKE, H.A.A. Medição Automática em Máquinas-Ferramenta com Comando Numérico; Anais do 4º Congresso Brasileiro de Automática; 9/1982.
- /15/ RENISHAW 3D-Messtaster für Werkzeugmaschinen; Catálogo; Renishaw Electrical Limited; Gloucestershire; 1981.
- /16/ C.E. JOHANSSON Qualitätskontrolle direkt in der NC-CNC-Maschine mit drahtloser Übertragung von Messwerten; Catálogo; C.E. Johansson AB; Eskilstuna; 1978.
- /17/ MARPOSS Prospectos; Marposs Gesellschaft für Messsteuerung mbH; Witten; 1/1979.

- /18/ WONDRAČEK, U. Perfil de Características dos Apalpadores Comercializados; Relatório Interno LABMETRO-UFSC; Florianópolis; 11/1983.
- /19/ GUSEK, B.  
VOSSLOH, M. Messregelungen für spannende Fertigungsverfahren-automatisches Messen innerhalb der Maschine oder nachgeschaltet; Werkstatt und Betrieb; vol. 116; n. 11; pág. 641-650; 11/1983.
- /20/ FERRARI, A.V.F. Comando Numérico-Programação Econômica e Eficiente ao Alcance de todas Empresas; Prospecto de Divulgação TRAUBOMATIC Indústria e Comércio Ltda; Santo Amaro.
- /21/ SIEMENS Sinumerik-Messzyklen Beschreibung System 3/System 8; Siemens Aktiengesellschaft; edição 4; 1983.
- /22/ SIMON, W. The Numerical Control of Machine Tools; Carl Hanser Verlag; München; 1970.
- /23/ ZOLLER, E. Pré-Ajustagem de Ferramentas em Máquinas Operatrizes com Comando Numérico; Mundo Mecânico; n. 12; pág. 24-26; 12/1983.
- /24/ FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais; Vol. 1; Editora Edgard Blucher Ltda; São Paulo 1977.
- /25/ SASS, F.  
BOUCHE, Ch.  
LEITNER, A. Dubbel-Manual do Engenheiro Mecânico; edição 13 (alemã); Hemus Livraria Editora Ltda; 1979.
- /26/ GANTZLIN, J. Probleme der Im-Prozess-Messung bei der Drehbearbeitung; Qualität und Zuverlässigkeit; vol. 24; n. 4 pág. 85 - 88; 1979

- /27/ PFEIFER, T. Wege zur Bestimmung der Werkstückabmessung  
FÜRST, A. in der Bearbeitungsmaschine; VDI-Berichte;  
WIECHERN, R. n. 364; pag. 51-58; 1980.
- /28/ MAXITEC Sinumerik Sistema 3 - Comando Numérico  
Computadorizado; Prospecto; Maxitec S.A.;  
São Paulo.
- /29/ PFEIFER, T. Ermittlung der Messunsicherheit von 3D -  
BAMBACH, M. Tastsystemen; Technisches Messen; n. 2 e  
FÜRST, A. 4; pag. 47-52 e pag. 161-169; 1979.
- /30/ PFEIFER, T. Prozessintermittierende Messung auf NC-  
FÜRST, A. Werkzeugmaschinen. Industrie Anzeiger;  
vol. 101; n. 100; pag. 20-25; 12/1979
- /31/ FÜRST, A. NC-Maschine kontrolliert sich selbst ;  
VOLLARD, W. VDI Nachrichten; n. 7. pag. 10-11; 02/  
1982
- /32/ SONNEK, W. Werkzeugmessung statt Werkzeugvorein-  
stellung am Beispiel einer CNC-Drehmaschi  
ne mit Handeigabesteuerung; Werkstatt  
und Betrieb; vol. 112; n. 9; pag. 641-  
644; 9/1979.
- /33/ ZEISS Universal-Messmaschine UMM-500; Prospecto  
Carl Zeiss; Oberkochen; 1977.
- /34/ LEITZ Leitz Mescal-Programmbibliothek für CNC -  
Koordinatenmessgeräte; Prospecto; Ernst  
Leitz Wetzlar GmbH; Wetzlar; 1983.
- /35/ MITUTOYO Mikropak 100- Series 320 - Data Processor  
for Three Coordinate Measurement;  
Prospecto; Mitutoyo Mfg. Co. Ltd.; Tokyo;  
1984.

- /36/ VDI/DGQ VDI/DGQ 3441 - Statistische Prüfung der Arbeits und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen - Grundlagen (antiga VDI 3254); Verein Deutscher Ingenieure/Deutsche Gesellschaft für Qualität; VDI Verlag GmbH; Düsseldorf; 1977.
- /37/ SILVA, A.D. Ensaio Geométricos de Peças e Máquinas - Uma Metodologia Automatizada; Dissertação de Mestrado; UFSC; Florianópolis; 2/1984.
- /38/ CMMA CMMA - Genauigkeitsspezifikation für Koordinaten-Messgeräten; Messen und Prüfen; n. 1/2; pág. 48-52; 2/1983.
- /39/ PFEIFER, T.  
BAMBACH, M. Definition und Prüfung von Kriterien zur Bestimmung systematischer und zufälliger Fehler von Drei-Koordinaten-Messgeräten; Forschungsberichte des Landes Nord-Rhein-Westfalen; n. 2856; Westdeutscher Verlag; 1979.
- /40/ FERREIRA, A.C. Curso de Introdução ao Comando Numérico - Operação Siemens Sistema 7; Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC - Grupo de Comando Numérico; Florianópolis; 8/1982.
- /41/ VDI 3254 Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen Genauigkeitsangaben, Blatt 1 - Begriffe und statische Kenngrößen, Blatt 2 - Messen statischer Kenngrößen; Verein Deutscher Ingenieure; VDI Verlag GmbH; Düsseldorf; 1971.
- /42/ SIEMENS Sinumerik- System 7 - Schaltungsbeschreibung, Teil 1; Siemens Aktiengesellschaft ed. 11.77 - E32; 1977.
- /43/ TESA Electronic Length Measuring Gauge Heads; TESA S.A. Precision Measuring Instruments; Renens.

- /44/ TESA Eletronic Length Measuring System - Instructions for Use; TESA S.A. Precision Measuring Instruments; Renens.
- /45/ HEWLETT PACKARD HP 9895A Disc Programming; RL 0262; Hewllet Packard; Fort Collins; 1980.
- /46/ HEWLETT PACKARD 9825 B/T Desktop Computer Especifications RL 398; Hewlett Packard; Fort Collins; 5/1980.
- /47/ HOSS, C. P. Construção de uma interface BCD entre furadeira de coordenadas ou CNC e o Microcomputador HP 9825; Relatório interno TL-100/84; LABMETRO/UFSC; Florianópolis; 1984.
- /48/ HEWLETT PACKARD HP 6942A Multiprogrammer User Guide; RL- 267; Hewlett Packard; Loveland; 11/1979.
- /49/ HEWLETT PACKARD HP 3497A - Data Aquisition/Control Unit Operating and Service Manual; RL- 400; Hewlett Packard; Loveland; 1980.
- /50/ VEIGA, C.L.N. Calibração do Apalpador 2D; Relatório interno TL-181/84; LABMETRO/UFSC; Florianópolis; 1984.
- /51/ FISCHER, A.L. Calibração dos transdutores do dispositivo para medição de ferramentas do SMCP; Relatório interno TL-310/85; LABMETRO/UFSC; Florianópolis; 1985.
- /52/ WONDRAČEK, U. Operação e comportamento da árvore principal do centro de usinagem Nbh -65; Relatório interno TL-139/83; LABMETRO / UFSC; Florianópolis; 1983.