

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

PARA CONTROLE GEOMÉTRICO

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

MILTON WETZEL PEREIRA

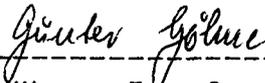
FLORIANÓPOLIS, MAIO DE 1991

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO
PARA CONTROLE GEOMÉTRICO

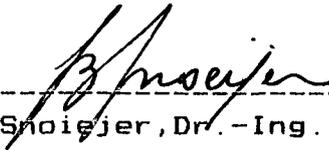
MILTON WETZEL PEREIRA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
METROLOGIA E AUTOMAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.

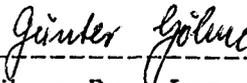


Prof. Günter Höhne, Dr.-Ing., Orientador



Prof. Berend Snoeijer, Dr.-Ing., Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



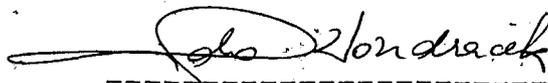
Prof. Günter Höhne, Dr.-Ing., Presidente



Prof. Nelson Back, Ph.D.



Prof. Armando A. Gonçalves Jr., Dr. Eng.



Eng. Udo Wondracek, M.Eng.

AGRADECIMENTOS

Ao nosso Senhor, nosso Deus, sem o qual nada seria possível;

Aos meus pais pelo incansável apoio ao longo de todos estes anos;

Ao professor Günter Hoehne pela inestimável orientação prestada e pela amizade contínua;

Ao professor Carlos Alberto Schneider, coordenador do Labmetro e superintendente geral da Fundação CERTI, pela co-orientação deste trabalho;

À Fundação CERTI, pela infra-estrutura e serviços laboratoriais prestados e ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, pelo Curso de Pós-Graduação e orientação dos professores;

Ao CNPq-SINST/PADCT, que possibilitou o desenvolvimento de protótipos experimentais, através de auxílio financeiro;

Aos acadêmicos Nilo Hermann e André Manzolli pela colaboração na realização dos trabalhos;

As secretárias Margibel Adriana de Oliveira e Rosalva Stock pela colaboração na datilografia e digitação;

Aos demais colegas de trabalho do CERTI/LABMETRO e professores, que direta ou indiretamente deram sua valiosa colaboração e o seu prestimoso incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO PARA CONTROLE GEOMÉTRICO

SUMÁRIO

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	II
GLOSSÁRIO.....	III
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONCEITO E FINALIDADE DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO...	1
1.2 TIPOS DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO.....	3
1.3 ESTADO DA ARTE.....	4
1.4 MOTIVADORES PARA O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO NA ÁREA	9
1.5 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	9
2. FUNDAMENTOS DE PROJETO DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO.....	11
2.1 REQUISITOS GERAIS.....	11
2.2 FUNÇÃO GLOBAL DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO.....	12
2.3 SUBFUNÇÕES DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO.....	15
2.2.1 Medir.....	16
2.2.2 Posicionar.....	22
2.2.3 Fixar.....	27
2.2.4 Guiar.....	30
2.2.5 Suportar.....	35
3. SISTEMÁTICA DE DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO	37
3.1 SISTEMÁTICA DE DESENVOLVIMENTO.....	37
3.2 DESCRIÇÃO DAS FASES DE DESENVOLVIMENTO.....	39
3.2.1 Caracterização da tarefa.....	39
3.2.2 Detalhamento da tarefa.....	41
3.2.3 Definição do processo de medição.....	42
3.2.4 Concepção do dispositivo de medição.....	45
3.2.5 Esboço do protótipo	50
3.2.6 Análise teórica dos erros de medição.....	51
3.2.7 Projeto, fabricação e montagem do protótipo..	59
3.2.8 Qualificação e fabricação do protótipo.....	60
3.2.9 Avaliação dos resultados.....	65
3.2.10 Documentação.....	66

4. DESENVOLVIMENTO DE CONJUNTO MODULAR DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO.....	70
4.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES NA APLICAÇÃO.....	71
4.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE CONJUNTOS MODULARES.....	72
4.2.1 Modularidade.....	73
4.2.2 Flexibilidade.....	75
4.2.3 Versatilidade.....	75
4.2.4 Intercambiabilidade.....	77
4.2.5 Qualidade.....	78
4.2.6 Racionalização de elementos.....	78
4.3 ELEMENTOS FUNCIONAIS.....	80
4.4 FORMAS CONSTRUTIVAS TÍPICAS DE CONJUNTOS MODULARES.....	82
4.4.1 Componentes básicos de dispositivos para peças cilíndricas longas.....	82
4.4.2 Componentes básicos de dispositivos para peças cilíndricas curtas ou peças prismáticas.....	84
4.5 PROJETO DO CONJUNTO MODULAR PARA DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO.....	85
4.5.1 Definição dos elementos do conjunto.....	86
4.5.2 Configuração de montagem dos dispositivos de medição.....	102
4.6 ENSAIO DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO.....	104
4.6.1 Análise teórica dos Erros do protótipo laboratorial.....	106
4.6.2 Descrição do ensaio.....	106
4.6.3 Execução do ensaio.....	111
4.6.4 Determinação dos erros de medição.....	111
4.6.5 Análise dos resultados.....	113
4.6.6 Sugestões de Melhorias.....	115
5. PROJETO AUXILIADO POR COMPUTADOR DE DISPOSITIVOS MODULARES DE MEDIÇÃO.....	116
5.1 CONFIGURAÇÃO DA BIBLIOTECA DE ELEMENTOS.....	117
5.2 ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE DISPOSITIVOS.....	120
5.3 COMPARAÇÃO COM OUTROS PROGRAMAS DE CAD PRA PROJETO DE DISPOSITIVOS.....	122
5.4 INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES.....	123
6. CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS PARA APLICAÇÃO DE CONJUNTOS MODULARES DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO.....	126
6.1 COMPARAÇÃO DE CUSTOS.....	127

7. CONCLUSÕES	134
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137

RESUMO

Com as exigências crescentes, de elevação da qualidade dos produtos e racionalização dos meios de produção, os dispositivos de medição ganharam importância significativa no controle dimensional e geométrico de peças junto aos processos de fabricação.

Neste trabalho, a partir da função global "Medir", são analisadas e descritas as subfunções e elementos funcionais dos dispositivos de medição, estabelecendo-se a seguir uma sistemática geral para seu desenvolvimento.

Com o objetivo de atender a diferentes tarefas de medição num curto espaço de tempo, foi estudado, construído e experimentado o protótipo de um conjunto modular para composição de dispositivos de medição.

No trabalho, a partir de um programa de CAD existente, foi desenvolvida uma biblioteca gráfica correspondente aos elementos do conjunto modular elaborado. A biblioteca é configurada através de "menus" para seleção das peças necessárias na montagem das vistas desejadas do dispositivo de medição no microcomputador.

Finalmente, é delimitado o campo de aplicação dos conjuntos modulares em comparação com as outras técnicas atualmente adotadas, bem como é apresentada uma sequência de cálculo para avaliação da viabilidade econômica de adoção de dispositivos modulares em relação aos dispositivos especiais de medição.

ABSTRACT

With the increasing exigence, the elevation of the product's quality and rationalization of the production, the gauging fixtures gained a significative importance in the geometrical control of workpieces in the fabrication processes.

In this work, the general function "Measure", the subfunctions and functional elements of gauging fixtures, are analised and described, to be establish a general systematic for development of this.

With the objective of attending different measuring tasks in a very short time, has been studied, constructed and experimented one prototype of a Modular Gauging System.

From an existent software of CAD, has been developed a graphic library, corresponding to the elements of the elaborated modular system. The library is configured through "menus", to select the necessary mounting pieces for the gauging fixture.

Finally, the application field of the Modular Gauging System is delimited in comparison with the other techniques actually used, also a calculation method is presented to evaluate the economic viability of using the modular fixtures in relation with the special gauging fixtures.

GLOSSÁRIO

DAS SIGLAS E ACROGRAMAS ADOTADAS NO TEXTO

SIGLA	INGLÊS	PORTUGUÊS
CAD	Computer Aided Design	projeto auxiliado por computador
CAM	Computer Aided Manufacturing	manufatura auxiliada por computador
CAQ	Computer Aided Quality	qualidade auxiliada
CIM	Computer Integrated Manufacturing	manufatura integrada por computador
CMM	Coordinate Measuring Machine	máquina de medir por coordenadas
CNC	Computerized Numerical Control	comando numérico computadorizado
TD	Displacement Transducer	transdutor de deslocamento
FMS	Flexible Manufacturing System	sistema flexível de manufatura
CG	Geometrical Control	controle geométrico
Dm	Gauging Fixture	dispositivo de medição
CMD	Modular Fixture System	conjunto modular de dispositivos
MT	Machine Tool	máquina-ferramenta
PC	Personal Computer	computador pessoal
SPC	Statistical Process Control	controle estatístico do processo

1 INTRODUÇÃO

As exigências crescentes de produtividade e elevação da qualidade dos produtos tem por consequência um aumento significativo das atividades de controle geométrico (CG) de peças junto aos processos de fabricação.

A metrologia industrial, tem portanto, a tarefa de fornecer os meios de medição adequados ao controle de peças com um diversificado espectro de geometrias, de simples à extremamente complexas.

No entanto, dependendo das exigências de precisão, do tipo e quantidade de peças e parâmetros geométricos a serem controlados em cada peça a medir, os meios de controle convencionais (paquímetro, micrômetro, etc.), podem resultar em despesas consideráveis, inviabilizando assim sua aplicação.

Neste âmbito, consolida-se cada vez mais, o reconhecimento de que a racionalização, bem como a confiabilidade e simplicidade do processo de inspeção, dependem em grande parte da atividade objetiva e metódica de projeto de dispositivos de medição (Dm) integráveis aos processos produtivos.

Assim sendo, este trabalho apresentará uma sistemática para desenvolvimento de Dm, além da concepção, construção e experimentação de um conjunto modular de dispositivos (CMD), objetivando preencher os requisitos básicos necessários à preparação destes em um curto espaço de tempo, suprimindo as necessidades laboratoriais e industriais de CG.

1.1 CONCEITO E FINALIDADE DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

Os Dm tem por finalidade fornecer à indústria, os meios de controle necessários, quando as mesmas ou semelhantes tarefas de CG são freqüentemente realizadas.

Assim, estes dispositivos são projetados para possibilitar a incorporação dos conhecidos métodos e instrumentos de medição existentes, bem como sua integração junto aos processos de fabricação.

Os Dm considerados nesta abordagem, são constituídos de um sistema de medição, representado por transdutores de deslocamento (TD) e a respectiva unidade de tratamento de sinais (UTS) e indicação, e do dispositivo com componentes mecânicos para o posicionamento e fixação da peça a medir e dos TD (fig. 1.1).

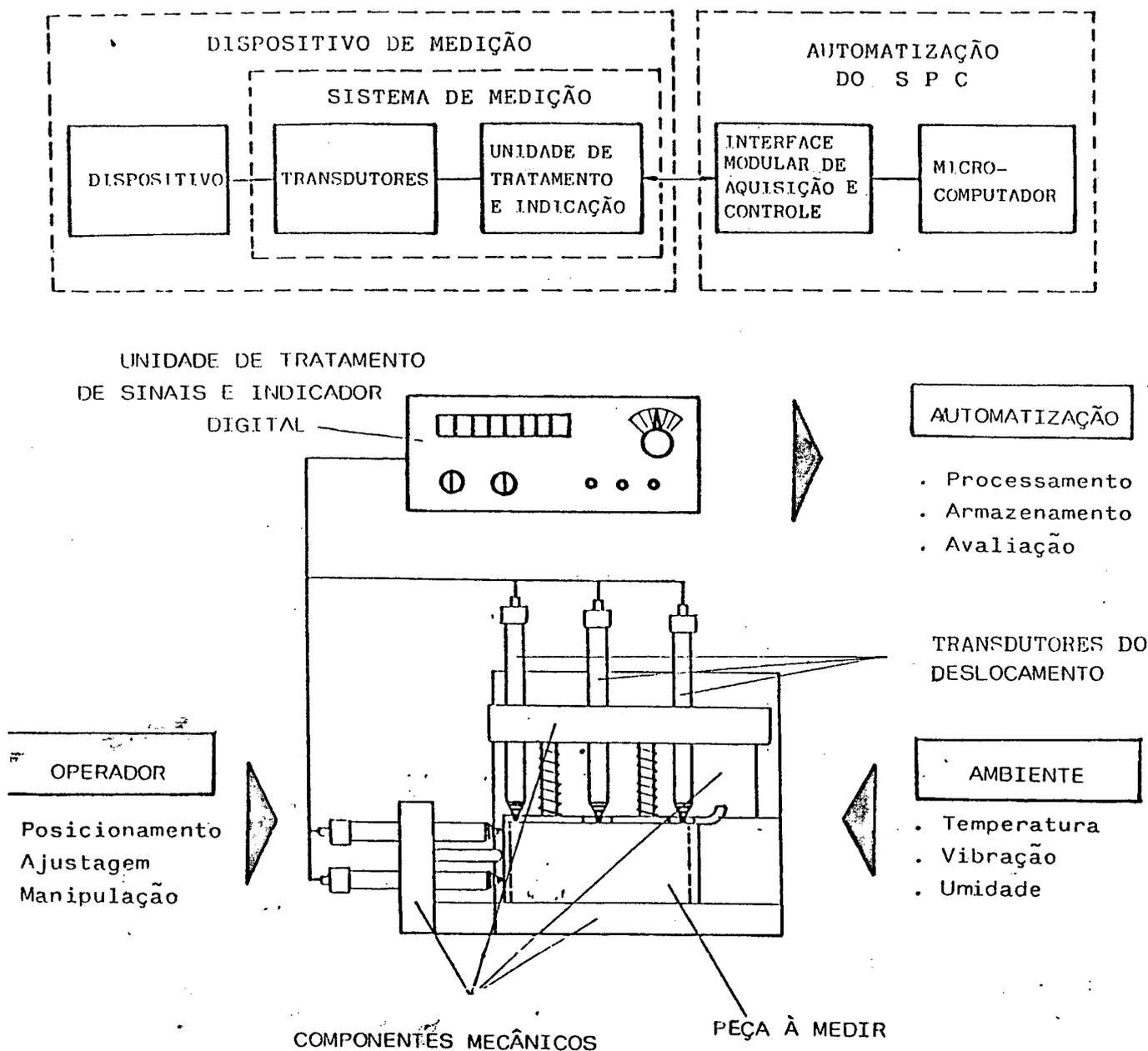


Fig. 1.1 - Constituição do dispositivo de medição

Os objetivos fundamentais da adoção de Dm na indústria, consistem em:

- estabilidade e rapidez de posicionamento da peça a medir;
- baixos custos de CG pela simplificação do processo de medição;
- alta confiabilidade do controle geométrico, com a eliminação de erros devido à falhas humanas;
- flexibilidade para execução de tarefas complexas de medição multidimensional, com reduzido esforço mental e físico do operador;
- curto espaço de tempo para o processo de medição;
- viabilidade na automatização da operação, do processo de medição e do controle estatístico do processo (SPC) na indústria.

1.2 TIPOS DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

A configuração de Dm pode ser diferenciada em função dos requisitos e condições de medição desejadas para cada peça à medir. Neste sentido, propõe-se a seguinte subdivisão dos Dm: (fig. 1.2)

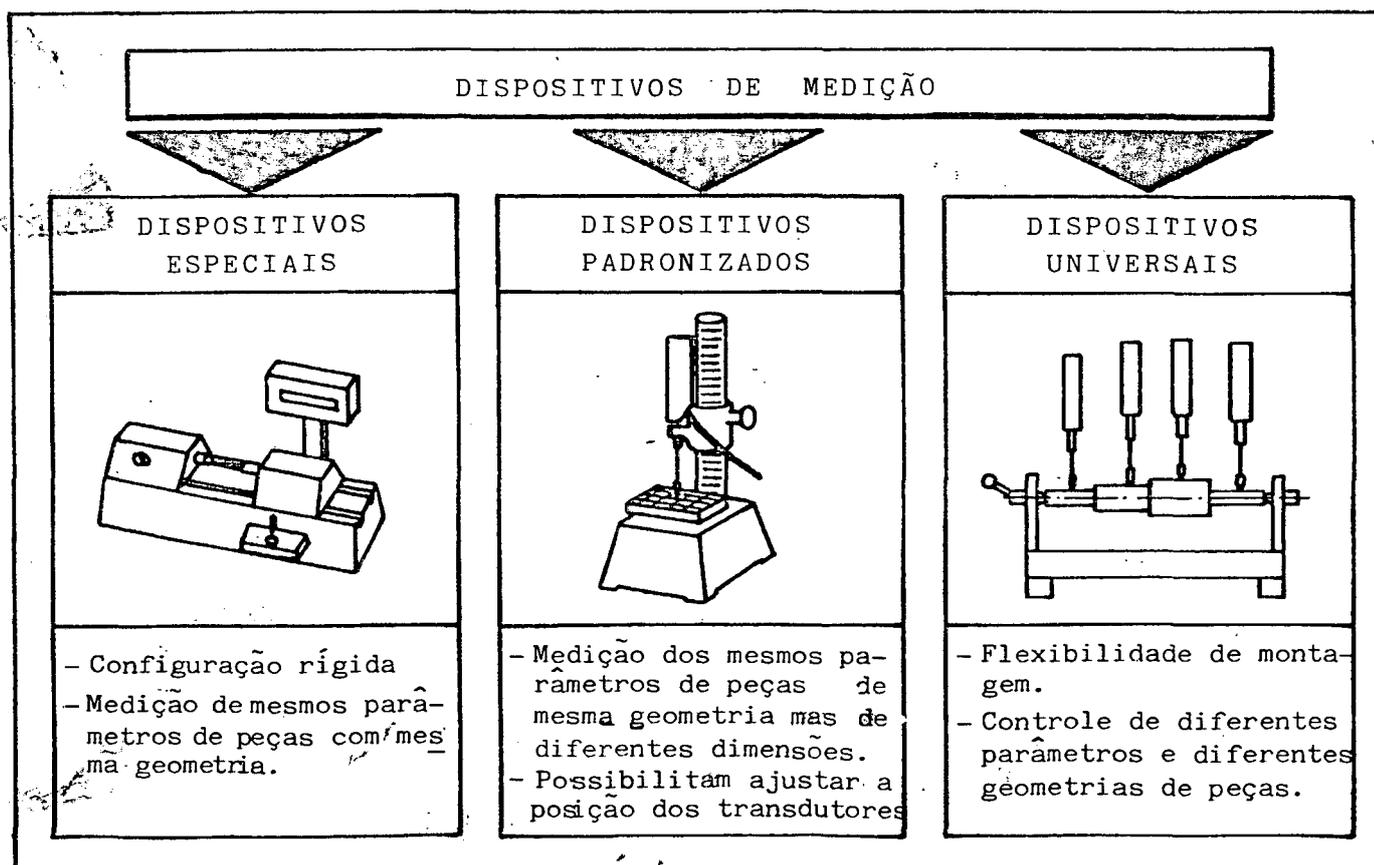


Fig. 1.2 - Subdivisão de dispositivos de medição

a) Dispositivos especiais

Estes Dm caracterizam-se, por apresentar uma configuração rígida, isto é, permitem somente a medição dos mesmos parâmetros de peças com a mesma geometria. Geralmente adotam-se estes dispositivos para grandes séries de peças.

b) Dispositivos padronizados

Os Dm padronizados, tem a particularidade de permitir a medição de peças idênticas na geometria, mas de diferentes dimensões. Estes dispositivos possibilitam portanto, a adaptação de seus elementos e da disposição dos TD, para englobar a faixa de variação das dimensões das peças, sem no entanto, alterar os parâmetros de medição desejados. Estes dispositivos são empregados para determinado campo de aplicação, envolvendo um grande número de tarefas típicas de medição.

c) Dispositivos universais

Estes caracterizam-se, pela flexibilidade de montagem, para controle de diferentes parâmetros, de diferentes geometrias de peças. Neste tipo, enquadram-se os conjuntos modulares (MFS), consistindo de componentes padronizados e intercambiáveis, que mediante combinação, possibilitam a construção de diferentes configurações de dispositivos, para resolução de diversas tarefas de medição na metrologia dimensional.

1.3 ESTADO DA ARTE

Mediante uma revisão bibliográfica, constatou-se a existência de vasta literatura focalizando o projeto e as aplicações de dispositivos de fixação para processos de fabricação [1 a 4], servindo como referência para estruturação do projeto mecânico

dos Dm tratados neste trabalho. Existem alguns artigos que descrevem e aplicação de Dm específicos à determinada tarefa de medição [5 a 8]. Estes dispositivos são na maioria projetados para atuarem junto à linha de fabricação das peças, com aquisição e processamento dos dados através de computadores que monitoram a medição, realimentando o processo de produção e realizando o controle estatístico do processo (SPC).

A literatura apresenta a grande difusão e aplicação atual de conjuntos modulares de dispositivos (CMD) para fixação de peças em máquinas-ferramenta (MT) ou em máquinas de medir por coordenadas (CMM), através de vários fabricantes e publicações [9 a 25], que descrevem a sistemática de projeto, os componentes, as características e vantagens nos diversos campos de aplicação (fig. 1.3).

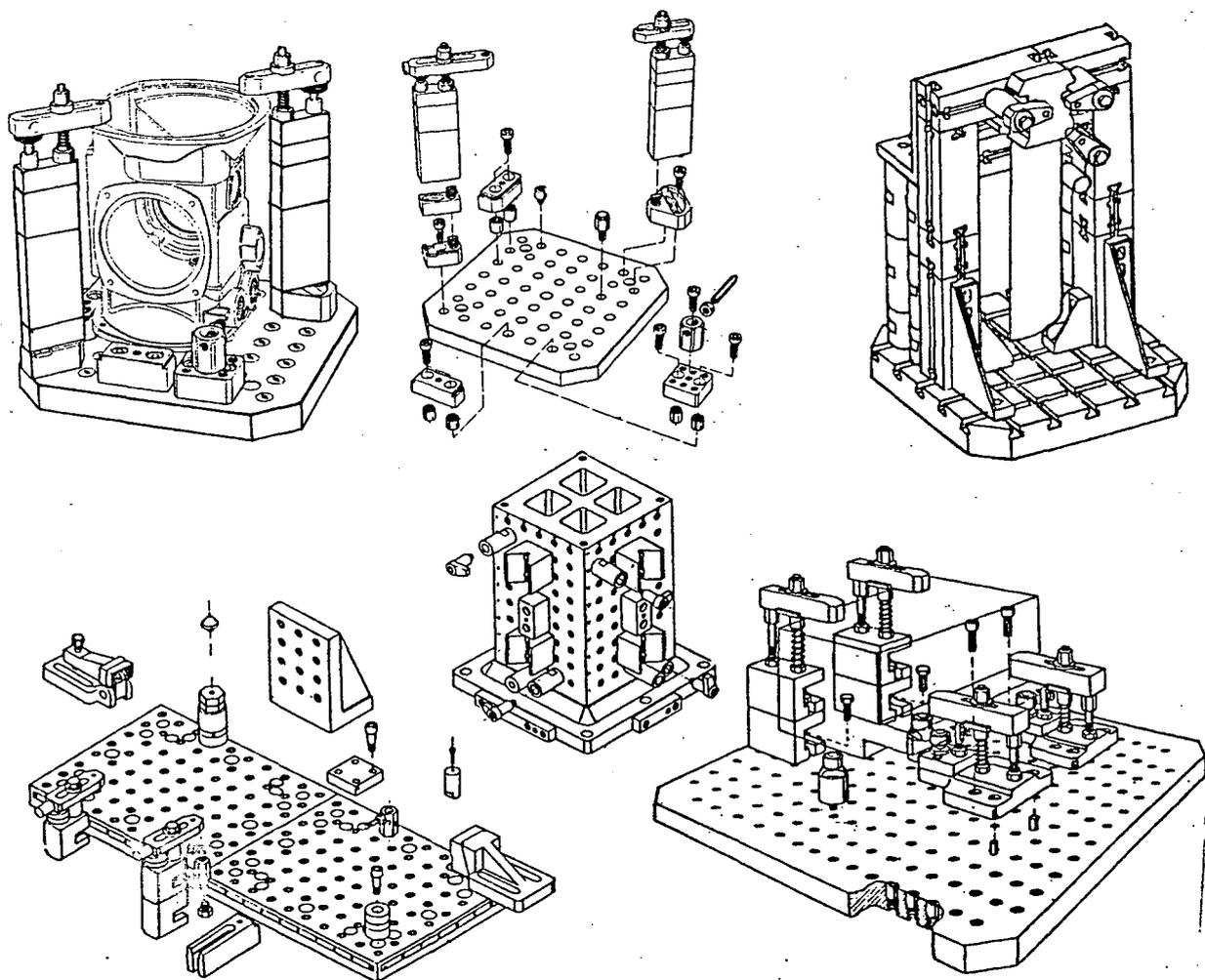


Fig. 1.3 - Exemplos de conjuntos modulares de dispositivos de fixação para usinagem de peças [16 e 21].

Os CMD já existem no mercado internacional há mais de 20 anos, [26 a 36], sendo que a maioria atende somente ao controle de peças cilíndricas (fig.1.4).

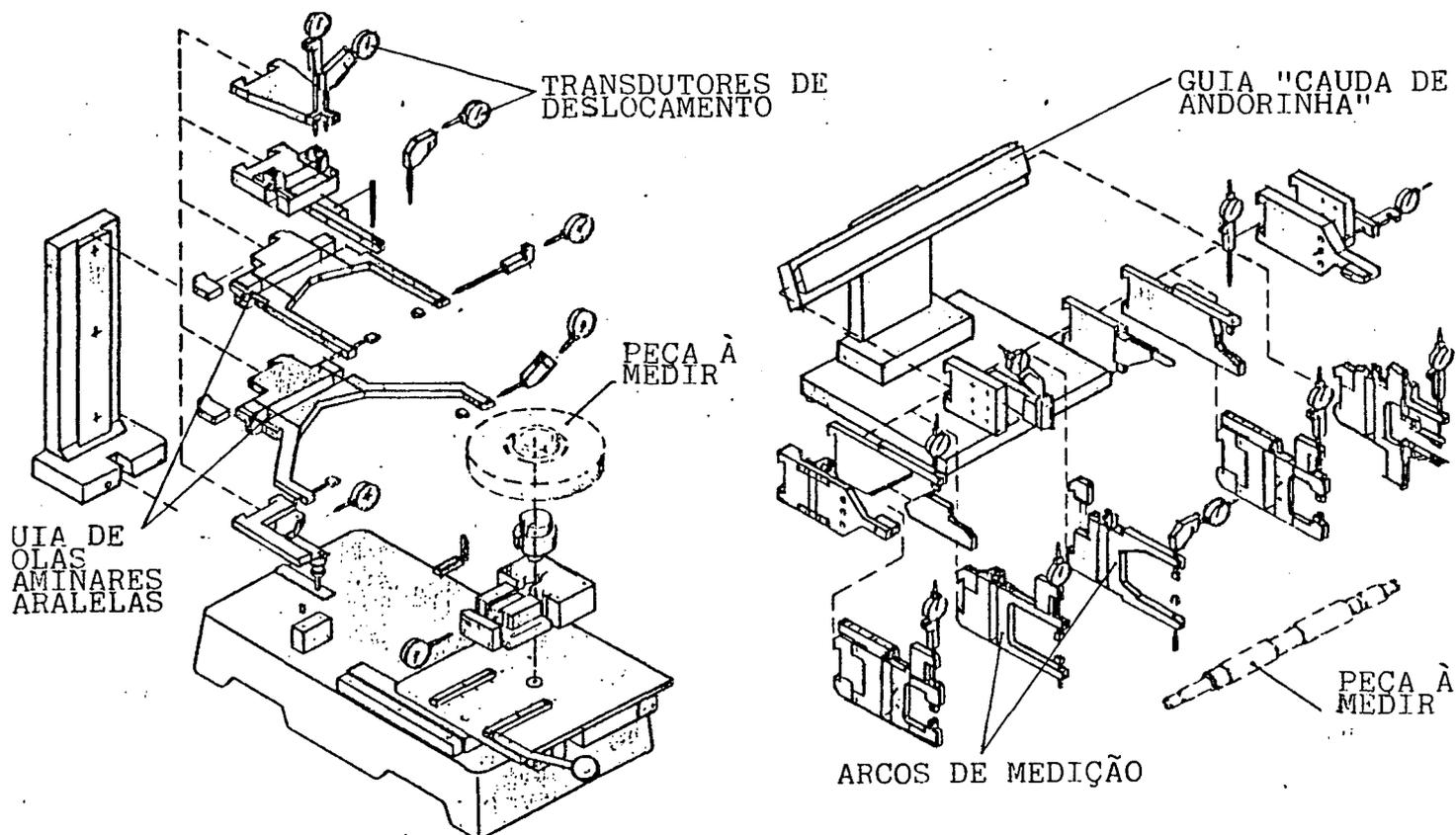


Fig.1.4 - Exemplo de conjunto modular de dispositivos de medição [29]

As concepções de projeto dos CMD de medição mais recentes lançados no mercado, são baseadas em um bloco de medição padronizado (fig.1.5), que possibilita a fixação dos transdutores de deslocamento e a retração pneumática dos apalpadores com a conexão para entrada de ar comprimido.

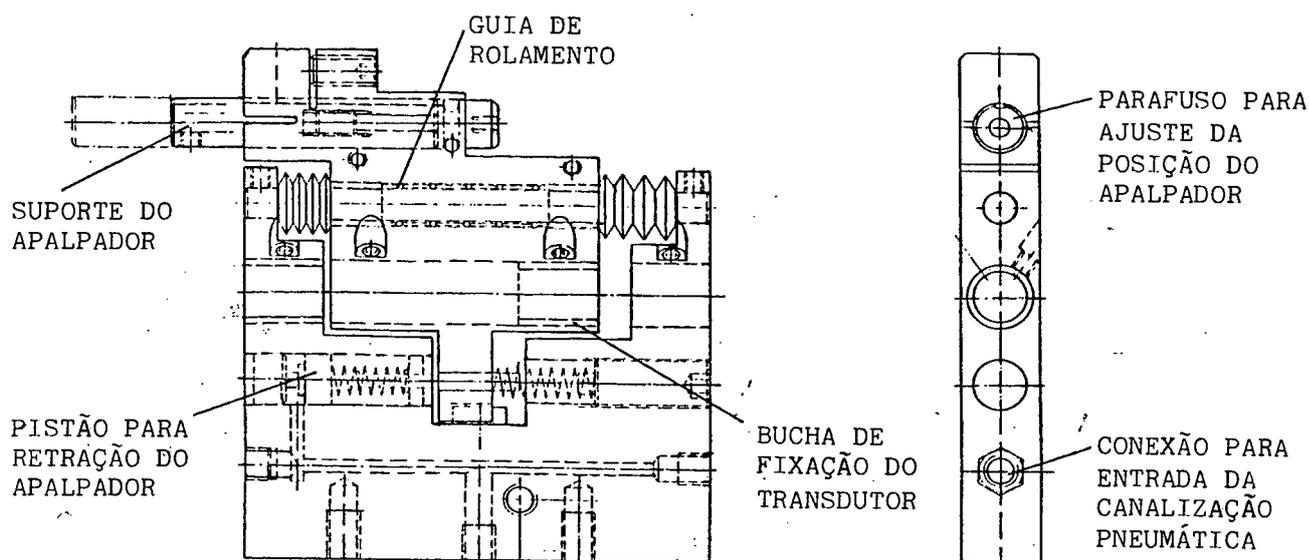


Fig. 1.5 - Bloco de medição padronizado [31].

Existem, atualmente, várias publicações que descrevem o emprego de programas de CAD [37 a 47], no projeto de CMD para fabricação. Da mesma forma, os fabricantes de CMD de medição tem envidado grandes esforços no desenvolvimento e aplicação de programas de CAD com o objetivo de racionalizar o projeto da configuração de dispositivos e sua implementação (fig.1.6).

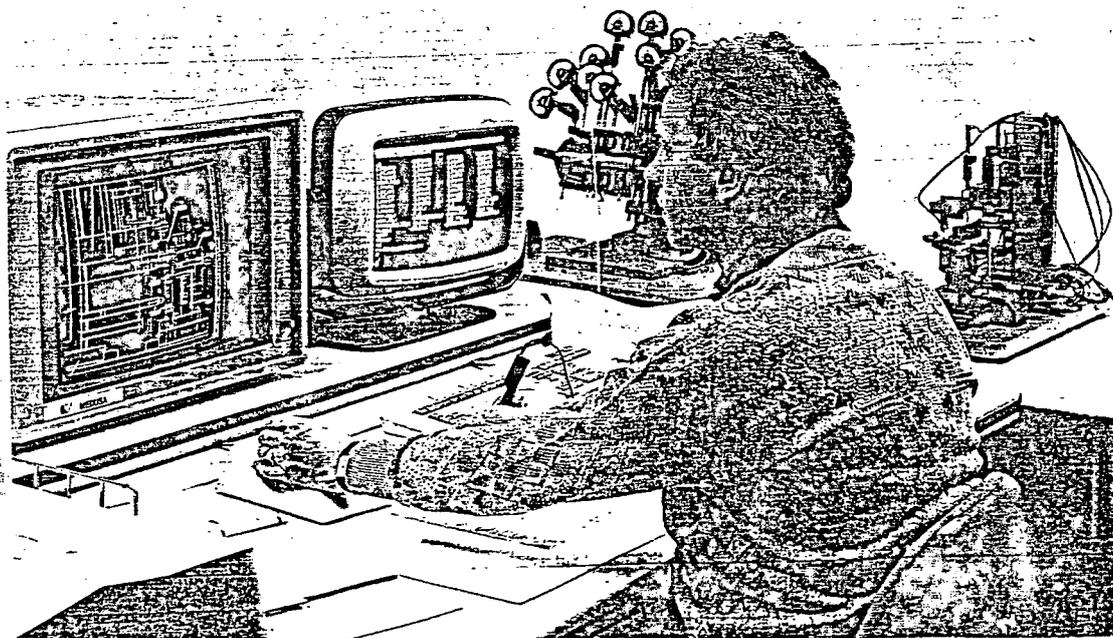


Fig. 1.6 - Projeto de dispositivo de medição auxiliado por computador [29]

Com a revisão bibliográfica, identificou-se um fabricante que apresenta uma inovação na concepção do CMD com grande modularidade e sofisticação, onde a aplicação está direcionada para a medição de peças prismáticas e assimétricas de geometria complexa (fig. 1.7).

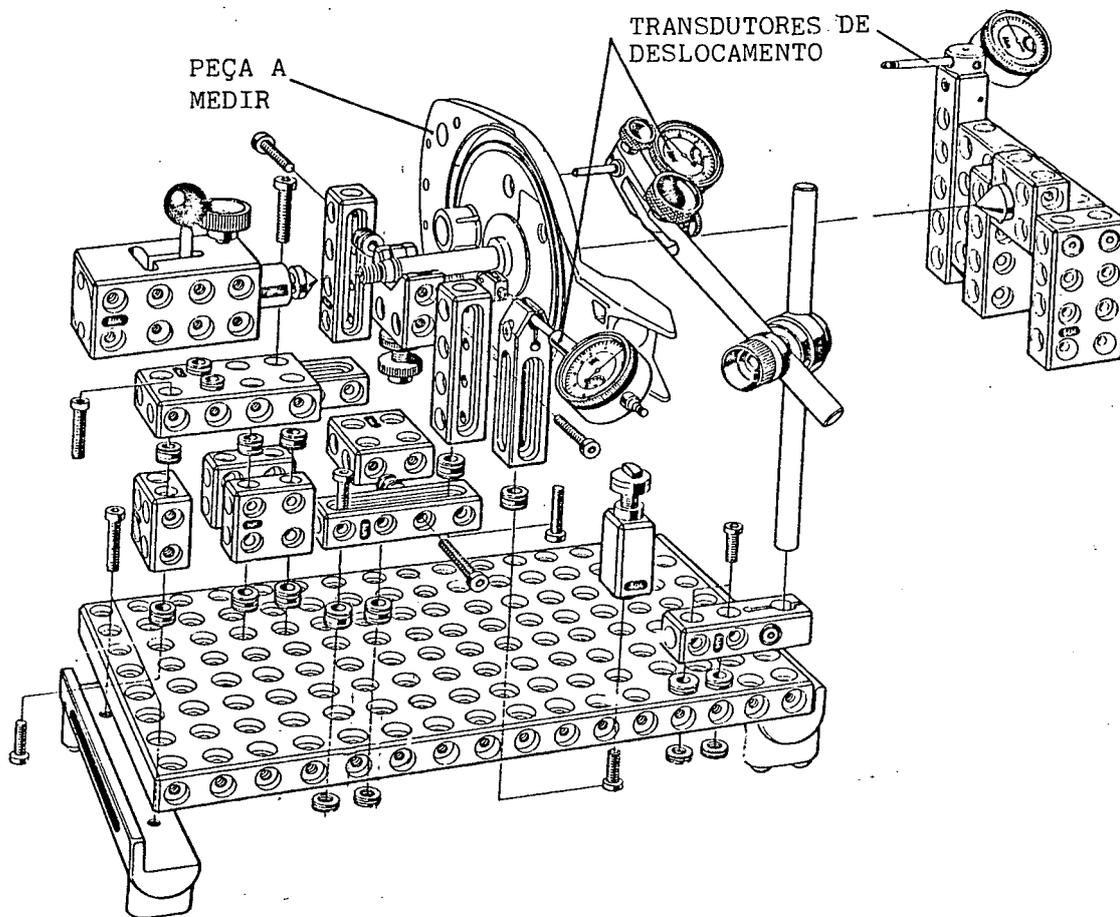


Fig. 1.7 - Conjunto modular para medição de peças de diferentes perfis geométricos [48 e 49].

Com a análise da literatura concluiu-se que inexistente, até então no mercado, um CMD que atenda basicamente, com o mesmo número de peças, a construção de dispositivos para medição de peças cilíndricas, como também, peças prismáticas e de geometrias irregulares.

1.4 MOTIVADORES PARA O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO NA ÁREA

Até o presente momento, tem sido largamente difundida a sistemática geral de desenvolvimento de projeto de produtos industriais [50 a 52]. No entanto, na área de projeto de dispositivos de medição, esta sistemática de projeto, deve estar compatibilizada com a sistemática de solução de uma tarefa de medição. Assim em função da inexistência de literatura dedicada a esta área, torna-se relevante, no contexto atual, a formulação de uma seqüência racional de desenvolvimento de Dm.

A crescente necessidade de Dm, quando se requer principalmente, a automatização do SPC, mas também com requisitos de flexibilidade e racionalização na configuração, tem direcionado na atualidade, ao emprego de dispositivos automatizáveis, modulares e integráveis aos processos de fabricação [53].

Destarte, o atual trabalho, além de discorrer sobre aspectos construtivos de Dm, contribuirá no desenvolvimento de um CMD de medição, não se restringindo exclusivamente, ao ambiente científico e acadêmico, resultando por isso na apresentação de um produto que poderá ter boa aceitação no mercado nacional, ainda em carência.

O modelo do conjunto modular desenvolvido permitirá a construção de Dm, tanto para controle de peças cilíndricas, como também para peças prismáticas e de geometrias complexas, diferenciando-se dos modelos estrangeiros existentes que se limitam, na quase totalidade, a peças cilíndricas.

1.5 OBJETIVOS DO TRABALHO

Mediante a experiência adquirida no CERTI e na TECHNISCHE HOCHSCHULE ILMENAU - Alemanha, no desenvolvimento de Dm para a indústria, o trabalho tem como objetivo o estabelecimento de uma sistemática de desenvolvimento de Dm, e aplicá-la em um problema

real encontrado na indústria. A sistemática elaborada fornece subsídios para o projeto de um CMD de medição, que por sua vez, é adequado a aplicação de CAD através de uma biblioteca gráfica de elementos, visando racionalizar de maneira geral o desenvolvimento de Dm.

Assim o trabalho envolve as seguintes atividades:

- a. descrição das funções básicas, das características construtivas e elementos funcionais componentes comumente empregados em Dm;
- b. estabelecer uma sistemática de desenvolvimento de Dm;
- c. projeto de um conjunto modular para configuração de Dm;
- d. construção, experimentação e avaliação do desempenho do conjunto modular projetado;
- e. elaboração de uma biblioteca gráfica de elementos modulares visando a racionalização na construção de Dm, a partir de um programa de CAD existente;
- f. Analisar a aplicação econômica do conjunto modular em relação aos dispositivos especiais.

2 FUNDAMENTOS DE PROJETO DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

O projeto de um Dm é baseado em duas exigências fundamentais: primeiro, requer-se que as medições dos parâmetros a serem controlados, sejam obtidas de maneira objetiva, e em segundo plano, que cada medida tenha repetibilidade para garantir a confiabilidade metrológica necessária.

A concepção de projeto de um Dm depende de uma série de fatores de influência, que devem ser observados para o melhor atendimento às necessidades da indústria em sua aplicação.

Alguns fatores que devem ser observados para o projeto de

Dm, são:

- tipo de tarefa de medição (ex.: medição de diâmetros internos ou externos, afastamento, distância entre furos, etc.);
- dimensão nominal do parâmetro de medição;
- tolerância do parâmetro de medição;
- método de medição (medição absoluta, diferencial, etc.);
- frequência de medição necessária;
- instrumentos de medição disponíveis.

Os Dm, para satisfazerem as soluções técnicas com confiabilidade e viabilidade, devem atender a alguns requisitos de projeto no alcance dos resultados desejados.

2.1 REQUISITOS GERAIS

O primeiro passo no projeto de um produto é a elaboração de uma lista de requisitos que o mesmo deve satisfazer.

Assim, os requisitos gerais para o projeto de Dm estão apresentados na fig. 2.1.

		REQUISITOS	JUSTIFICATIVAS
ASPECTOS METROLÓGICOS	.	ATENDIMENTO AO PRINCÍPIO DE ABBE.	REDUÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO
	.	INCERTEZA DE MEDIÇÃO DEVE ESTAR ENTRE 10 A 20% DO CAMPO DE TOLERÂNCIA DO PARÂMETRO A MEDIR.	REGRA GERAL PARA CONTROLE NA METROLOGIA.
	.	UTILIZAÇÃO DE TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO COM E SEM CONTATO.	MEDIÇÃO DE PEÇAS DE DIFERENTES DUREZAS E MATERIAIS.
	.	NOS TRANSDUTORES COM CONTATO A FORÇA DE MEDIÇÃO DEVE SER PEQUENA E CONSTANTE	PARA NÃO CAUSAR RETROAÇÃO NA LEITURA
	.	INTERCAMBIALIDADE DOS APALPADORES.	VIABILIZAR A MEDIÇÃO DE DIFERENTES PERFIS DE PEÇAS.
	.	RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS APALPADORES.	CONFIABILIDADE E PRECISÃO.
ASPECTOS OPERACIONAIS	.	EVITAR SUPERDETERMINAÇÃO NO POSICIONAMENTO DAS PEÇAS.	GARANTIA DE REPETIBILIDADE NO POSICIONAMENTO DAS PEÇAS PARA EVITAR ERROS DE MEDIÇÃO.
	.	SIMPLICIDADE DE MANIPULAÇÃO E OPERAÇÃO NA MEDIÇÃO.	RAPIDEZ DO PROCESSO DE MEDIÇÃO.
	.	SIMPLICIDADE E CONFIABILIDADE DE ZERAGEM DOS MEDIDORES COM O PADRÃO.	RAPIDEZ DE AFERIÇÃO.
	.	SUJEIÇÃO PRÁTICA E EFICIENTE COM FORÇA ADEQUADA.	GARANTIA DE POSIÇÃO COM CONFIABILIDADE DURANTE PROCESSO DE MEDIÇÃO.
	.	CONSTRUÇÃO ESTÁVEL E RÍGIDA.	ESTABILIDADE ESTÁTICA E DINÂMICA DURANTE A MEDIÇÃO.
	.	UTILIZAÇÃO DE TRANSDUTORES MINIATURIZADOS (Ø8H6 MM)	CONSTRUÇÃO COMPACTA.

Fig. 2.1 - Requisitos gerais de projeto de dispositivos de medição [53]

2.2 ESTRUTURA FUNCIONAL DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO

A função global de um Dm, "medir a peça", pode ser detalhada através do esquema da fig. 2.2.

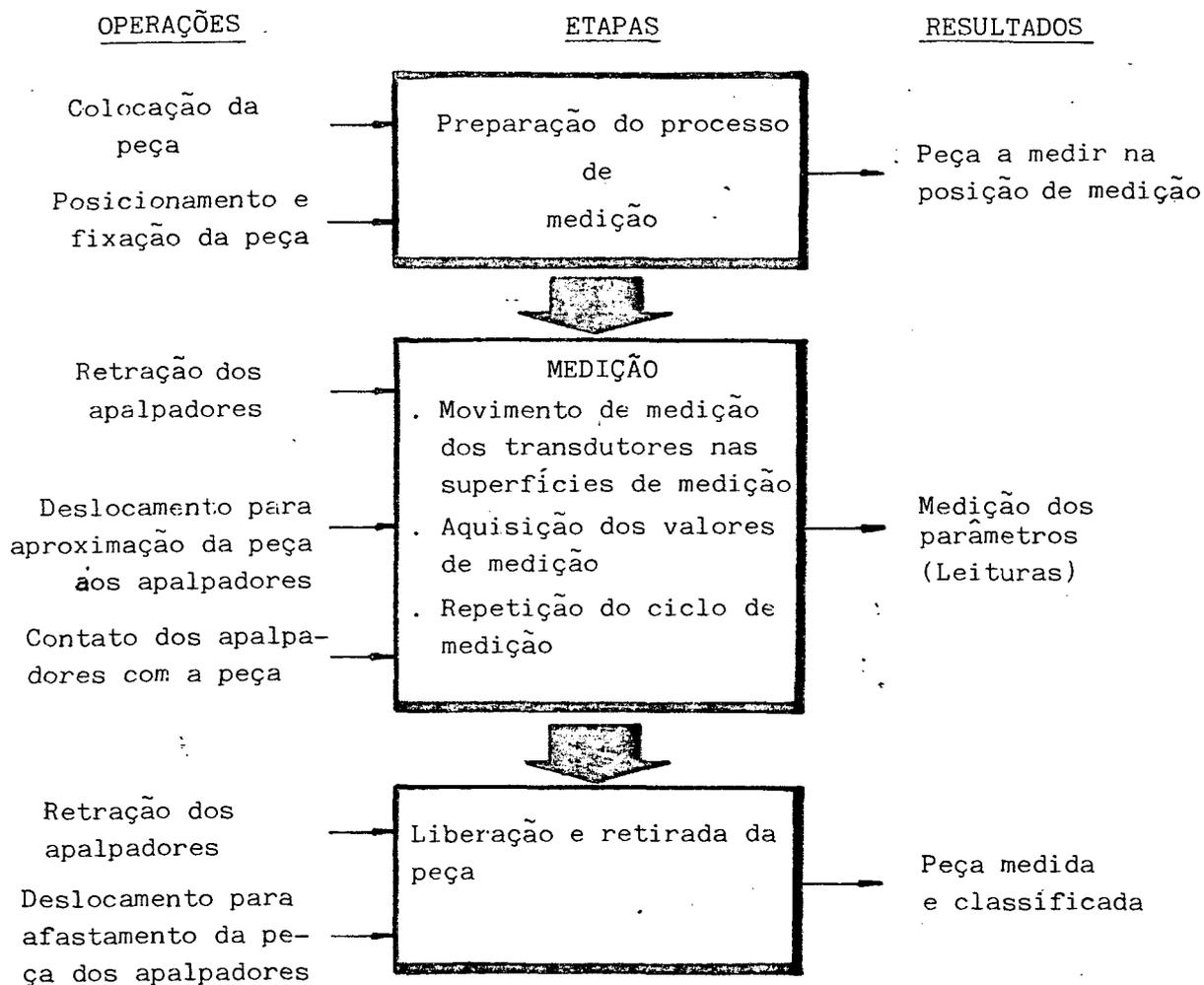
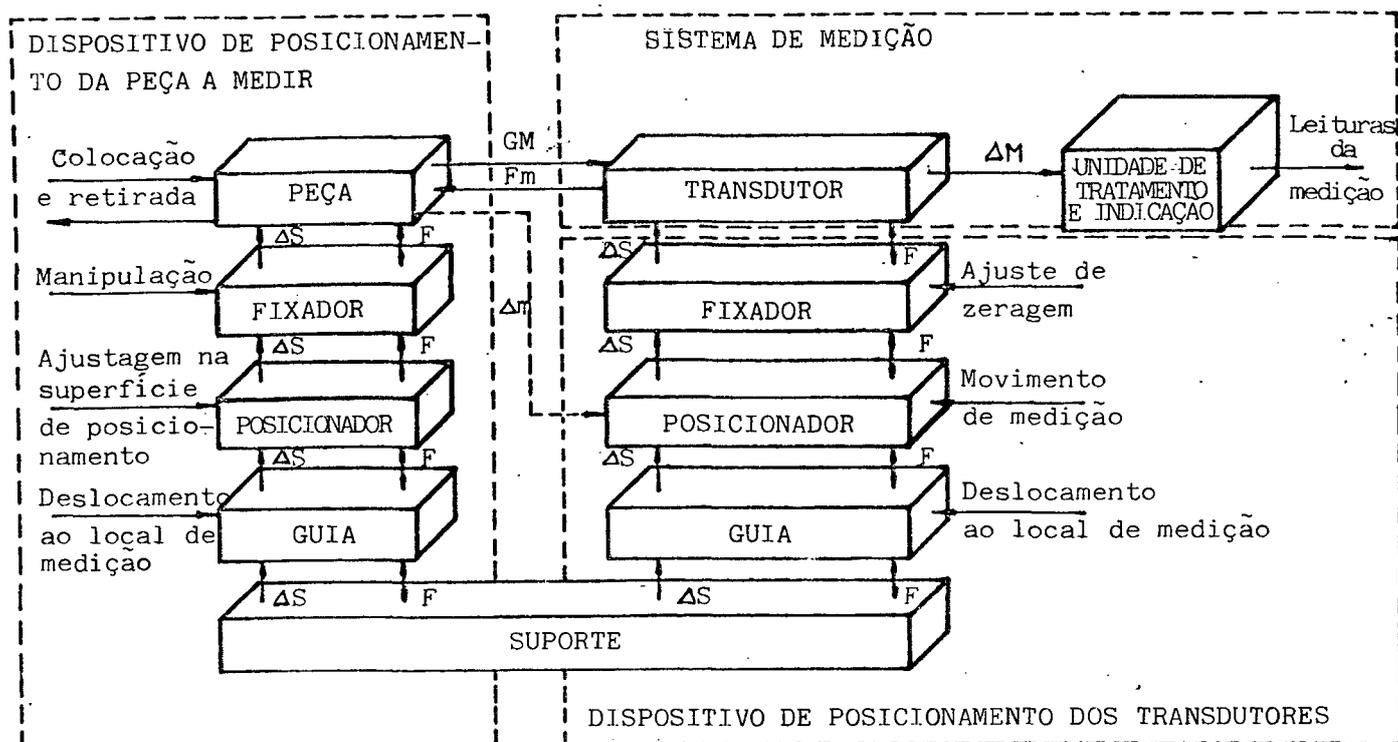


Fig. 2.2 - Princípio operacional do dispositivo de medição

O princípio operacional esquematizado, considera que o dispositivo está ajustado e preparado para posicionamento dos transdutores e da peça à medir. A partir do princípio operacional, pode-se então, representar as relações entre as subfunções e suas ligações, através de sua estrutura funcional (fig. 2.3).



ΔM = sinal de medição

GM = Grandeza a Medir

F_m = Força de medição

Δm = Deslocamento de medição do transdutor

$\Delta s = \Delta x, \Delta y, \Delta z =$ deslocamento / posição

Fig. 2.3 - Estrutura funcional do dispositivo de medição

O ciclo de medição inicia-se, com a colocação da peça no dispositivo de posicionamento, onde a mesma é então fixada para garantia da posição no processo de medição. Através de um acionamento (manual ou automatizado), a peça é movida mediante guias em direção aos transdutores ou vice-versa.

Os transdutores são dispostos mediante seus respectivos elementos de posicionamento e fixação, entrando em contato com as superfícies de medição da peça através dos apalpadores.

Ambos os dispositivos de posicionamento da peça e dos transdutores, estão apoiados em elementos de suporte. Os parâmetros da peça são medidos pelo sistema de medição, que processa as leituras para obtenção dos resultados da medição.

2.3 SUBFUNÇÕES DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO

Os dispositivos devem atender a determinadas subfunções relativas aos seus requisitos metrológicos e operacionais estabelecidos. Para cada subfunção, existe uma série de elementos funcionais que diferem bastante em tipo e forma.

Os elementos funcionais são elementos unitários ou grupos de elementos, que concretizam uma determinada subfunção dentro da função global do dispositivo.

As subfunções nem sempre são determinadas rigidamente, podendo ser integradas conforme cada caso.

Para racionalização do processo de projeto, é conveniente conhecer as subfunções bem como os elementos funcionais, e desta forma organizar o processo de projeto em etapas individuais correspondentes [13] (fig. 2.4).

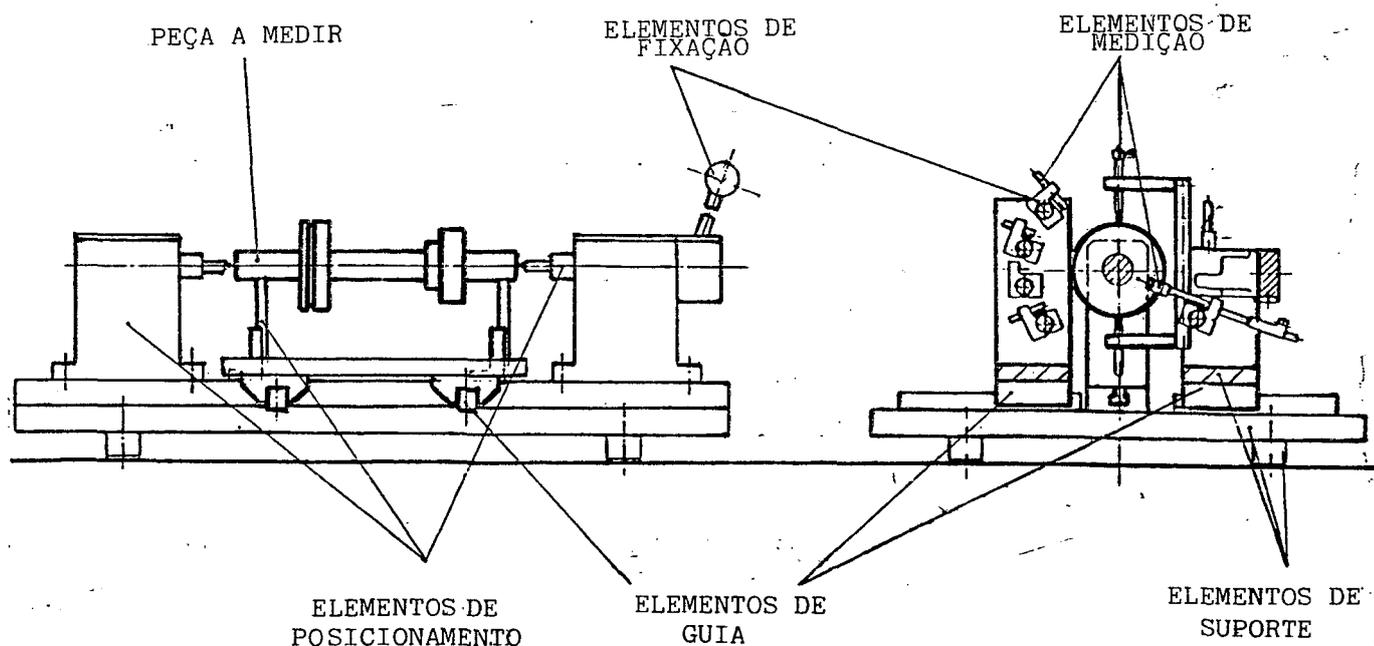


Fig. 2.4 - Dispositivo de medição e seus elementos funcionais.

A seguir serão detalhadas as subfunções comumente empregadas em Dm.

2.3.1 Medir

Esta subfunção em razão de ser referencial para as demais subfunções, deverá ser a primeira a ser estudada na concepção de projeto do Dm. Ela é responsável pela obtenção das medidas nos pontos desejáveis correspondentes aos diversos parâmetros de medição das peças, permitindo, mediante a comparação com as tolerâncias de projeto, aprovar ou não a peça a medir.

No projeto de Dm, a subfunção "Medir" tem os seguintes principais requisitos :

- possibilitar o CG de diferentes parâmetros de medição através de métodos diversos e para diferentes geometrias de peças (fig. 2.5);

DENOMINAÇÃO		VARIANTES					
GEOMETRIA		CILÍNDRICA		PRISMÁTICA		IRREGULAR	
PARÂMETROS DE MEDIÇÃO	DIMENSIONAL	DIÂMETRO EXT./INT.	ALTURA	AFASTAMENTO	POSIÇÃO	PROFUNDIDADE	
	DE FORMA	CIRCULARIDADE	BATIDA AXIAL	CONCENTRICIDADE	CONICIDADE	PARALELISMO	PERPENDICULARIDADE
MÉTODO		COM CONTATO	SEM CONTATO	ABSOLUTO	DIFERENCIAL	ESTÁTICO	DINÂMICO

Fig. 2.5 - Principais exemplos de geometrias, parâmetros e métodos de medição frequentemente utilizados em dispositivos de medição.

- atendimento do princípio de ABBE, fundamental na metrologia dimensional para minimização dos erros de medição (fig. 2.6);

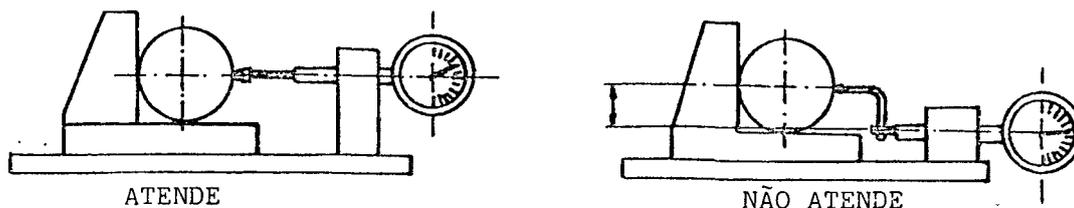


Fig. 2.6 - Atendimento do princípio de ABBE

- simplicidade de ajuste dos transdutores;
- segurança aos TD contra sobredeslocamentos ou choques durante a operação;
- intercambiabilidade dos transdutores e apalpadores;
- rigidez, precisão dimensional e estabilidade;

Os elementos de medição podem ser subdivididos em transdutores de deslocamento e apalpadores.

a) Transdutores de deslocamento

Os TD podem atuar por diferentes princípios de transdução, como por exemplo.: mecânico, pneumático, opto-eletrônico, eletro-analógico e eletrodigital [54 a 56].

Dentre estes, o mais difundido para controle dimensional em dispositivos é o transdutor indutivo de deslocamento de princípio eletro-analógico, apresentando, em relação aos outros transdutores, as seguintes vantagens [57 a 59]:

- simplicidade construtiva;
- mecanismo compacto que permite sua implementação em diferentes configurações;
- boas características metrológicas, como linearidade, sensibilidade, força de medição pequena, etc.;
- alta imunidade à fatores ambientais com grande robustez e alta confiabilidade;
- propício à automatização.
- oferecido no mercado por muitos fabricantes, a um preço acessível.

Em razão destas qualidades, existe uma gama muito ampla de fabricantes de transdutores eletro-indutivos de deslocamento, com diversas formas construtivas que diferem principalmente no tipo de guia utilizada para conduzir o núcleo em relação à bobina, como pode ser observado na figura 2.7.

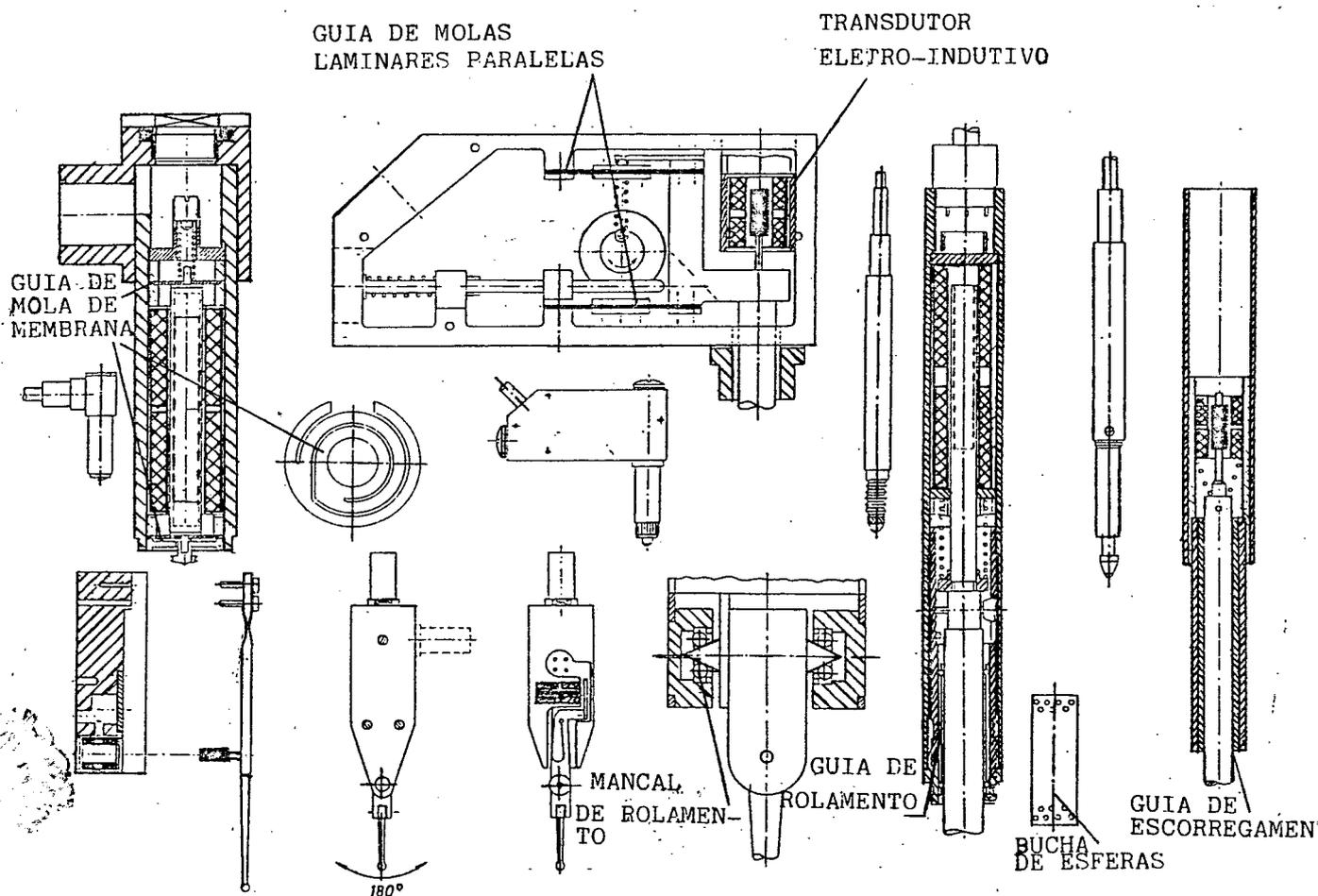


Fig. 2.7 - Transdutores eletro-indutivos de deslocamento

[53].

O modelo de guia linear com gaiola de esferas é o mais difundido no mercado internacional, sendo também o mais utilizado em Dm para controle de múltiplas dimensões.

Atualmente, em função do crescente desenvolvimento de sistemas de medição opto-eletrônicos, e das suas vantagens de: medição sem contato (força de medição nula) e alta velocidade de medição entre outras, os mesmos tem sido adotados em dispositivos para CG nos processos produtivos.

b) Apalpadores

Com o objetivo de minimizar os erros de medição, é necessário estabelecer um contato físico geometricamente bem definido do apalpador com a peça a medir. Este contato depende da seleção correta da forma geométrica do apalpador que, por sua vez, depende da forma da peça a medir, e que poderá resultar em um contato pontual, linear ou superficial. Se a peça a medir é plana, por ex., o apalpador é geralmente esférico; se a peça é cilíndrica, usam-se apalpadores planos ou cilíndricos.

Os apalpadores são de relevante importância para a obtenção de medições de precisão. Geralmente são adotadas esferas de aço cromo, safira ou de metal duro cujas propriedades mecânicas, conferem alta dureza e resistência ao desgaste, que são desejáveis devido aos movimentos e atrito entre as superfícies de medição durante o processo de medição.

Alguns exemplos de apalpadores intercambiáveis e disponíveis comercialmente, podem ser observados na figura 2.8.

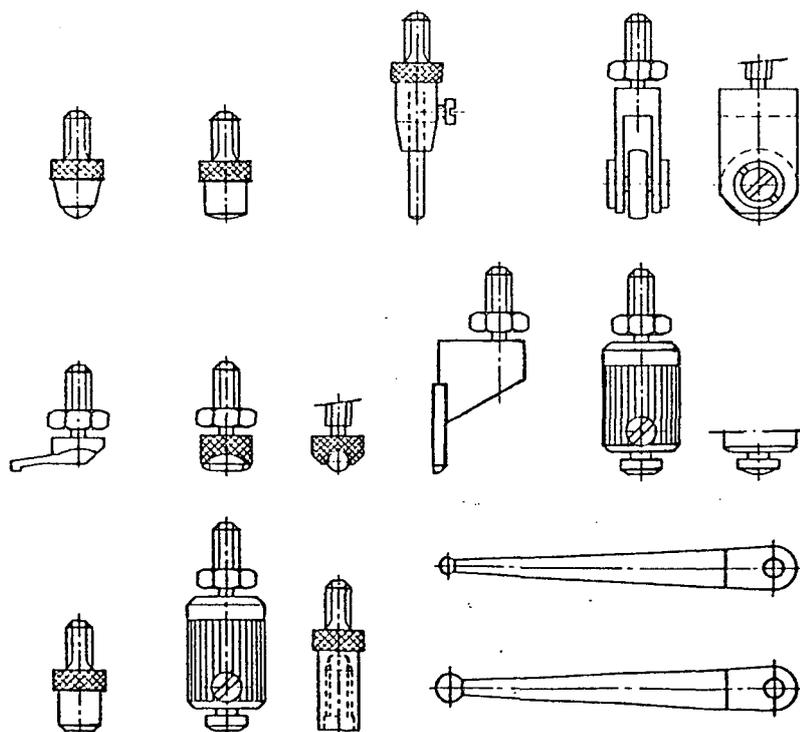


Fig. 2.8 - Apalpadores intercambiáveis de transdutores de deslocamento [30].

Um fator importante, associado ao contato mecânico entre os apalpadores e a peça a medir, é a força de medição.

A força de medição é necessária para que o ponto de contato possa penetrar pelas camadas de sujeira, de óleo, etc., que aderem à superfície de contato evitando assim erros de medição. No caso de TD opto-eletrônicos, onde a força de medição é nula, é necessário uma limpeza das peças para a sujeira, óleo, etc. não interferir nos resultados da medição.

A força de medição tem influência nos resultados de medição, uma vez que há deformação da peça a medir e do dispositivo de medição, e ocorre através:

- da deformação dos suportes dos transdutores e apalpadores ;
- da deformação elástica do material (lei de Hooke);
- de achatamentos entre o apalpador e a peça a medir, principalmente nas medições onde as superfícies de contato são curvas;

Assim, é importante manter-se a força de medição em valores pequenos (forças menores que 3N causam deformações menores que $0,6 \mu\text{m}$ para peças de aço), suficientes ao contato mecânico, e aproximadamente constantes, para se poder levar eventualmente, em consideração nas correções dos erros de medição. No entanto, a força de medição e seus efeitos, não causam tantos erros de medição, no método de medição diferencial, pois os efeitos são praticamente os mesmos no padrão e na peça a medir.

As formas de contato mais freqüentes e as correspondentes equações de cálculo dos achatamentos podem ser observadas na figura 2.9.

Em função dos diferentes parâmetros e geometrias das peças a serem medidas, surgem casos de difícil acesso dos transdutores às superfícies de medição. Por isso, são adotados diferentes tipos de apalpadores na forma de hastes, adequados à solução das diversas tarefas de medição. Sua função é transmitir as variações dimensionais dos parâmetros de medição aos TD (fig. 2.10).

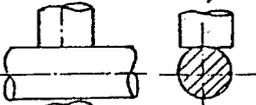
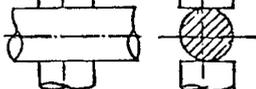
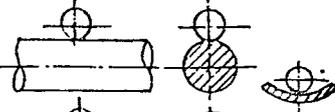
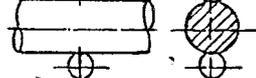
FORMA DE CONTATO	Equações para cálculo do achatamento Δa F(N) L(mm) d(mm) $\Delta a(\mu m)$
 : plano - esfera	$\Delta a_1 = 0,415 \sqrt[3]{\frac{F^2}{d}}$
 : esfera entre dois planos	$\Delta a_2 = 2 \cdot \Delta a_1$
 : plano - cilindro	$\Delta a_3 = 4,6 \cdot 10^{-2} \frac{F}{L \sqrt[3]{d}}$ L=comprimento da linha de contato.
 : cilindro entre dois planos.	$\Delta a_4 = 2 \cdot \Delta a_3$
 : esfera - esfera	$\Delta a_5 = 0,415 \sqrt[3]{F^2 \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right)}$
 : esfera - cilindro	$\Delta a_6 = 0,480 \sqrt[3]{F^2} \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \frac{1}{d}}}{\sqrt[6]{\frac{2}{d} + \frac{1}{D}}}$
 : cilindro entre duas esferas	$\Delta a_7 = 2 \cdot \Delta a_6$

Fig. 2.9 - Formas de contato e achatamento dos apalpadores para peças de aço [58].

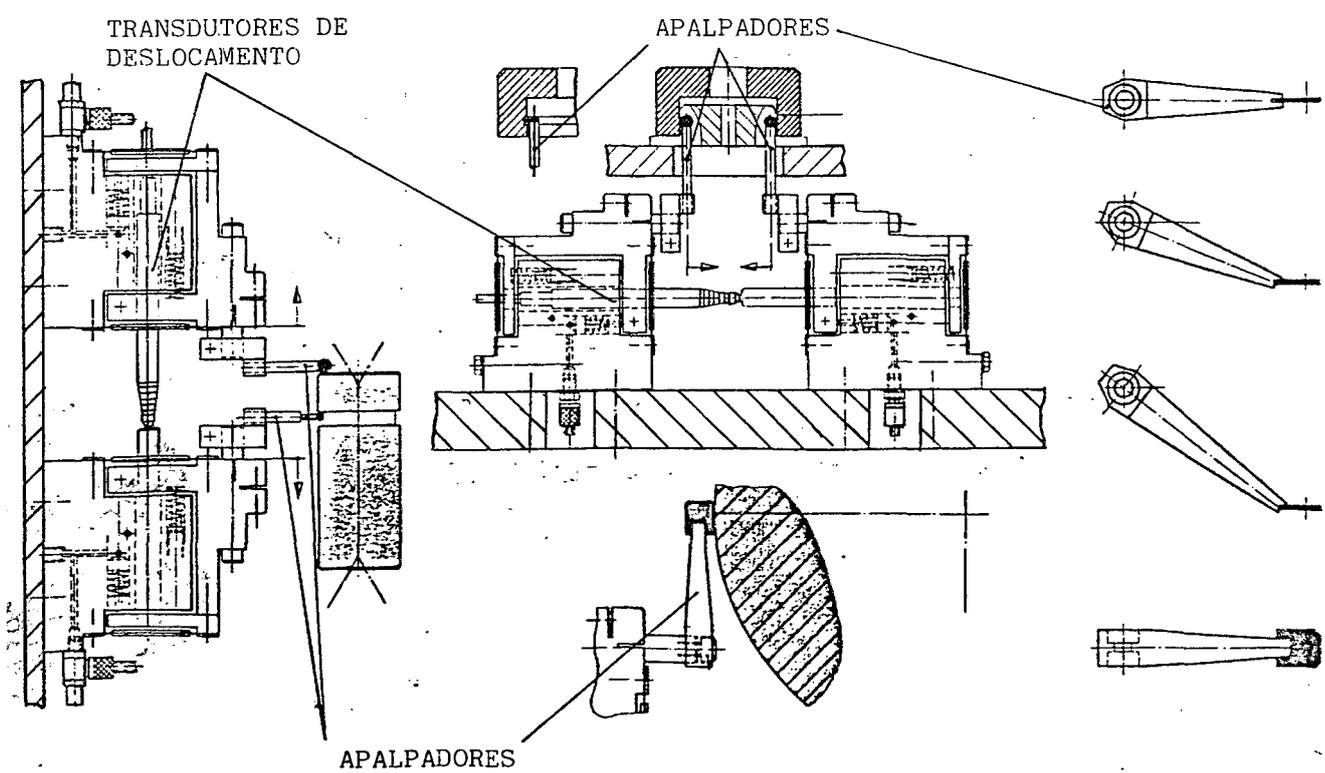


Fig. 2.10 - Exemplos de aplicação de apalpadores em dispositivos de medição.

Estes apalpadores devem possuir rigidez suficiente contra flexões e torções, causadas pela força de medição, evitando assim erros de medição significativos.

2.2.2 Posicionar

Em todo processo de CG é imperativo assegurar uma posição definida entre a peça a medir e os TD, sendo de primordial importância para a repetibilidade das medidas.

A função posicionar deve preencher os seguintes requisitos:

- orientação, localização, centragem ou encaixe da peça a medir, com o fim de definir claramente a posição espacial da peça no dispositivo;
- ajuste da posição dos TD junto ao parâmetros de medição;
- colocação da peça na posição de medição.

A definição do modo de posicionamento está intimamente ligada à forma geométrica da peça a medir e à localização das superfícies de medição.

Para providenciar a localização precisa de peças cilíndricas, os dispositivos de autocentragem ou por contrapontas podem ser usados para atender uma grande variação das dimensões das peças. No entanto, para as peças prismáticas, são necessários dispositivos auxiliares, cuja função é facilitar a localização precisa e assegurar a estabilidade durante os ciclos de medição.

Uma vez definida a estratégia de medição pela subfunção "Medir" o problema de projeto de Dm, resume-se em estabelecer a mais adequada orientação da peça a medir, satisfazendo os requisitos de estabilidade, repetibilidade dos pontos de localização e o posicionamento adequado dos transdutores em relação aos parâmetros, para evitar erros de medição.

O fundamento teórico para a repetibilidade de posicionamento é explicado pela teoria da restrição dos graus de liberdade ou princípio da superdeterminação [1,2 e 3]. Os seis graus de liberdade consistem nos três deslocamentos e três rotações possíveis nos três eixos coordenados do sistema cartesiano.

Um corpo estará completamente determinado no espaço, quando seus seis graus de liberdade estiverem restringidos.

Qualquer restrição acima do número mínimo requerido para localização, pode levar à superdeterminação, resultando em distorções e instabilidade de posicionamento da peça (fig. 2.11).

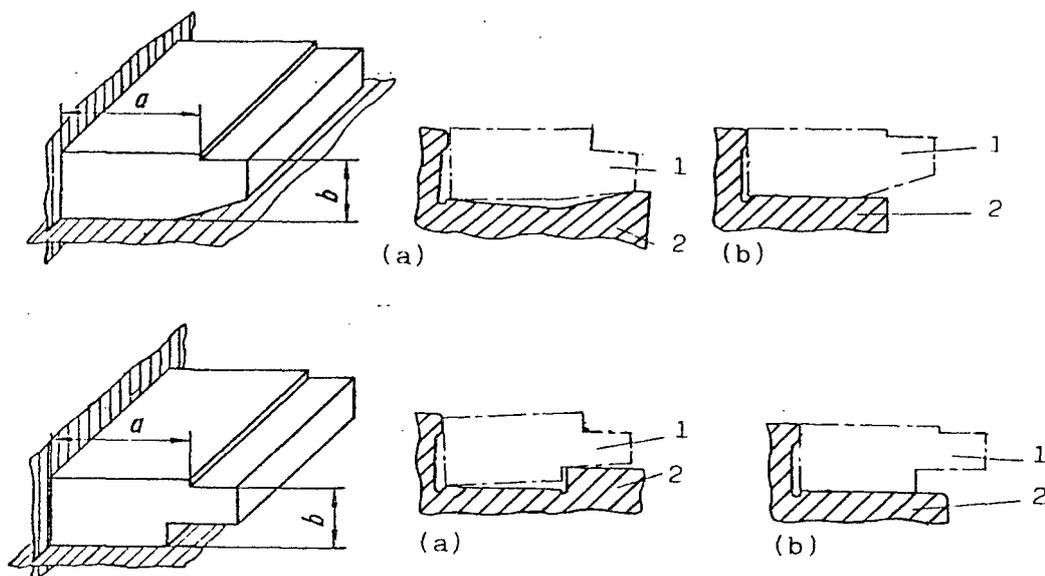


Fig. 2.11 - Exemplos de posicionamento com superdeterminação

[B]

a) Peça superdeterminada b) peça determinada
corretamente

A determinação da posição da peça a medir é realizada através de planos e superfícies da peça e do Dm. Estes planos e superfícies devem ser definidos pelo projetista como ponto de origem para o dimensionamento funcional do dispositivo.

Os planos e superfícies para definição da localização da peça no dispositivo são [2]:

- a) Planos (linhas ou pontos) de referência (Pr): são fixados pelo projetista, para definição das condições funcionais e dimensionais relativas à peça a medir. Estes planos representam as superfícies básicas servindo como base construtiva para a peça;
- b) Planos de posicionamento (Pp): são os planos de definição da peça no dispositivo, ou seja, os planos de onde se originam os elementos de posicionamento do dispositivo;

c) Superfícies de posicionamento (S_p): são as superfícies da peça ou do dispositivo onde ocorre(m) o(s) ponto(s) de apoio para definição da posição. Estas superfícies dividem-se em superfícies de posicionamento da peça (S_{pp}) e superfície de posicionamento do dispositivo (S_{pd}).

As localizações ideais são obtidas através de contatos pontuais. No entanto, na prática, quando as localizações são requeridas para suportar cargas, as áreas de contato são necessariamente maiores, introduzindo erros de medição relacionados com a forma geométrica das superfícies de localização.

Na figura 2.12, são apresentados alguns exemplos dos planos de referência e posicionamento de peças e as superfícies de posicionamento típicas do dispositivo para cada caso [1 e 2].

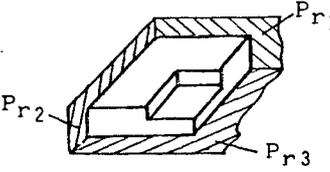
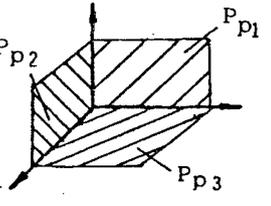
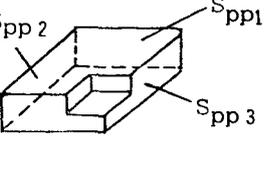
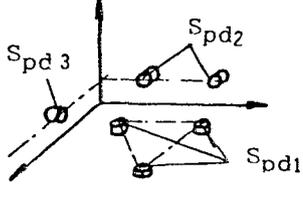
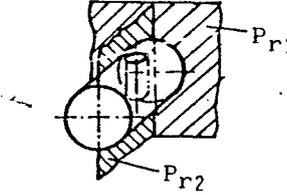
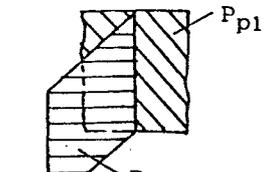
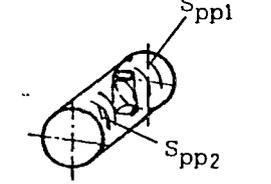
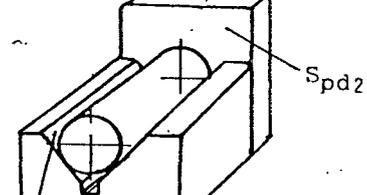
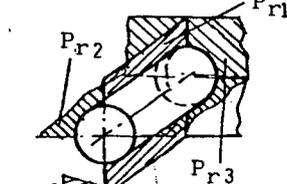
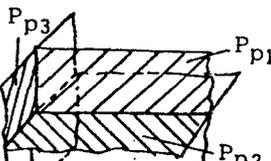
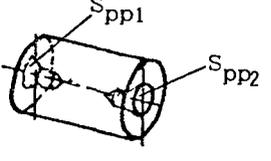
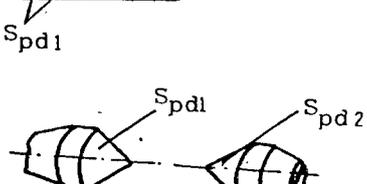
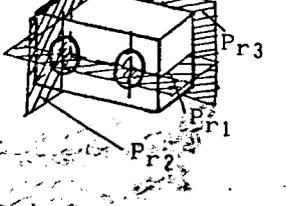
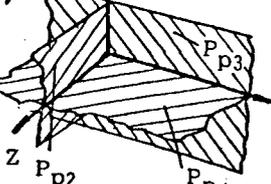
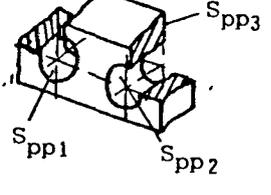
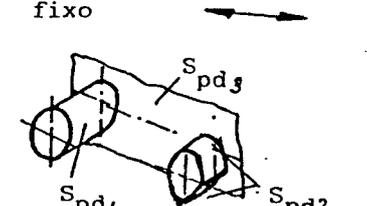
PLANOS DE REFERÊNCIA	PLANOS DE POSICIONAMENTO	SUPERFÍCIES DE POSICIONAMENTO DA PEÇA	FORMA DOS PONTOS DE CONTATO DA SUPERFÍCIE DE POSICIONAMENTO DO DISPOSITIVO
			
			
			
			

Fig. 2.12 - Exemplos de superfícies e planos de posicionamento de diferentes peças.

A figura 2.13 apresenta alguns exemplos de posicionamento de uma peça em um dispositivo de medição.

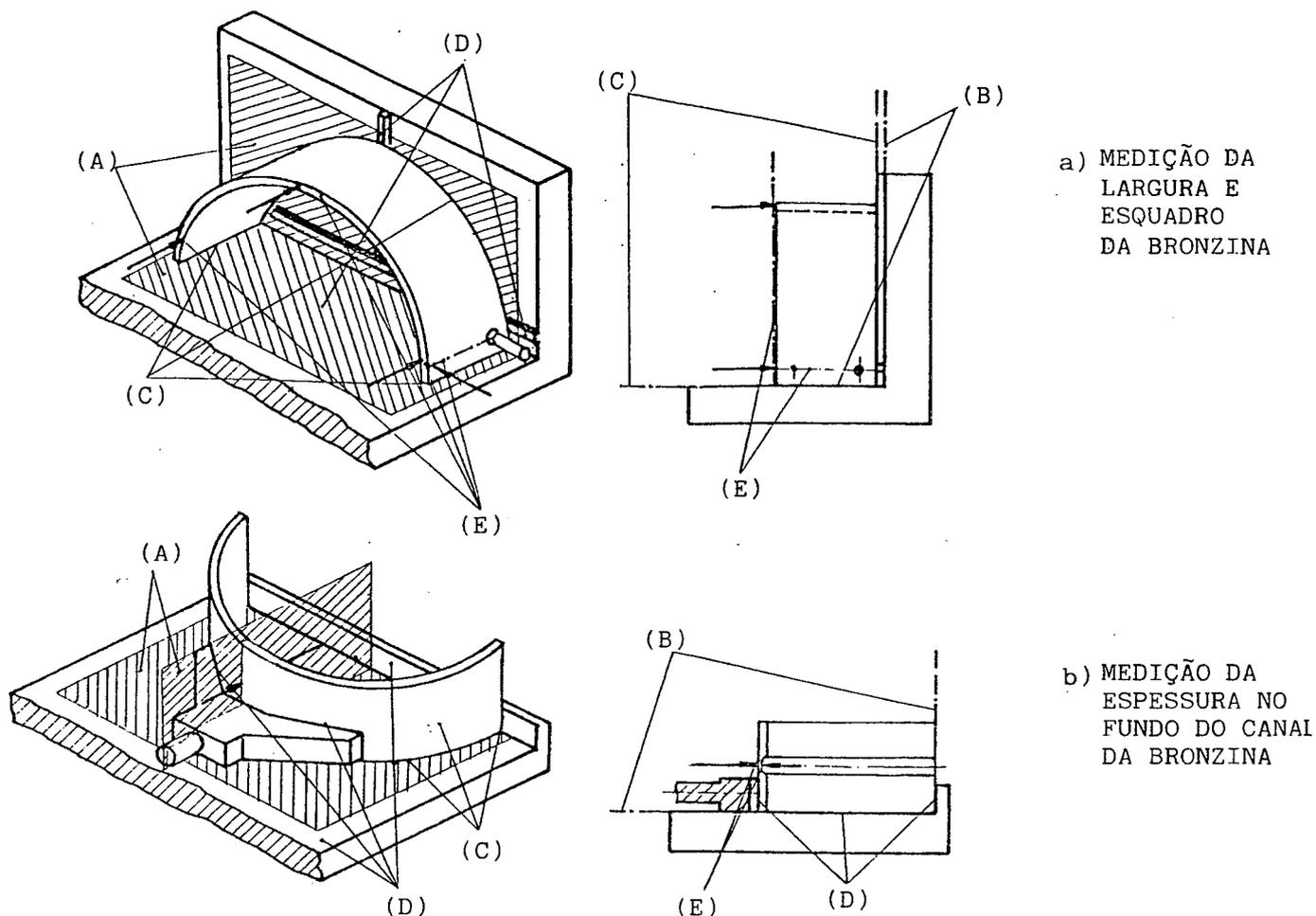


Fig. 2.13 - Exemplos de uma peça a medir com planos e superfícies de posicionamento. a) Medição da largura e esquadro. b) Medição da espessura no fundo do canal

(A) planos de referência (B) planos de posicionamento (C) superfícies de posicionamento da peça (D) superfícies de posicionamento do dispositivo (E) superfícies de medição

Para seleção das superfícies e a configuração dos elementos de posicionamento, devem ser observados os seguintes aspectos e requisitos:

- posição dos pontos de contato dos apalpadores nas superfícies de medição da peça;
- dimensões com tolerâncias funcionais;
- colocação, posicionamento e retirada da peça do dispositivo de forma rápida e segura;
- simplicidade e custos reduzidos do dispositivo;
- forma geométrica e acabamento superficial da superfície de posicionamento da peça.

Algumas recomendações para posicionamento de peças em dispositivos são:

- escolher preferencialmente as maiores superfícies da peça;
- as superfícies planas com acabamento em bruto (peças fundidas), devem ser posicionadas em três pontos de apoio;
- o posicionamento deve ser realizado em relação as superfícies externas da peça com menor tolerância de fabricação.

Em geral as superfícies de posicionamento da peça, classificam-se em superfícies planas, planas-curvas e curvas de formas livres. Estas últimas devem ser evitadas por serem de grande complexidade para posicionamento.

A concepção dos elementos de posicionamento deve considerar as tolerâncias dimensionais e de forma da peça. Os elementos de posicionamento podem ser subdivididos em elementos rígidos, ajustáveis e flexíveis (fig. 2.14).

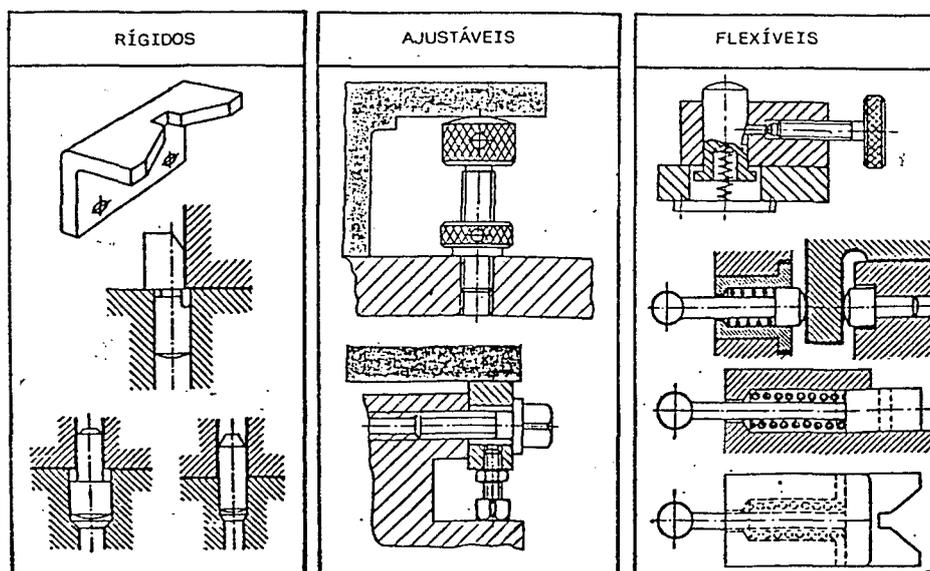


Fig. 2.14 - Subdivisão dos elementos de posicionamento

Alguns exemplos de elementos de posicionamento podem ser observados na figura 2.15.

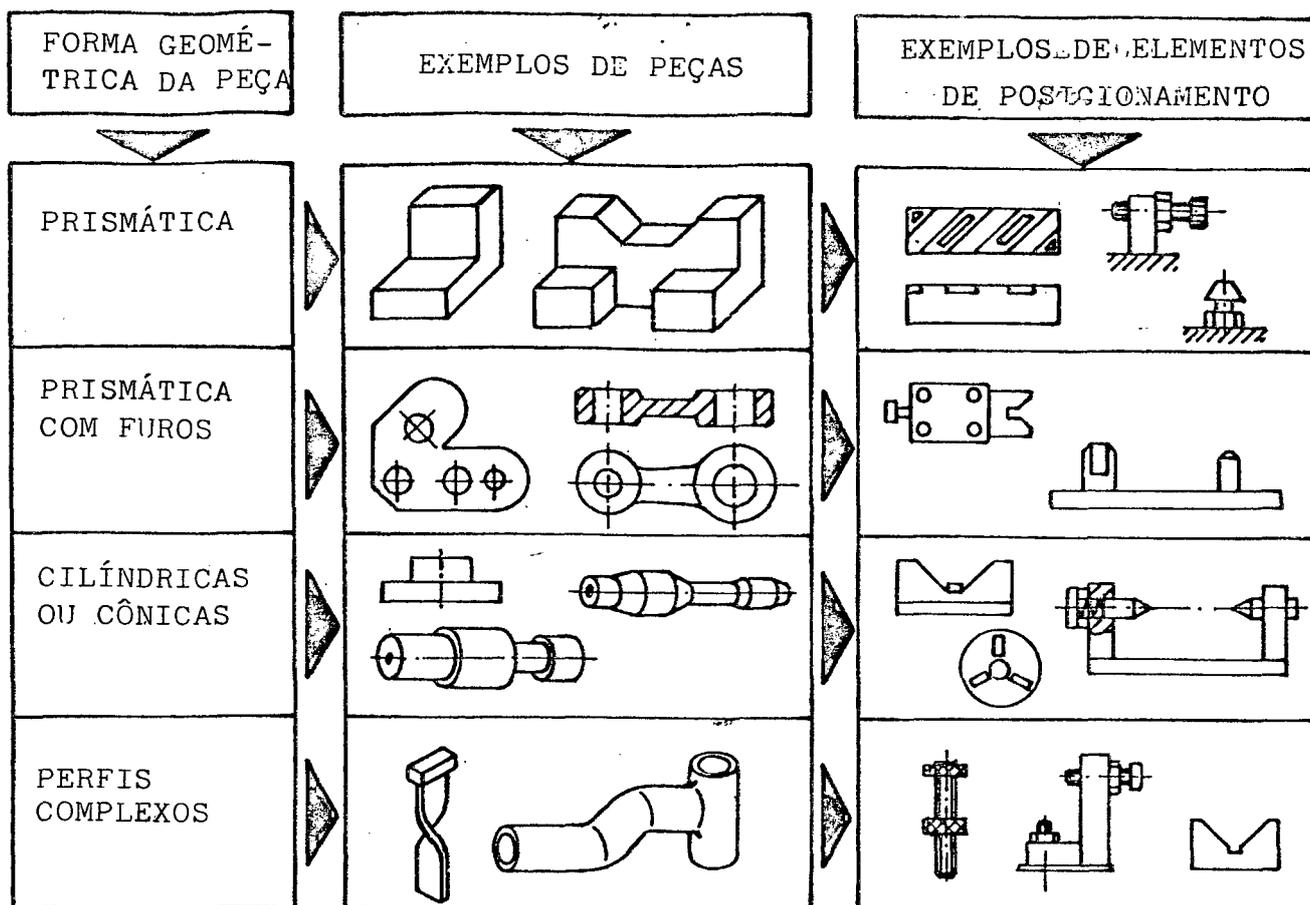


Fig. 2.15 - Elementos de posicionamento aplicados a diferentes geometrias de peças.

2.2.3 Fixar

A função fixar ou sujeitar, tem por objetivo garantir a posição estável dos TD e da peça no dispositivo, evitando perturbações durante o processo de medição.

A fixação dos TD é realizada principalmente mediante elementos de aperto que estrangulam o diâmetro de fixação, assegurando assim a sua posição.

Na operação de fixar a peça a medir, é necessária a aplicação de uma força de fixação, que pressione a peça contra a superfície de posicionamento do dispositivo, com um mínimo de deformações, assegurando a qualidade das superfícies de contato e geometria original da peça.

Esta força de fixação deverá ser suficiente para suportar as forças de medição, oriundas dos TD e apalpadores em contato com a peça. Normalmente, a força de medição de um transdutor, não ultrapassa a 3N, o que resulta na necessidade de aplicação de uma força de fixação relativamente pequena, mas suficiente para manter a posição da peça no dispositivo.

Existe uma série de alternativas e princípios de atuação da força de fixação sobre a peça, como por exemplo.: mecânico, pneumático, hidráulico, magnético, eletromecânico, etc. [1 a 4].

Os elementos de fixação devem ser selecionados e configurados de maneira a:

- alcançar um curto tempo do processo de fixação;
- alcançar pequena força manual necessária para produzir a força de fixação;
- não ultrapassar à força de fixação necessária, evitando deformações dos elementos;
- possibilitar uma manipulação simples da peça e dos elementos de fixação.

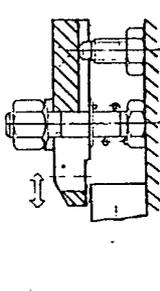
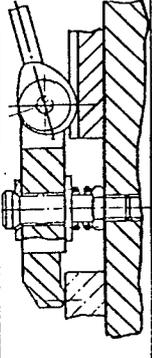
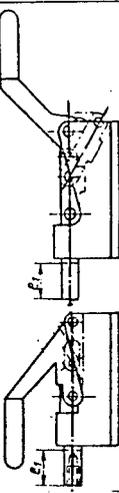
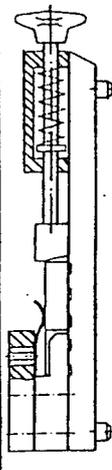
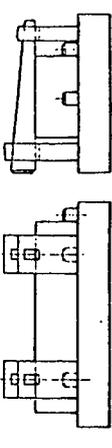
Na seleção dos elementos de fixação mais adequados ao dispositivo de medição, devem ser observados fatores como: material, geometria, acabamento superficial, dimensões da peça à medir, sentido e módulo da força de medição, frequência do processo de medição e custo do meio de fixação.

Para que não ocorram distorções ou deformações da peça no dispositivo, os princípios de fixação que independem da atuação direta da força humana, tem sido empregados com maior frequência.

Na figura 2.16, estão apresentados os vários tipos de elementos funcionais normalmente aplicados na fixação das peças, sendo discriminadas suas características, vantagens e limitações.

A literatura apresenta, detalhadamente as, características, seqüência de cálculo e exemplos de aplicações destes elementos [1 a 4].

ELEMENTOS DE FIXAÇÃO DA PEÇA A MEDIR

PRINCÍPIO	TÍPOS	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS	LIMITAÇÕES	EXEMPLOS
MECÂNICO	PARAFUSO	<ul style="list-style-type: none"> Comprimento $> 0,7 \times$ diâmetro da peça Utilizam alavancas, manipulou ou necessitam de chaves São elementos normalizados 	<ul style="list-style-type: none"> ampla gama de elementos normalizados e disponíveis simplicidade de fabricação permitem grandes esforços baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> tempos longos para grandes deslocamentos dependem da força humana que pode causar deformações 	
	EXCÊNTRICO OU ESPIRAL	<ul style="list-style-type: none"> necessária utilização de materiais endurecidos deve ter autotravamento pequeno ângulo de inclinação da alavanca produz um pequeno deslocamento da peça de contato 	<ul style="list-style-type: none"> custos de fabricação relativamente pequenos rapidez de fixação 	<ul style="list-style-type: none"> restrição devido liberação por vibrações pequena área de contato causa desgaste força é dependente do ângulo de inclinação da alavanca 	
	MECANISMO DE ALAVANCAS	<ul style="list-style-type: none"> Pode ser operado manualmente ou com automatismo fixador rápido são normalizados 	<ul style="list-style-type: none"> longos deslocamentos do elemento de fixação em curto espaço de tempo força constante e ajustável boa manobrabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> construção com vários elementos 	
	KOLA	<ul style="list-style-type: none"> fixação instantânea empregado como elemento auxiliar de posicionamento e fixação 	<ul style="list-style-type: none"> independem da força humana força constante construção simples e de baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> fixação não é segura inadequado a aplicações dinâmicas e vibrações adequado para pequenas forças 	
	CUNHA	<ul style="list-style-type: none"> pequeno deslocamento da peça de contato em tempos pequenos deven ser autotravantes ângulos de 1:10, 1:12 e 1:20 frequente atuação indireta na peça 	<ul style="list-style-type: none"> baixo custo simplicidade construtiva possibilidade de desvio de direção da força de fixação 	<ul style="list-style-type: none"> a grandeza da força de fixação é imprecisa a atuação direta causa danos à superfície da peça 	

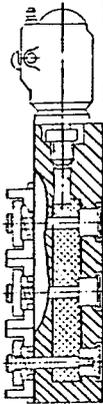
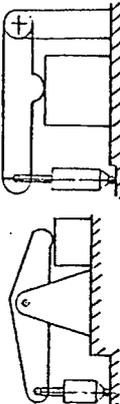
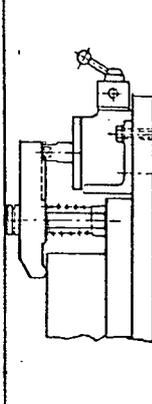
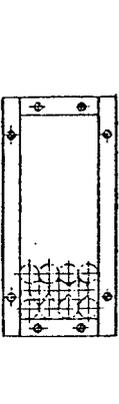
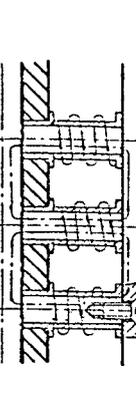
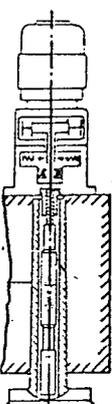
MEIOS TRANSMISORES DE PRESSÃO	MEIOS FLEXÍVEIS	<ul style="list-style-type: none"> perda da qualidade ao longo do tempo com a diminuição do volume necessita de vedações 	<ul style="list-style-type: none"> independente de equipamentos de produção de pressão possibilita vários pontos de contato com a peça simultaneamente 	<ul style="list-style-type: none"> para altas pressões necessita de ajustes estreitos e bom acabamento superficial 	
	AR	<ul style="list-style-type: none"> meio compressível sujeição em curto espaço de tempo empregado como método automatizado de fixação 	<ul style="list-style-type: none"> meio facilmente disponível elementos de construção disponíveis simplicidade de transmissão do meio mediante mangueiras confiabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> grandes dimensões dos cilindros pneumáticos para altas pressões não possibilita paradas intermitentes 	
	ÓLEO	<ul style="list-style-type: none"> necessidade de pouca quantidade do meio alcança pressões até 32 MPa método automatizável de fixação 	<ul style="list-style-type: none"> possibilita altas pressões com pequenas dimensões dos elementos elementos normalizados e disponíveis adequado para grandes dispositivos 	<ul style="list-style-type: none"> necessita de vedações eficientes necessita de gerador de pressão hidráulico os lugares de fixação não podem ser tão próximos 	
	PLACAS MAGNÉTICAS	<ul style="list-style-type: none"> fixação de peças planas força de fixação = 0,07 N/mm² quanto maior a face plana da peça maior a força de fixação 	<ul style="list-style-type: none"> não necessita de fonte de energia não é sensível à umidade são normalizados e de baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> pequena força de fixação necessidade de desmagnetização das peças pode provocar problemas aos medidores 	
ELETRICO MECANICO	ELETRO-MAGNETICO	<ul style="list-style-type: none"> necessitam de uma ligação de corrente contínua bem como interromper para cessar o efeito magnético 	<ul style="list-style-type: none"> são automatizáveis possibilitam fácil retirada das peças 	<ul style="list-style-type: none"> deveriam possuir vedações contra umidade e água necessita de fonte de energia 	
	MOTOR ELETRICO	<ul style="list-style-type: none"> são compostos de um eletromotor e um redutor e uma transmissão de mov. rotativo para linear 	<ul style="list-style-type: none"> pequenos tempos de fixação automatizável utilização de energia elétrica existente 	<ul style="list-style-type: none"> equipamento de grandes dimensões e de alto custo 	

Fig. 2.16 - Elementos de fixação da peça a medir

A comparação de tempos de fixação entre diferentes princípios de atuação mostrados na figura 2.17, vem fundamentar a seleção dos elementos de fixação.

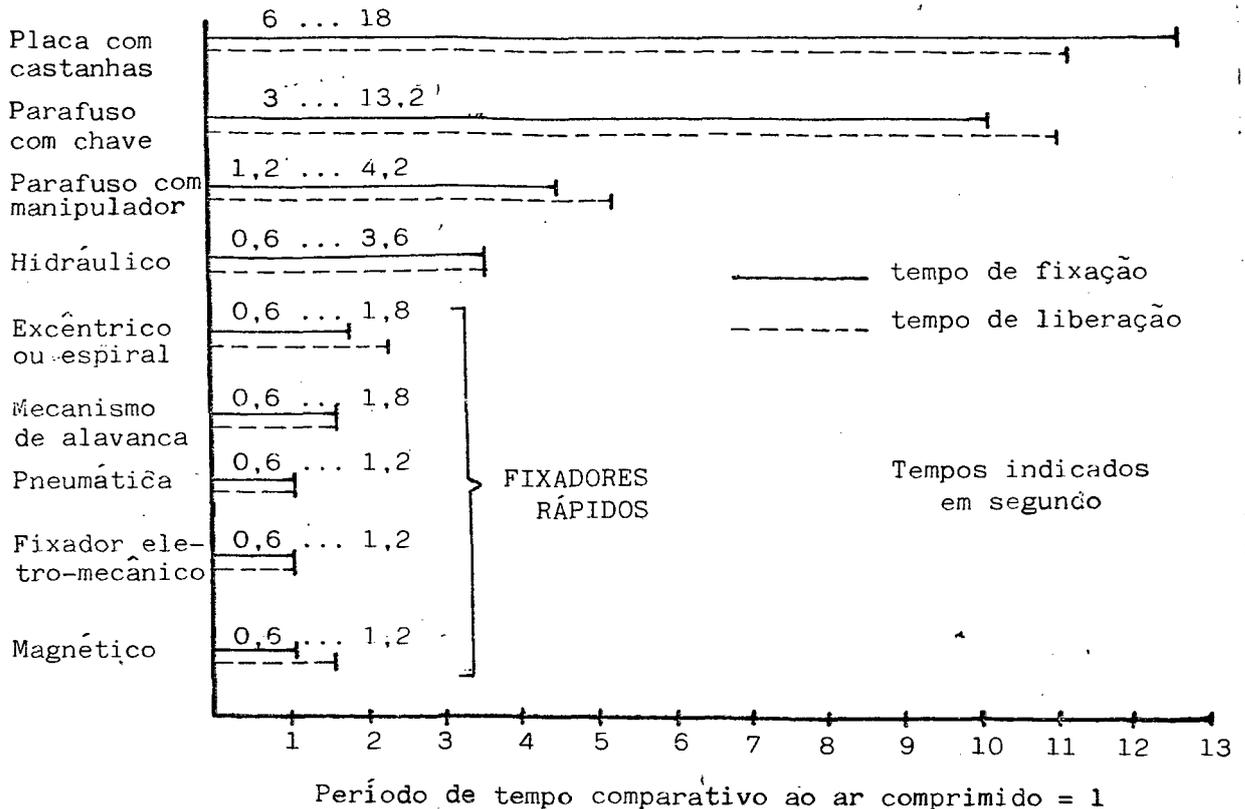


Fig. 2.17 - Tempos de fixação dos diversos princípios de fixação [2]

Existe uma variedade de elementos e dispositivos padronizados para fixação de peças em processos de usinagem [1 a 4], que também podem ser empregados em um Dm (fig. 2.18).

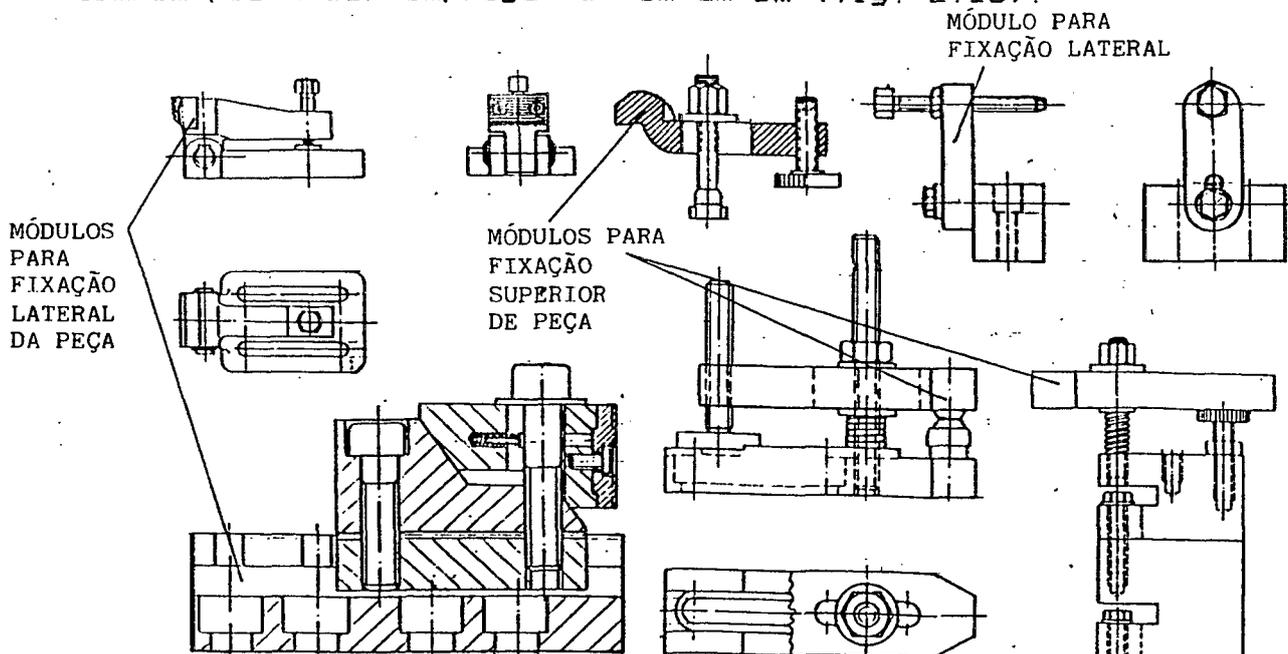


Fig. 2.18 - Dispositivos de fixação típicos de conjuntos modulares para processos de fabricação [17,21 e 22].

2.2.4 Guiar

As guias assumem importância especial em dispositivos de medição, pois em muitos casos requer-se um deslocamento de algum elemento funcional.

Sua aplicação em Dm atende principalmente as seguintes exigências:

- deslocamento da peça a medir em relação aos TD para realização da medição dos parâmetros;
- ajuste da posição dos elementos de medição, promovendo a flexibilidade desejada, para possibilitar a medição de peças de diferentes dimensões;
- deslocamento dos suportes de transdutores durante o processo de medição.

As guias subdividem-se em guias lineares (translação) e mancais (rotação).

a) Guias lineares

As guias lineares são classificadas quanto ao par de justaposição nos seguintes aspectos:

- Forma do par
 - . guias prismáticas
 - . guias cilíndricas
- Segurança do par
 - . guias abertas (justaposição por força)
 - . guias fechadas (justaposição por forma ou material)
- Tipos de atrito
 - . guias de escorregamento
 - . guias de rolamento
 - . guias de molas laminares
 - . guias fluídicas

A adoção da classificação, segundo o tipo de atrito, é preferencial para subdivisão das guias lineares, pois o mesmo representa um critério importante para avaliação das guias.

Em Dm, cuja medição dependa diretamente do deslocamento dos elementos de medição em uma guia linear, deve-se optar por uma guia que garanta:

- movimentos suaves e contínuos;
- mínimo desgaste;
- folgas mínimas ou possibilidade de ajuste das folgas;
- retilidade das superfícies de justaposição;
- rigidez dos elementos de guia, em razão das exigências de pequena deformação, para suportar forças transversais em sua aplicação e com a menor massa possível.

Os principais tipos de guias lineares adotadas em Dm, suas vantagens e limitações estão discriminadas na fig. 2.19.

Como elementos de guias lineares são comumente adotados em Dm (fig. 2.20):

- guias com gaiolas de esferas;
- mesas de deslocamento com rolamentos;
- guias de escorregamento de "cauda de andorinha";
- guias de escorregamento de PTFE (Politetrafluoretileno);
- guias de molas laminares paralelas.

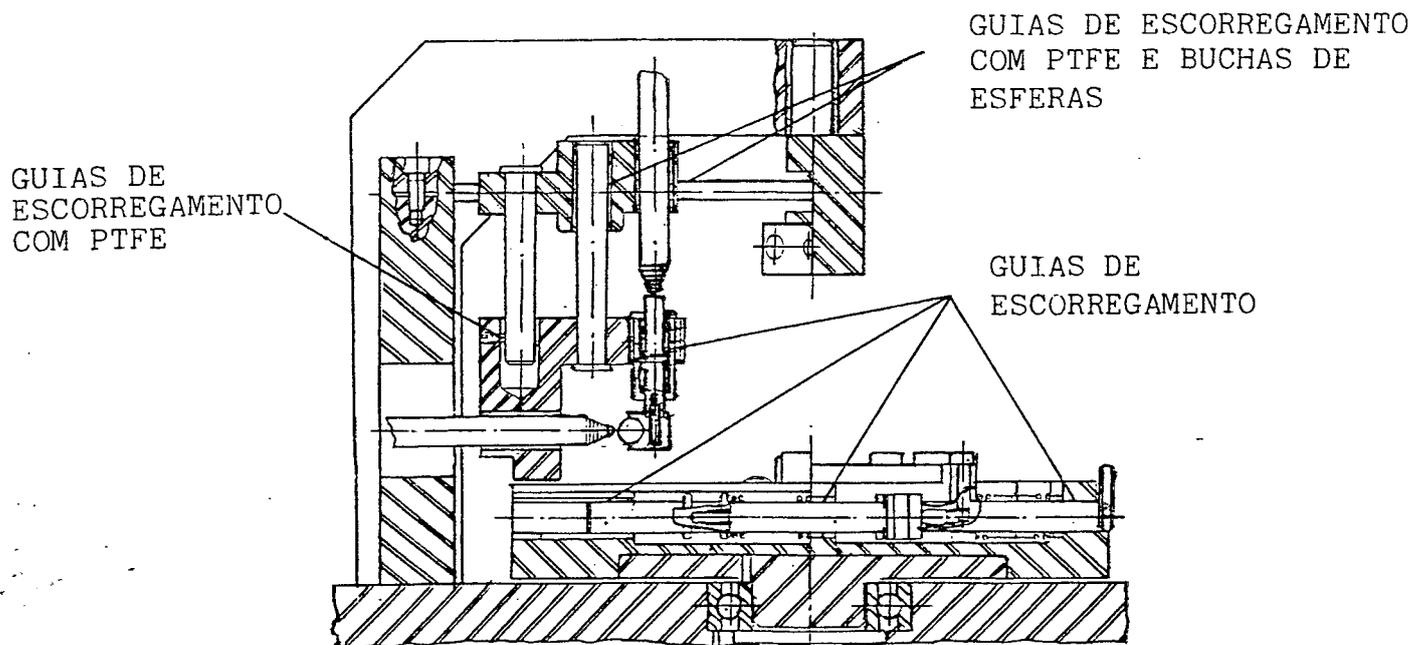


Fig. 2.20 - Exemplos de aplicações de guias lineares em dispositivo de medição [59,60 e 61].

GUIAS LINEARES DE PRECISÃO				
TIPO DE ATRITO (GUIAS)	EXEMPLOS	APLICAÇÕES EM DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO	VANTAGENS	LIMITAÇÕES
ESCORREGAMENTO		<ul style="list-style-type: none"> guias de ajuste da posição e fixação dos elementos de medição onde se exige maior rigidez para suportar cargas e limitada precisão 	<ul style="list-style-type: none"> Simplicidade de fabricação resistência à grandes esforços grande rigidez transversal à direção do movimento 	<ul style="list-style-type: none"> grande resistência de atrito efeitos "stick-slip" produz histérese nos instrumentos sujeito à emperração dependendo do acabamento superficial, coef. de atrito do comprimento de contato e do ponto de atuação da força
ROLAMENTO		<ul style="list-style-type: none"> utilizado para movimentos suaves e de precisão em peças de deslocamento da peça ou dos transdutores 	<ul style="list-style-type: none"> Baixo atrito, sem "stick-slip" Desgaste desprezível Pouco desgaste Pouca necessidade de lubrificante 	<ul style="list-style-type: none"> pequena capacidade de carga em função do número de elementos rolantes maior custo para garantir boa precisão da guia
MOLAS		<ul style="list-style-type: none"> utilizado como elemento de guia para posicionamento dos transdutores e hastes apalpadoras, onde se exige mínimo atrito, nenhum desgaste e folgas em um pequeno curso de deslocamento 	<ul style="list-style-type: none"> atrito desprezível (interno do material) e folgas desgaste desprezíveis relativa flexibilidade de fabricação e montagem momento de retorno disponível adequado para movimentos rápidos 	<ul style="list-style-type: none"> pequeno curso de deslocamento espaço ocupado relativamente grande sensível a vibrações pequena rigidez transversal para alta precisão deve se observar os engastes e dimensões dos elementos na montagem
LAMINARES		<ul style="list-style-type: none"> utilizado em deslocamentos de alta precisão com grandes curso de deslocamento, com isenção de atrito e desgaste e alta capacidade de carga 	<ul style="list-style-type: none"> atrito e desgaste desprezível sem "stick-slip" alta capacidade de carga utilização de vários materiais emprego à altas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> projeto e construção complexo e de alto custo necessidade de compressor e de limpeza do ar alta qualidade das superfícies materiais com resistência à corrosão
FLUIDICAS				

Fig. 2.19 - Guias lineares aplicáveis em dispositivos de medição

Em dispositivos e instrumentos de medição, são muitas vezes adotadas, guias de molas laminares paralelas, devido a suas características vantajosas como [63,64,65 e 66]:

- isenção de folga ;
- atrito desprezível;
- isenção de desgaste;
- força de retorno disponível.
- simplicidade de fabricação e montagem.

Alguns exemplos de configurações de guias de molas laminares paralelas e suas aplicações em instrumentos e dispositivos pode ser observado na figura 2.21.

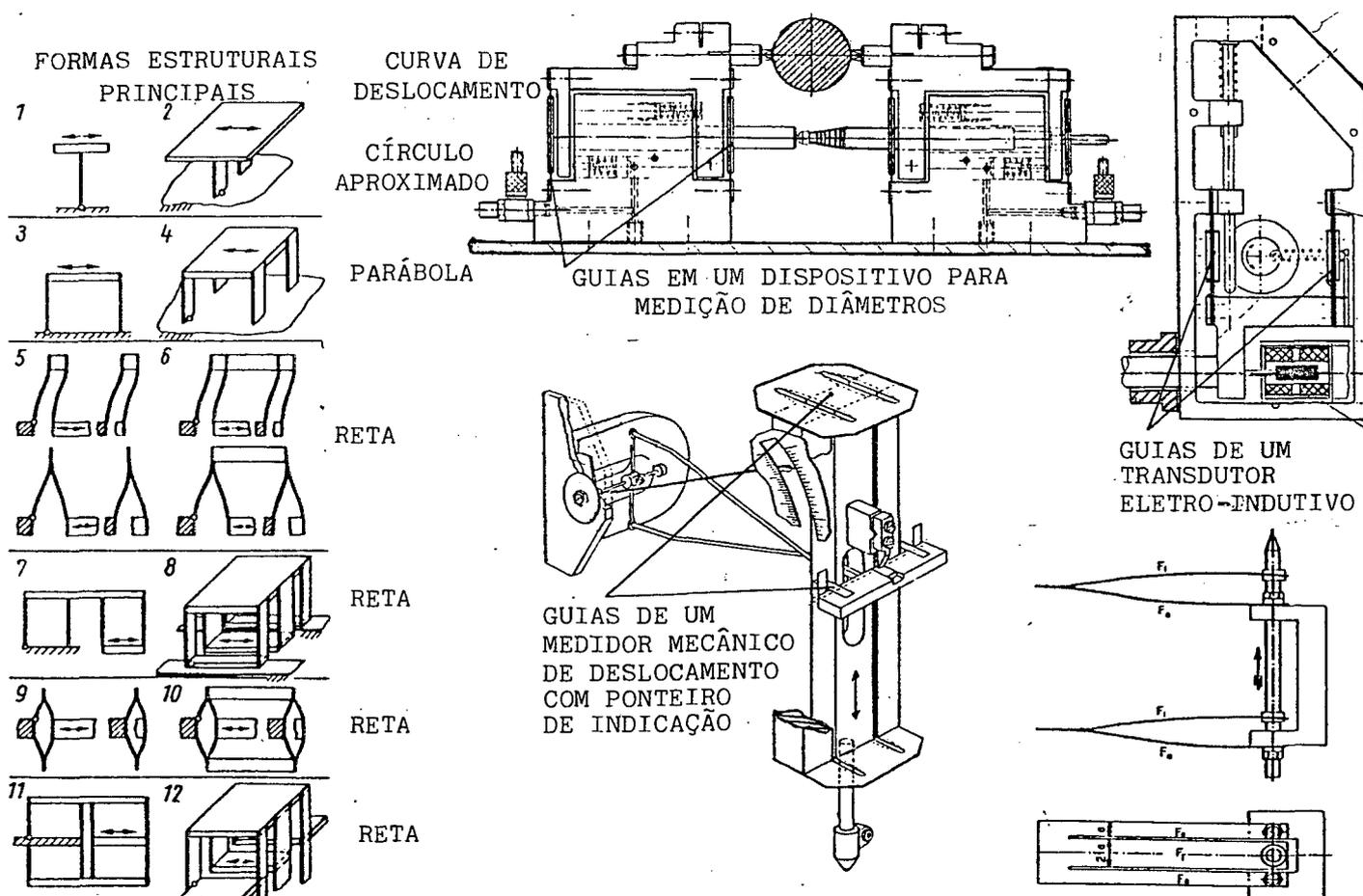


Fig. 2.21 - Tipos e aplicações das guias lineares de molas laminares paralelas [31,58,62 e 63].

b) Mancais

Os mancais são classificados segundo os critérios da figura 2.22.

CRITÉRIO	CLASSIFICAÇÃO	EXEMPLOS
Direção de atuação da força	<ul style="list-style-type: none"> - mancais axiais (a) - mancais radiais(b) - combinações (radiax) 	
Segurança do par de justaposição	<ul style="list-style-type: none"> - aberto (a) fechado (b) - mancais axial: livre (c), fixo (d), e apoiado (e) 	
Tipo de atrito do par	<ul style="list-style-type: none"> - mancais de escorregamento(a) - mancais de rolamento(b) - mancais de molas laminares(c) - mancais fluídicos(d) 	
Forma geométrica do elemento de contato	<ul style="list-style-type: none"> - cilindros(a) - cones(b) - gumes(c) - pontas(d) - esferas(e) - agulhas(f) 	

Fig. 2.22 - Classificação dos mancais de precisão.

Basicamente, os mancais mais adotados são os de rolamento e de escorregamento (fig. 2.23).

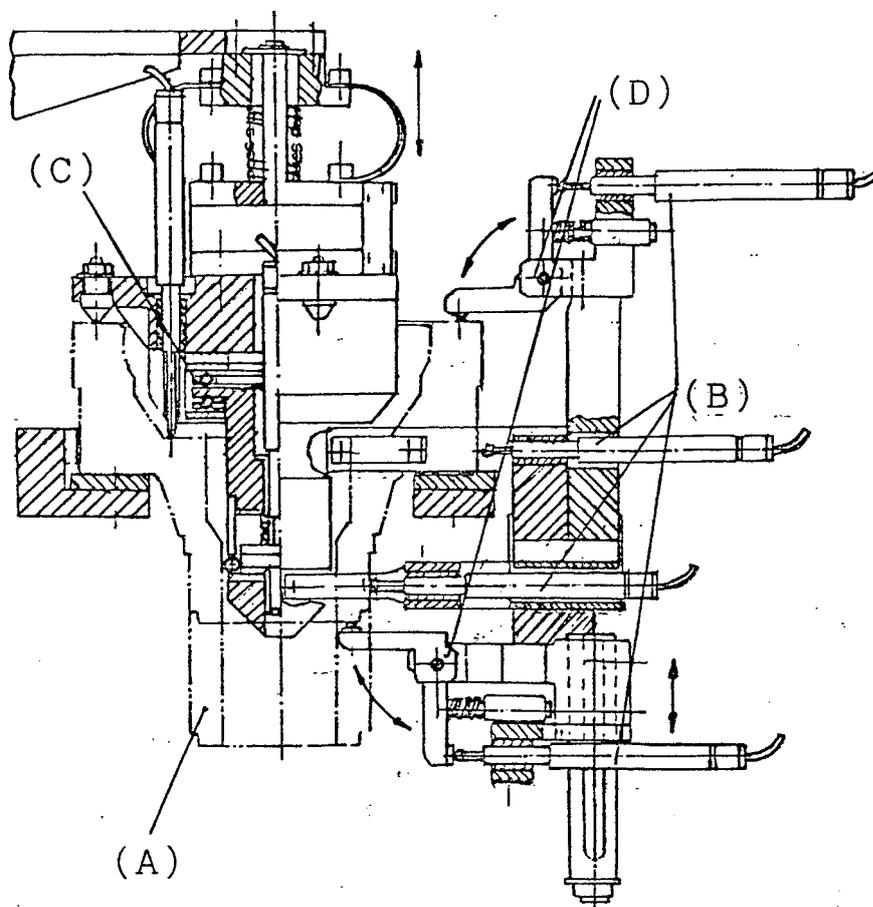


Fig. 2.23 - Exemplo de aplicação de mancais em um dispositivo de medição especial [34].

(A) peça de medição (B) transdutores (C) mancais axiais de rolamento (D) mancais de escorregamento

Na construção de instrumentos e Dm utilizam-se também, outros tipos de mancais de baixo atrito, como por exemplo, o mancal de pontas, mancal de gumes, mancal de molas laminares e mancal aerostático.

2.2.5 Suportar

Esta função visa realizar a sustentação estrutural do dispositivo, permitindo a disposição dos demais elementos funcionais e da própria peça à medir.

A forma dos elementos de suporte, é dependente das dimensões, da configuração geométrica e da massa da peça a medir. O fluxo das forças de medição e de fixação, deverá ser absorvido pelos

elementos de suporte e transmitido até a placa base do dispositivo.

Os elementos de suporte deverão ser dimensionados segundo os princípios da mecânica dos sólidos e resistência dos materiais, para garantia de:

- estabilidade estrutural e precisão suficiente;
- deformações dentro de tolerâncias aceitáveis;
- rigidez estática e dinâmica;
- admissão e transmissão de forças de fixação e de medição da peça à medir e da massa dos demais elementos;
- fabricação econômica.

Os tipos de construção dos elementos de suporte, exemplos, vantagens e limitações estão resumidos na figura 2.24.

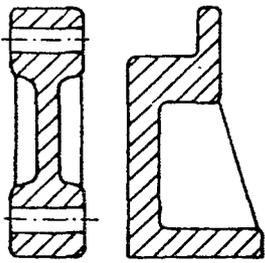
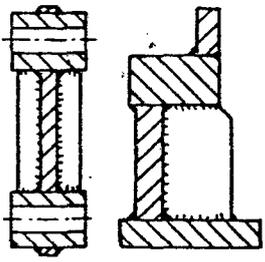
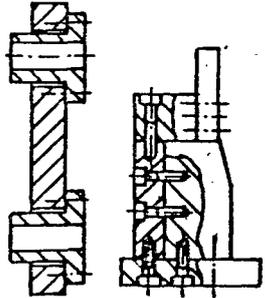
TIPOS DE CONSTRUÇÃO	EXEMPLOS	VANTAGENS	LIMITAÇÕES
CONSTRUÇÃO FUNDIDA		<ul style="list-style-type: none"> - Maior aproveitamento de material - São considerados alívios de massa - Possui característica de amortecimento de vibrações - Construção inteiriça 	<ul style="list-style-type: none"> - Resistência de flexão e torcional menor que o aço - Anti-econômico para produção unitária - As tarefas de usinagem são necessárias - São necessários maiores prazos para confecção do modelo e fundição
CONSTRUÇÃO SOLDADA		<ul style="list-style-type: none"> - Pequenos custos para produção unitária - Pequenos prazos - Simplicidade de montagem e alterações 	<ul style="list-style-type: none"> - Alteração do estado original do material - Tensões internas - Possibilidade de deformação - As superfícies importantes para a função, frequentemente devem ser reusinadas
CONSTRUÇÃO PARAFUSADA E PINADA		<ul style="list-style-type: none"> - Possibilidade de montagem e desmontagem - Boa precisão pode ser alcançada - Possibilidade de ajuste - Pequenos prazos e custos para produção unitária - Próprio para pequenos dispositivos 	<ul style="list-style-type: none"> - A rigidez estática é menor que os outros tipos de construção - Maior número de elementos para montagem

Fig. 2.24 - Tipos de construção dos elementos de suporte

3 SISTEMÁTICA DE DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO

3.1 SISTEMÁTICA DE DESENVOLVIMENTO

A racionalização do processo de projeto já foi intensamente pesquisada nos últimos 30 anos, sendo utilizados métodos diversificados para procura de soluções e de decisão da melhor solução para desenvolvimento, encontrando-se atualmente vasta literatura sobre o assunto [50,51,52 e 67].

No entanto, com o objetivo de se desenvolver um Dm é necessário adaptar a sistemática e os métodos existentes à solução de uma tarefa de medição.

A importância de se desenvolver e seguir uma sistemática é devido principalmente à:

- complexidade dos Dm em função da crescente exigência de pequena incerteza de medição (I_m), para controle de diversos parâmetros numa mesma peça;
- altos custos e curtos prazos para desenvolvimento;
- racionalização do processo de projeto, que é moroso em relação às fases de construção e experimentação;
- necessidade da indústria em resolver seus problemas de controle de qualidade no menor tempo possível;
- determinação da melhor solução técnico-econômica para a tarefa de medição.

No desenvolvimento de um Dm, é necessário primeiramente resolver o problema da tarefa de medição, para então solucionar o problema de projeto do dispositivo mecânico.

Assim, uma vez definido o número, o tipo e a posição dos transdutores, bem como o princípio e o método de medição que caracterizam o processo de medição, pode-se elaborar e selecionar as soluções dos elementos de posicionamento, fixação, guia e suporte, que melhor atendem aos requisitos da tarefa de medição.

O processo de desenvolvimento de Dm tem como base o processo de desenvolvimento geral dos produtos (VDI 2222), apresentando algumas fases e aspectos específicos.

Na figura 3.1, foi formulado um quadro comparativo da seqüência de fases e atividades correspondentes ao processo de desenvolvimento construtivo de Dm.

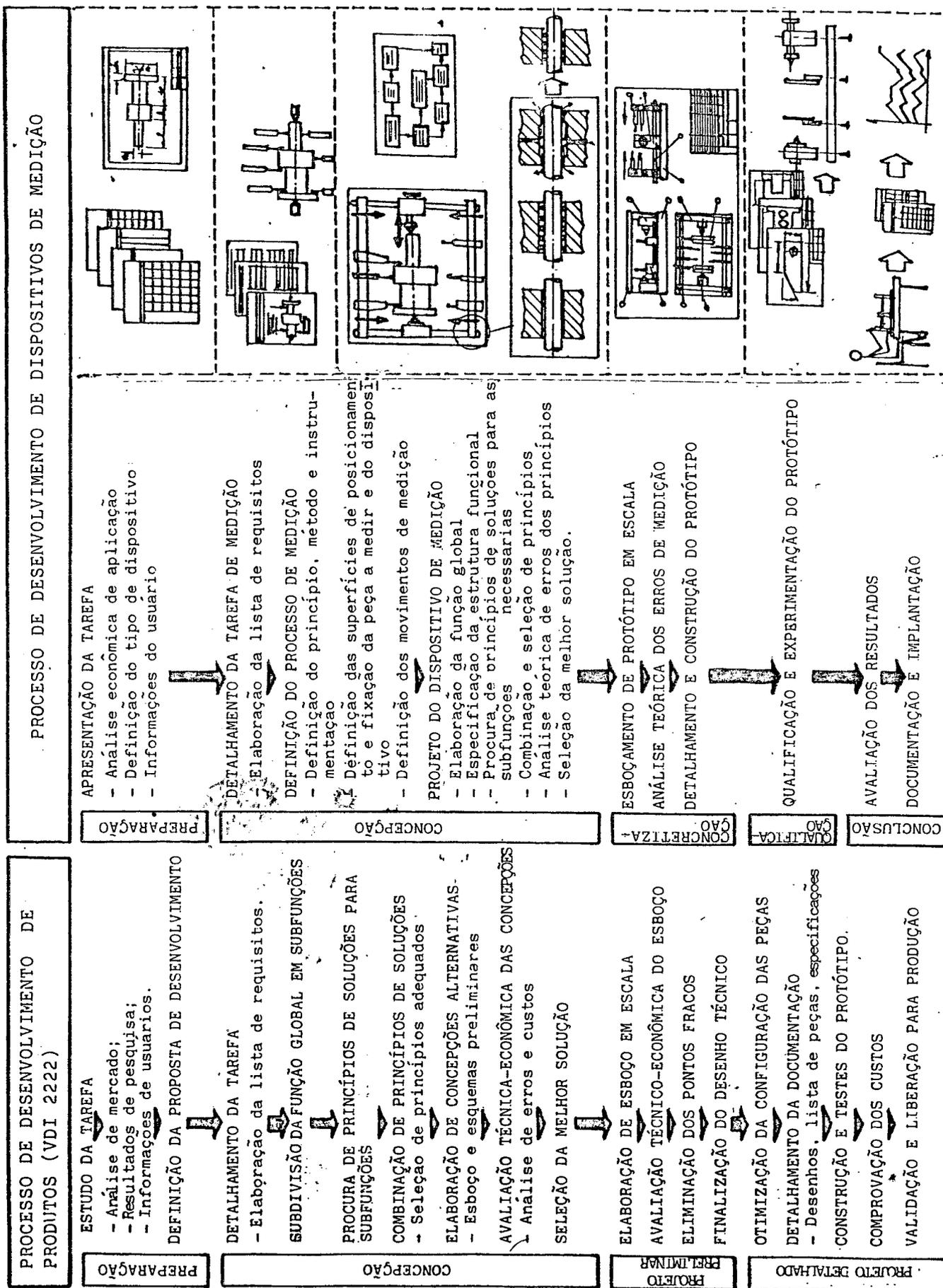


Fig. 3.1 - Processo de desenvolvimento de dispositivos de medição

3.2 DESCRIÇÃO DAS FASES DE DESENVOLVIMENTO

3.2.1 Apresentação da Tarefa

Esta primeira fase do processo de desenvolvimento, tem a função de obter todas as informações necessárias à tarefa de medição. Nela é realizada uma análise de todos os fatores influentes para a concepção de projeto do dispositivo, com o objetivo de determinar a viabilidade técnica, temporal, financeira e econômica para solucionar o problema de medição (fig. 3.2).

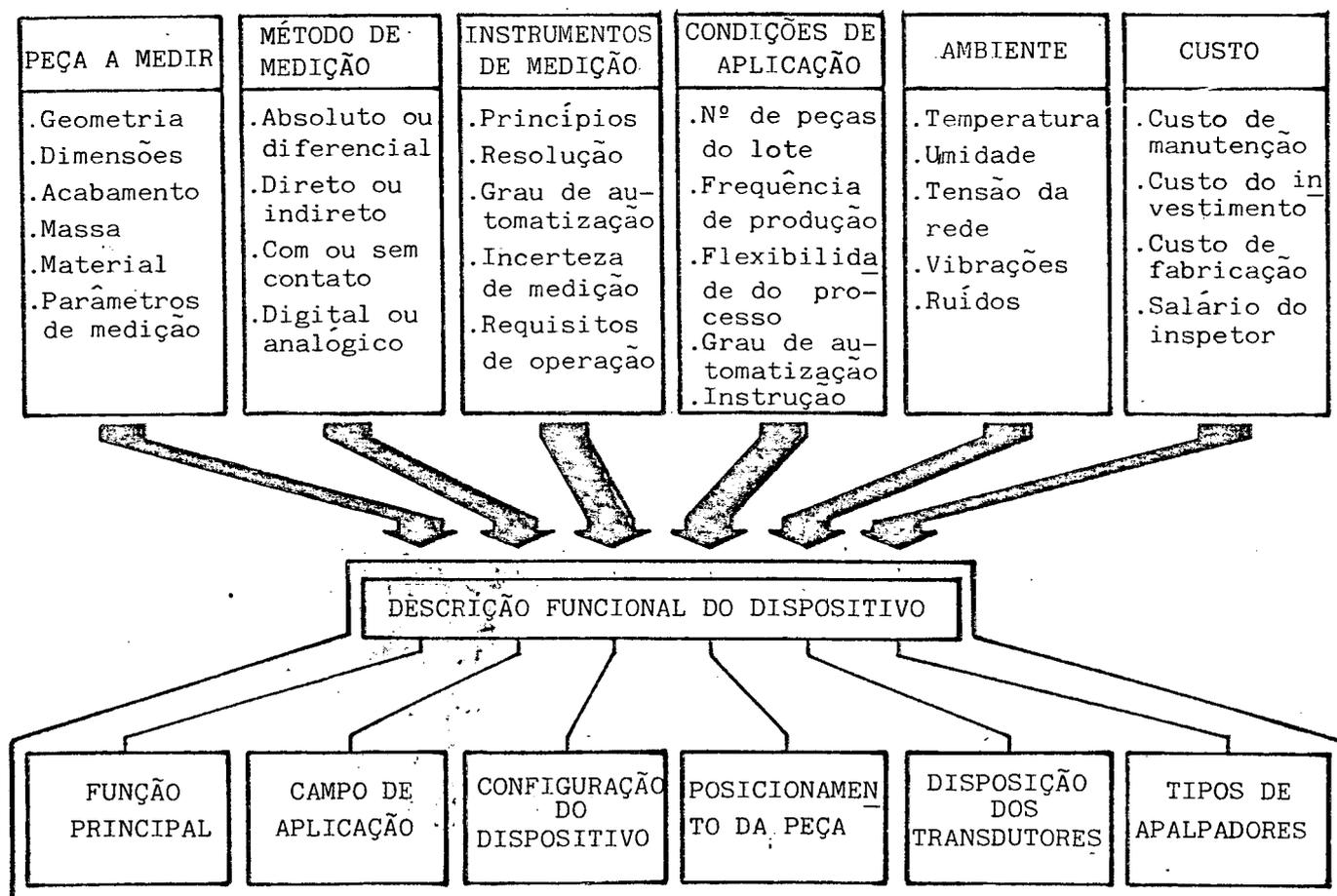


Fig. 3.2 - Fatores de influência para concepção de projeto de um dispositivo de medição

Como resultado, obtém-se a folha da tarefa de medição com os requisitos e informações relevantes ao desenvolvimento do Dm.

EXEMPLO

Tomando como exemplo as atividades realizadas para desenvolvimento de um dispositivo para medição dos intervalos entre anéis de válvulas pneumáticas (fig. 3.3) as informações disponíveis nesta primeira fase de projeto foram [54]:

- a empresa DRSTA - Pneumatik ZELLA MEHLIS, apresenta 30% de válvulas pneumáticas refugadas ao ano, que corresponde à 725h/ano e despesas de DM 140.000/ano, o que torna justificável o investimento no desenvolvimento de um dispositivo de medição;
- o problema que ocorre é o desvio na posição dos anéis de alumínio fora das tolerâncias especificadas, na montagem dentro do furo da carcaça da válvula pneumática. Estes desvios, influenciam a funcionalidade da válvula, em consequência das falhas de vedação dos anéis, que são verificados no controle final do processo;
- é necessário o controle da posição axial dos seis anéis colados em relação à face de referência da carcaça da válvula;
- não existe nenhum método ou instrumento de medição que possa ser adotado diretamente à solução desta tarefa, sendo necessário o estudo e desenvolvimento de um método automatizável, com adaptação de alguns instrumentos de medição disponíveis.
- as tolerâncias das dimensões a serem controladas são de $\pm 0,2$ mm.

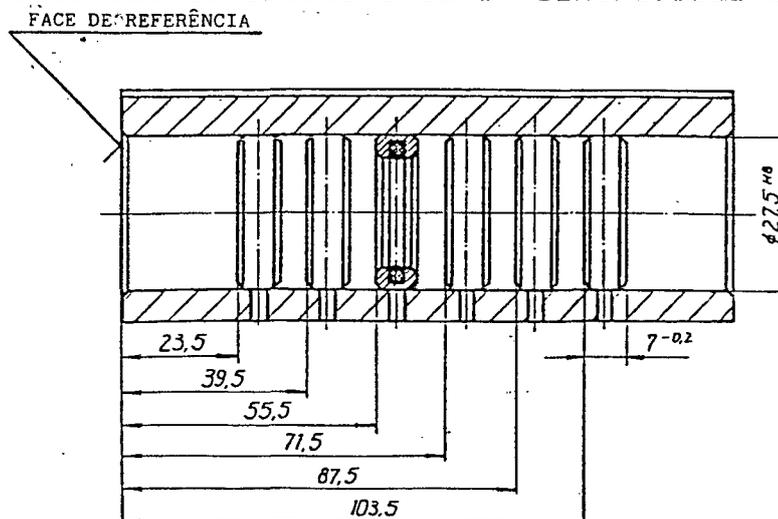


Fig. 3.3 - Válvula pneumática e dimensões dos afastamentos dos anéis à face de referência [54].

3.2.2 Detalhamento da Tarefa

Nesta fase, deve-se definir todas as exigências de projeto do dispositivo e conhecer o estado da arte para solucionar o problema em questão.

Um método eficiente para análise e determinação dos requisitos, é elaborar uma matriz entre os fatores de influência e as subfunções do dispositivo como mostra a figura 3.4 [2].

Através desta análise, pode-se obter uma listagem dos requisitos exigidos (exigências) e requisitos desejáveis de solução, servindo como um instrumento de controle para a concepção do dispositivo.

FATORES DE INFLUÊNCIA SUBFUNÇÕES PARCIAIS	1. Peça à medir					
	2. Dispositivo de medição					
	3. Lote de peças					
	4. Condições de medição					
	5. Custo de desenvolvimento					
	6. Inspetor de medição					
	1. Colocação da peça	1.1	1.3	1.4	1.6	
2. Posicionamento da peça	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
3. Fixação da peça	3.1	3.3	3.4	3.5	3.6	
4. Guiar as peças aos medidores	4.1	4.2	4.4	4.5	4.6	
5. Medição dos parâmetros	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6
6. Liberação e retirada da peça	6.1	6.3			6.6	
7. Suporte dos elementos		7.2	7.4	7.5	7.6	

LISTA DAS FUNÇÕES PARCIAIS	
Subfunções Parciais	Requisitos E - Exigidos D - Desejáveis
1. Colocação da peça.	D - Atenção na colocação.
1.1 Colocação para facilitar o controle dos parâmetros.	D - Rapidez de colocação.
1.3 Simplicidade de colocação.	:
...	:
3. Fixação da peça.	E - Garantia da fixação sem deformações.
3.1 Força deve atuar sobre faces adequadas na peça.	D - Rapidez de fixação e processo de fixação automatizável.
3.3 Simplicidade de fixação.	:
...	:
...	:

Fig. 3.4 - Exemplo de matriz para detalhamento dos requisitos de projeto

EXEMPLO

A lista de requisitos obtida pela matriz dos fatores de influência, para o exemplo prático, está resumido na fig. 3.5.

FATORES	PARÂMETROS	REQUISITOS E INFORMAÇÕES
PEÇA DE MEDIÇÃO	Tipo do local de medição	Superfície lateral de anéis de alumínio no interior do furo da válvula pneumática.
	Parâmetro de medição	Medição de afastamentos em relação à face de referência "X" da carcaça da válvula.
	Número de pontos de medição	Três pontos equidistantes na superfície lateral dos seis anéis colados no furo da válvula.
	Características da peça	Seis peças diferentes com comprimento de 82 a 133mm, largura de 50 a 63mm, altura de 41 a 45mm e massa de 275 a 600g.
CONDIÇÕES DE MEDIÇÃO	Dimensões e tolerâncias dos parâmetros	Mínimo de 19,5mm à 103,8mm com tolerância de +/-0,2 mm.
	Requisitos do Instrumento e dispositivo	<ul style="list-style-type: none"> . flexibilidade para controle de diferentes peças com diferentes intervalos dos anéis. . força de medição menor que 0,5N. . incerteza de medição +/- 0,05mm . princípio de medição automatizável . pequena constante de tempo para medições dinâmicas . rapidez do processo de medição 30s
	Colocação da peça	<ul style="list-style-type: none"> . manualmente mas com possibilidade de automatizar. . segurança contra falsa disposição.

Fig. 3.5 - Requisitos e informações para o dispositivo de medição da posição dos anéis da válvula pneumática.

3.2.3 Definição do Processo de Medição

Nesta fase são avaliados e definidos o princípio, e o método de medição adequados, bem como a instrumentação metrológica a ser utilizada na solução da tarefa de medição.

A análise e seleção do princípio mais adequado pode ser efetuado através dos métodos de valoração e decisão [50 e 51].

EXEMPLO

No desenvolvimento do dispositivo para controle dos afastamentos das válvulas pneumáticas, o processo de medição ficou caracterizado pelos seguintes princípios e métodos de medição:

a) Princípio de detecção da posição (apalpamento) das superfícies laterais dos anéis de alumínio:

Os princípios pesquisados foram:

- Sem contato . pneumático
- . capacitivo
- . óptico por triangulação
- Com contato . alavanca com transdutor eletro-indutivo
- . apalpador com contato elétrico
- . apalpador eletromecânico de interrupção

Os princípios foram avaliados pelo método de valoração com base nos seguintes critérios: estabilidade e rigidez; custos de desenvolvimento; grau de automatização; incerteza de medição; flexibilidade de aplicações; emprego para medições dinâmicas; grau de miniaturização e força de medição.

O princípio com os melhores valores relativos aos critérios especificados, foi aquele com contato por apalpador eletromecânico de interrupção.

b) Princípio para medição do intervalo

Para medição do intervalo, analisou-se princípios de medição relacionados a instrumentos existentes e disponíveis no mercado. Os princípios mais adequados à tarefa foram: eletromecânico (indutivo), resistivo, optomecânico (laser interferométrico) e eletro-óptico (incremental).

Com a avaliação das características dos instrumentos correspondentes, decidiu-se selecionar o instrumento de medição IKF - 100 de princípio eletro-óptico incremental, como a melhor solução para a tarefa de medição.

c) Método de medição

A medição dos intervalos será realizada através de um apalpador eletromecânico que, pelo contato na face lateral do anel de alumínio, emite um sinal para leitura do deslocamento, em relação à face de referência, com um transdutor incremental de princípio eletro-óptico.

Assim, o método de medição é:

- digital, em razão da medição de um sinal digital;
- direto, pois, o valor de medição corresponde à grandeza de medição;
- absoluto, pois, o valor de medição obtido é a dimensão real do parâmetro controlado;
- descontínuo, em razão da leitura e armazenamento de sinais de medição discretos ao longo do processo de medição.

O processo de medição correspondente ao princípio e método de medição descritos está apresentado na figura 3.6.

Os valores X_1 até X_2 são os valores de medição dos intervalos das superfícies laterais dos anéis em relação à superfície de referência do dispositivo.

Para determinar o intervalo dos anéis em relação ao plano de referência "X" da peça a medir, é necessário que seja adicionado o valor delta (Δ) ao valor de medição e subtraír a largura do anel L (Intervalo do anel = Valor de medição + Δ - L).

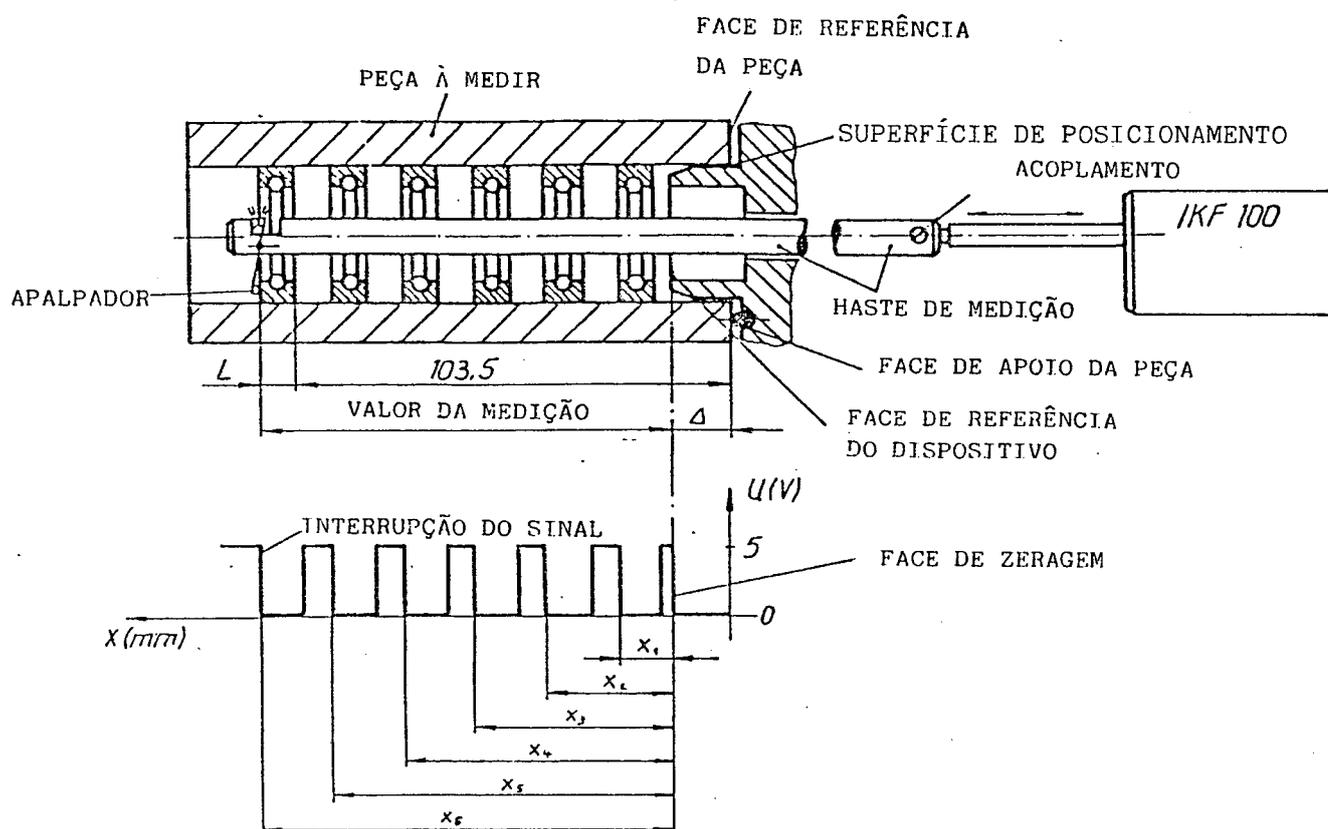


Fig. 3.6 - Esquema do processo de medição e apresentação do sinal de medição [54].

3.2.4 Desenvolvimento do dispositivo de medição

Na concepção de um dispositivo, o primeiro passo é definir de que forma e com que elementos a peça e os TD serão posicionados, fixados e eventualmente movimentados para possibilitar o processo de medição.

Assim, determina-se quais as superfícies de posicionamento da peça e a configuração das superfícies de posicionamento do dispositivo, bem como o princípio de fixação, utilizando os conceitos do capítulo 2.

EXEMPLO

O posicionamento da carcaça da válvula pneumática é realizado mediante o furo da válvula através de encostos cilíndricos nas duas extremidades do furo (fig.3.7).

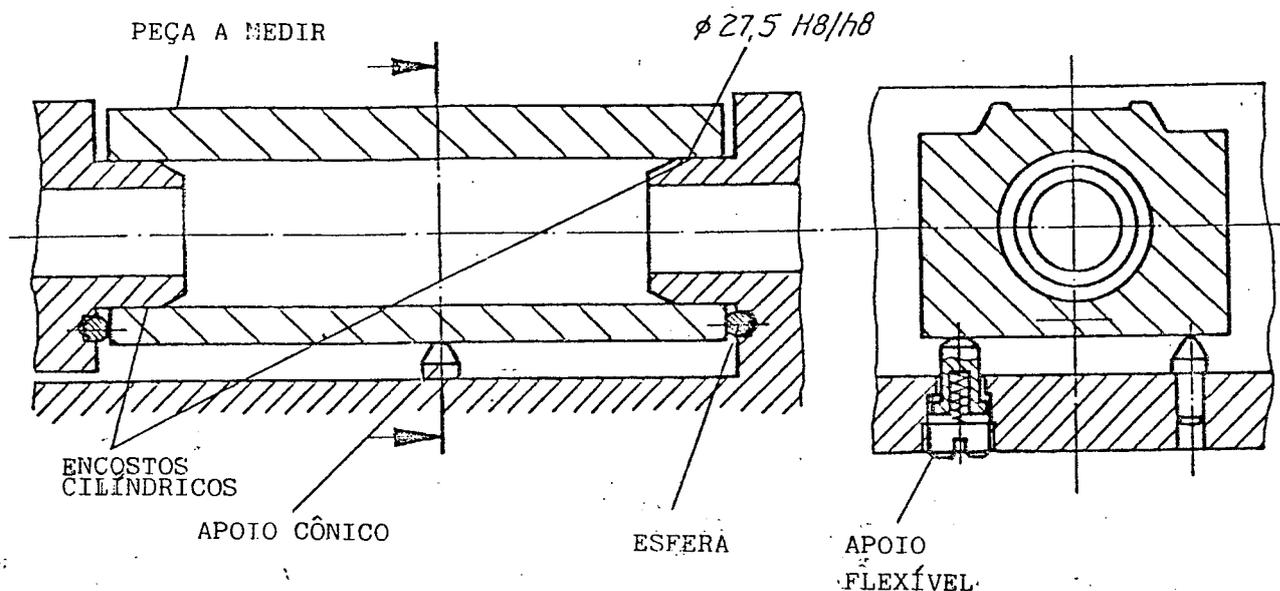


Fig. 3.7 - Peça de medição com as superfícies de posicionamento do dispositivo [54]

A carcaça é apoiada em seu plano de referência por uma esfera e na base através de um apoio flexível que garante o contato no apoio cônico.

O movimento de medição é realizado pelo apalpador que após contactar com a superfície lateral do anel de alumínio, se desloca por sobre o anel mediante a oscilação da haste suporte do apalpador. Este movimento conjugado deve ser realizado na medição dinâmica do intervalo dos seis anéis.

Com a definição dos movimentos necessários e as etapas do processo de medição, pode-se então iniciar o desenvolvimento do Dm com a formulação do princípio operacional.

EXEMPLO

O princípio operacional do dispositivo exemplificado está representado conforme a figura 3.8.

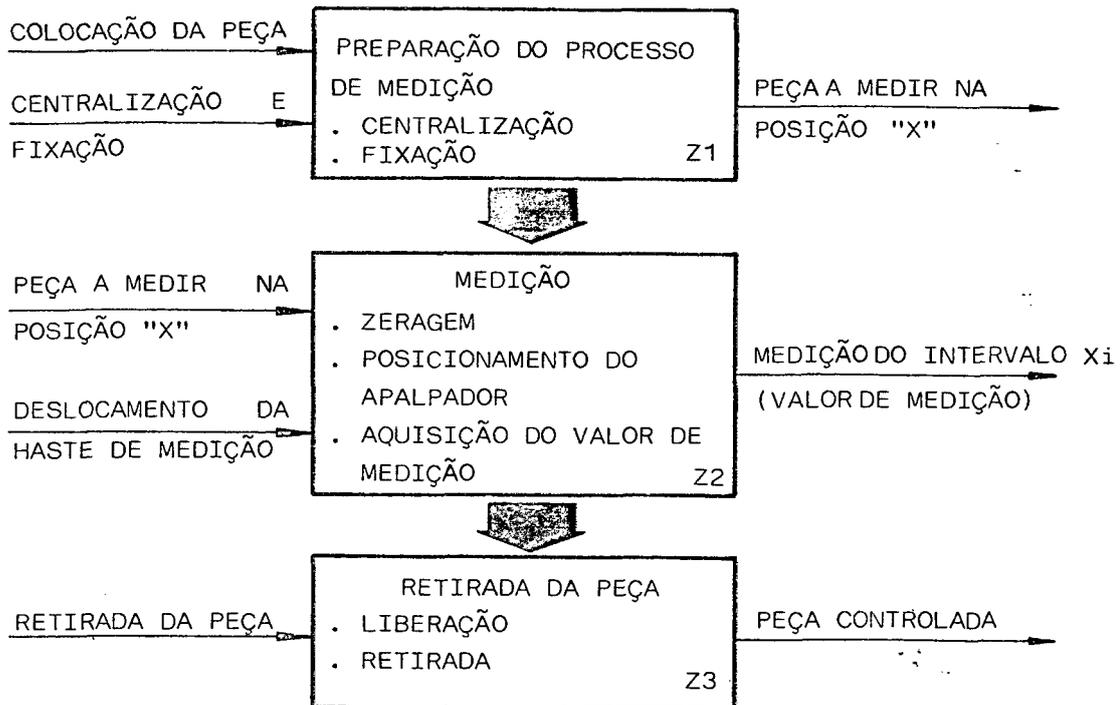


Fig. 3.8 - Princípio operacional do dispositivo para medição de intervalos em furos.

O próximo passo é esquematizar a estrutura funcional do dispositivo, discriminando as subfunções e seus interrelacionamentos, conforme exposto no capítulo 2 (fig.2.4).

EXEMPLO

A representação da estrutura funcional é feita na forma de diagrama de blocos, conforme se observa na figura 3.9.

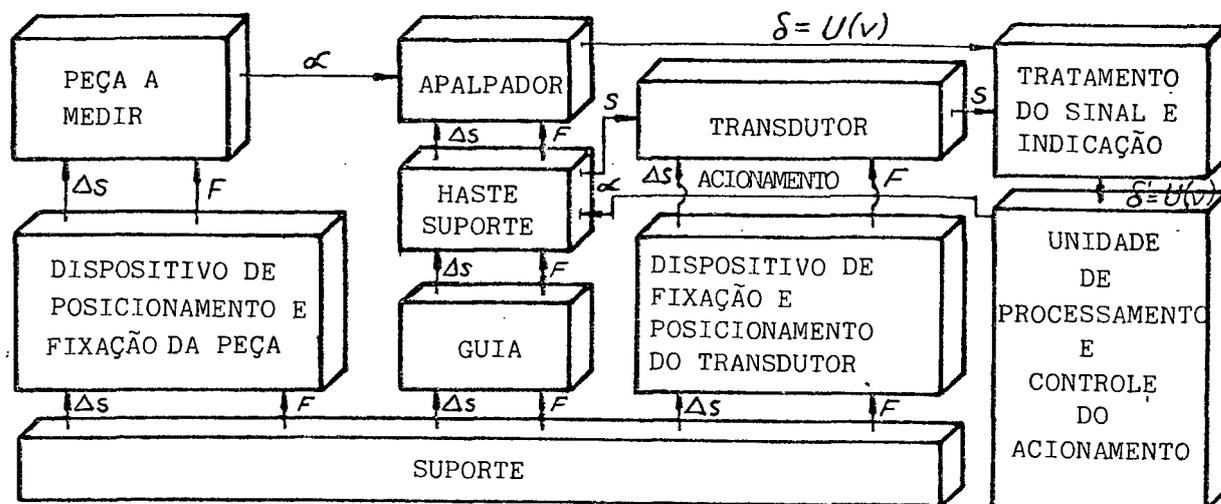


Fig. 3.9 - Estrutura funcional do dispositivo

Para cada subfunção, podem ser definidas, então, tarefas parciais correspondentes, satisfazendo as relações de dependência.

Na elaboração de alternativas de soluções para cada tarefa parcial, são adotados os métodos criativo-intuitivos e discursivos, sendo posteriormente avaliadas e selecionadas pelos métodos de valoração e decisão.

Após a seleção das melhores soluções, estas são esboçadas sob forma esquemática de princípios técnicos.

EXEMPLO

Para a procura de soluções das subfunções apresentadas na estrutura funcional foi adotado o método da combinação através de uma tabela, com os critérios e alternativas de soluções que podem ser empregadas.

Desta forma, é apresentado um exemplo de uma tabela de combinação (método morfológico) com algumas das subfunções mais importantes da estrutura funcional (fig.3.10).

SUBFUNÇÕES	CRITÉRIOS	ALTERNATIVAS
1. POSICIONAMENTO DA PEÇA NO DISPOSITIVO	1.1 Posição da peça a medir	1.1.1 horizontal 1.1.2 vertical 1.1.3 inclinada
	1.2 Tipo de posicionamento	1.2.1 por força 1.2.2 por forma
	1.3 Segurança de Posicionamento	1.3.1 pentiforme 1.3.2 plana 1.3.3 linear
2. FIXAÇÃO DA PEÇA A MEDIR	2.1 Princípio Físico	2.1.1 mecânico 2.1.2 pneumático 2.1.3 magnético 2.1.4 eletromecânico
	2.2 Tipo de fixação	2.2.1 em um plano 2.2.2 em dois planos 2.2.3 em três planos
3. GUIA DA HASTE DO APALPADOR	3.1 Tipo de atrito	3.1.1 escorregamento 3.1.2 rolamento 3.1.3 atrito interno (molas laminares) 3.1.4 newtoniano (fluidicas)
	3.2 Forma da secção	3.2.1 prismático 3.2.2 cilíndrico
4. MANCAL DO APALPADOR	4.1 Tipo de atrito	4.1.1 escorregamento 4.1.2 rolamento 4.1.3 atrito interno 4.1.4 atrito fluidico
	4.2 Forma do elemento de atrito	4.2.1 cilíndrico 4.2.2 cônico 4.2.3 esférico 4.2.4 gume 4.2.5 ponta

Fig. 3.10 - Exemplo da tabela de combinação de algumas das subfunções mais importantes do dispositivo.

O método da combinação fornece facilmente um grande número de soluções, sendo no entanto, bastante dispendioso e não apresenta nenhuma solução integral.

Assim, com a avaliação das alternativas compatíveis entre si, pode-se formular e esboçar concepções variantes do dispositivo. Uma análise de custos e fontes de erros das concepções alternativas definirá a melhor solução a ser desenvolvida.

3.2.5 Esboço do protótipo

Nesta fase, é esboçada a configuração geral do conjunto em escala normalizada. No esboço das peças, são avaliados os pontos críticos de montagem e de fabricação, para adoção das melhores soluções técnico-econômicas na construção do protótipo laboratorial.

EXEMPLO

No projeto do protótipo laboratorial, para experimentação dos princípios, foram utilizados alguns elementos disponíveis para montagem dos dispositivos, como colunas e suportes de transdutores. A concepção do projeto possibilitou os testes de três princípios, necessitando de poucas peças adicionais (fig. 3.11).

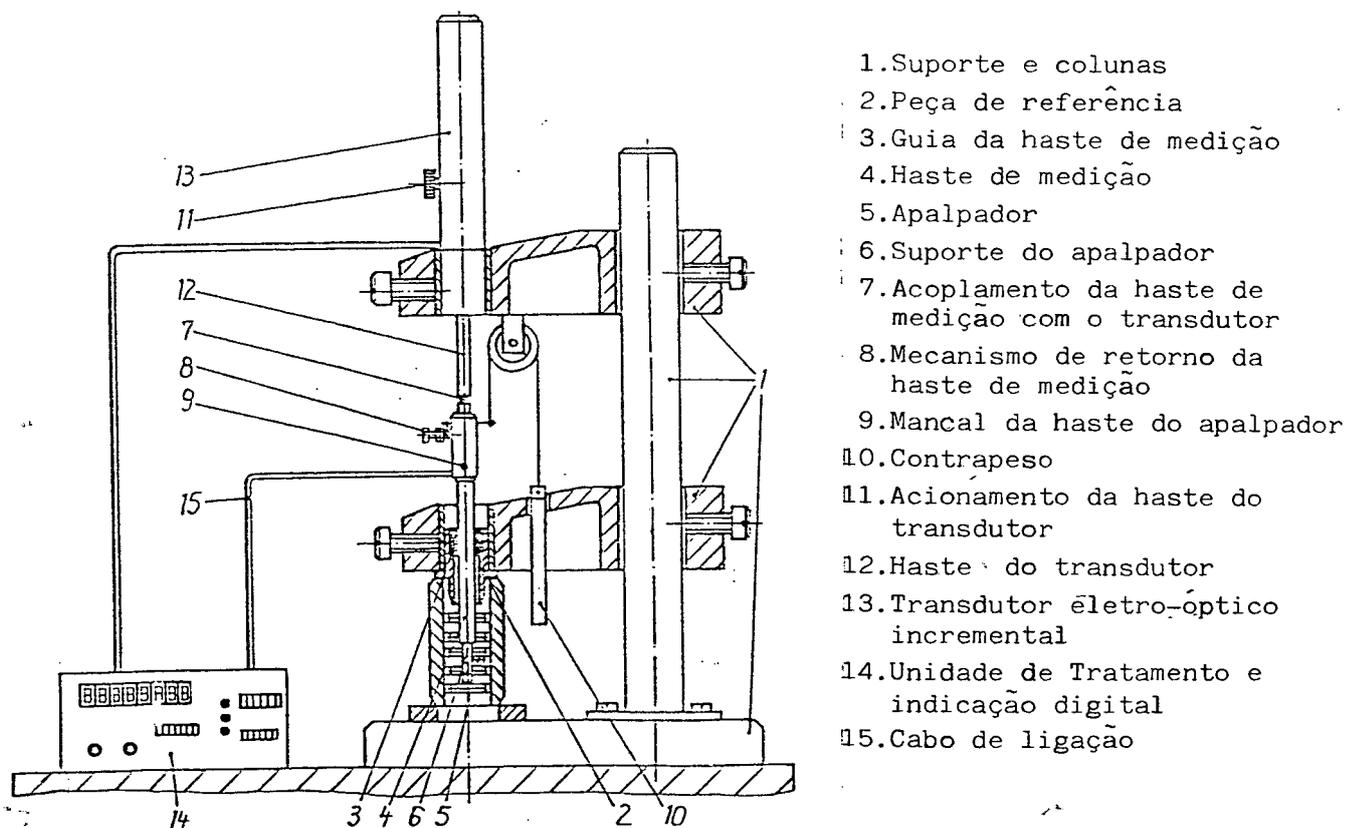


Fig. 3.11 - Esquema do protótipo laboratorial [54]

3.2.6 Análise Teórica dos Erros de Medição

A análise teórica do erros do dispositivo projetado, serve para verificar e estimar previamente quais as grandezas e problemas mais influentes nos resultados da medição.

Os erros de medição podem ocorrer devido à uma série de influências. As causas mais importantes são as da figura 3.12 [56,68,69 e 70].

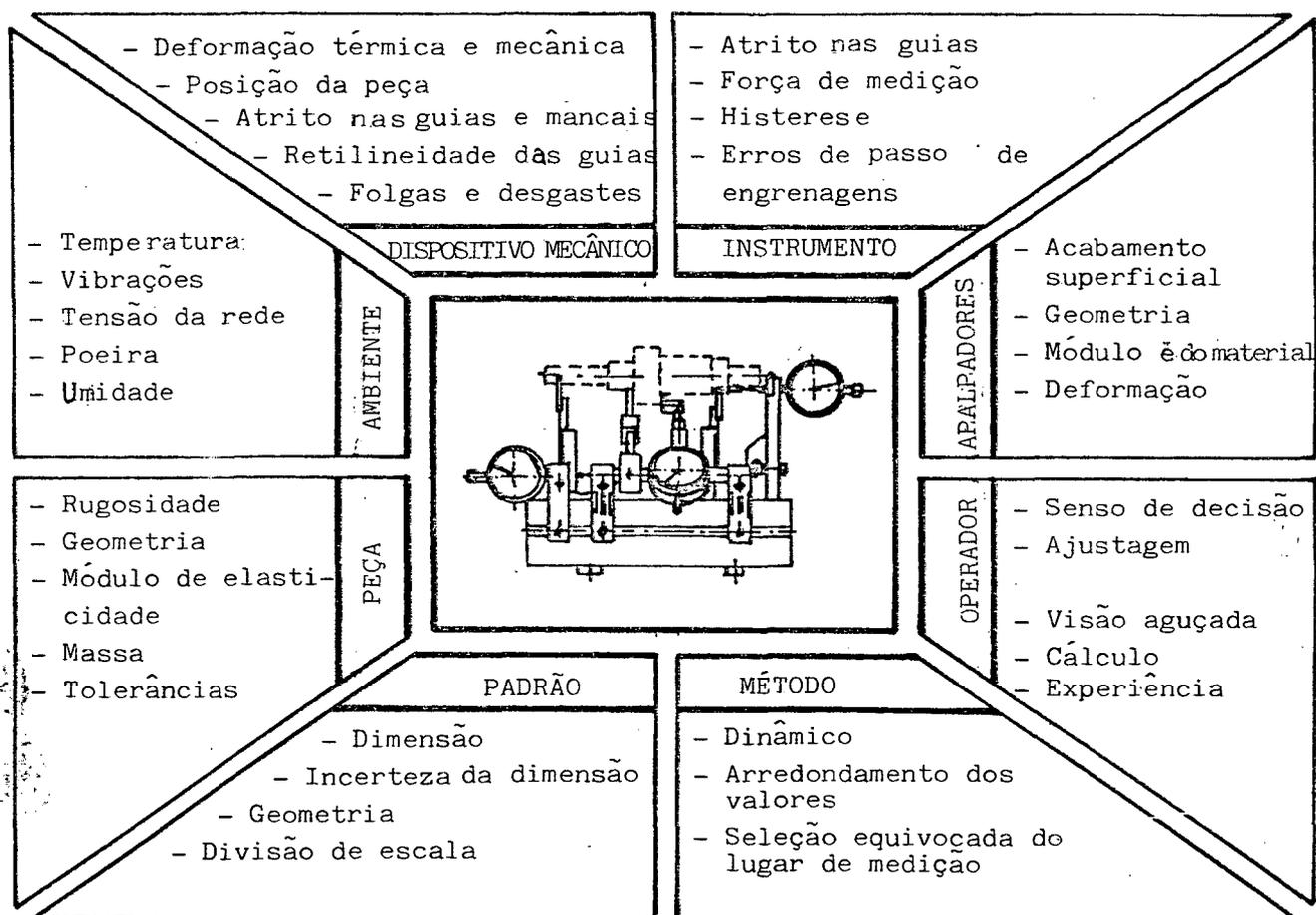


Fig. 3.12 - Fontes de erros de um dispositivo de medição.

Embora todas as influências de erro ocorrem na prática de forma simultânea, é comprovado pela análise dos erros de medição, que o erro global se subdivide em erros de medição sistemáticos (E_s), aleatórios (E_a) e grosseiros (E_g).

Os erros de medição sistemáticos, que ocorrem sob as mesmas condições de medição, com a mesma grandeza e sinal, são quantitativamente estimáveis, podendo-se corrigir em alguns casos as medidas obtidas. Os erros aleatórios estão sempre presentes em cada medição. Estes erros são caracterizados devido a oscilação dos valores de medição, nas mesmas condições de medição, sendo somente determinados através de uma grandeza de cálculo estatístico.

A influência nos resultados da medição, através de erros grosseiros, isto é, através de falhas, através da escolha de um método inadequado, ou através da inobservância de uma fonte de erros, são basicamente reconhecíveis, sendo desta forma evitáveis e por conseguinte desconsiderados.

A análise teórica dos erros é realizada para determinação da grandeza dos erros sistemáticos, segundo as características do dispositivo e das condições de medição. Com a análise teórica pode-se, previamente, determinar quais os pontos mais críticos do dispositivo, que podem vir a afetar os resultados de medição.

No entanto, uma análise realística das grandezas mais influentes só é possível com a experimentação do dispositivo de medição.

a) Análise dos Erros Sistemáticos de Medição

Todas as causas de erros citadas anteriormente podem conter erros sistemáticos de medição. Por esta razão, é necessária uma análise profunda destes erros, para compreensão e determinação das causas.

- Erro provocado pela peça à medir

As imperfeições na forma da superfície da peça à medir, sobretudo sua limpeza e rugosidade no local de contato com o apalpador podem provocar erros de medição.

Exemplificando, para a medição diferencial de peças rugosas com o medidor pneumático sem contato, em comparação com blocos padrões, a rugosidade das superfícies da peça a medir afetará os resultados de medição.

- Erro do padrão de medição

Os erros de padrões externos normalmente utilizados para medição de deslocamento, ou seja, os blocos padrões, podem influir diretamente no resultado da medição, sendo normalmente considerados desprezáveis em relação aos demais erros sistemáticos.

Os erros do padrão de medição são condicionados, por fundamentos econômicos e funcionais, às tolerâncias especificadas de fabricação e ao seu desgaste conforme o tempo e a frequência de utilização. [71]

- Erro do sistema de medição

Os erros do sistema de medição ocorrem principalmente devido a: a fabricação dos elementos fora das tolerâncias especificadas de projeto, os elementos de transmissão não lineares ou os erros de ajustagem em sua montagem.

Assim, as causas de erros podem ser por exemplo: o erro de passo do fuso de medição, erro de passo e forma dos flancos de engrenagens, atrito e folgas em mancais e guias, etc.

Outras causas de erros de medição, baseadas nestes problemas citados são:

- força de medição (deformações da peça à medir e erros de achatamento);
- perturbações externas;
- não linearidade do transdutor;
- histerese (atrito, folgas e deformações);
- comportamento dinâmico da medição.

- Erros devido às influências do ambiente

As grandezas de influência podem ser classificadas em:

- climáticas (temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa, etc.);
- mecânicas (vibrações, choques, etc);
- elétricas (tensão da rede, campos elétricos e magnéticos, etc.).

Destas influências a mais significativa no controle dimensional é a temperatura. Desvios de temperatura podem provocar modificações nas dimensões dos elementos mecânicos ou nos parâmetros dos elementos eletrônicos dos medidores e da unidade de tratamento dos sinais (UTS), alterando as características metrológicas e os resultados da medição. Deve-se considerar, principalmente para peças de grandes dimensões, as dilatações ou contrações que ocorrem em função dos desvios de temperatura em relação à temperatura de referência 20°C. Como exemplo, para uma peça de aço ($\alpha \approx 11,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$) de 100 mm de comprimento, verifica-se uma dilatação devido ao aquecimento de 1K, de aproximadamente 1 μm .

- Erros do operador

Em Dm podem ocorrer erros de colocação da peça à medir, de ajustagem da posição de referência dos transdutores e de manipulação do dispositivo durante o processo de medição.

A adoção de TD com indicadores digitais praticamente elimina os erros de leitura comumente encontrados com indicadores analógicos.

Para simplificação e redução dos erros do operador, a automatização para colocação e retirada da peça do dispositivo, bem como da medição com o auxílio de micromputadores, tem sido um meio eficaz na obtenção de resultados mais confiáveis e precisos.

- Erros do dispositivo de medição

Os erros do Dm possuem as mesmas causas apresentadas no sistema de medição, sendo normalmente originadas por erros de fabricação, montagem ou mesmo de projeto, destacando-se os seguintes (fig. 3.13):

- (a) deformações e inclinações dos suportes de transdutores em relação à superfície de medição ;
- (b) desvios no deslocamento rotativo dos mancais e reticidade das guias (folgas, atrito, desvios, etc) ;
- (c) erros de paralelismo, perpendicularismo ou planicidade das superfícies de posicionamento e fixação da peça à medir ;
- (d) deformações dos palpadores devido a força de medição ;
- ((e) desvios geométricos e deformações do suporte do dispositivo;
- (f) erros de forças atuantes de fixação e posicionamento;

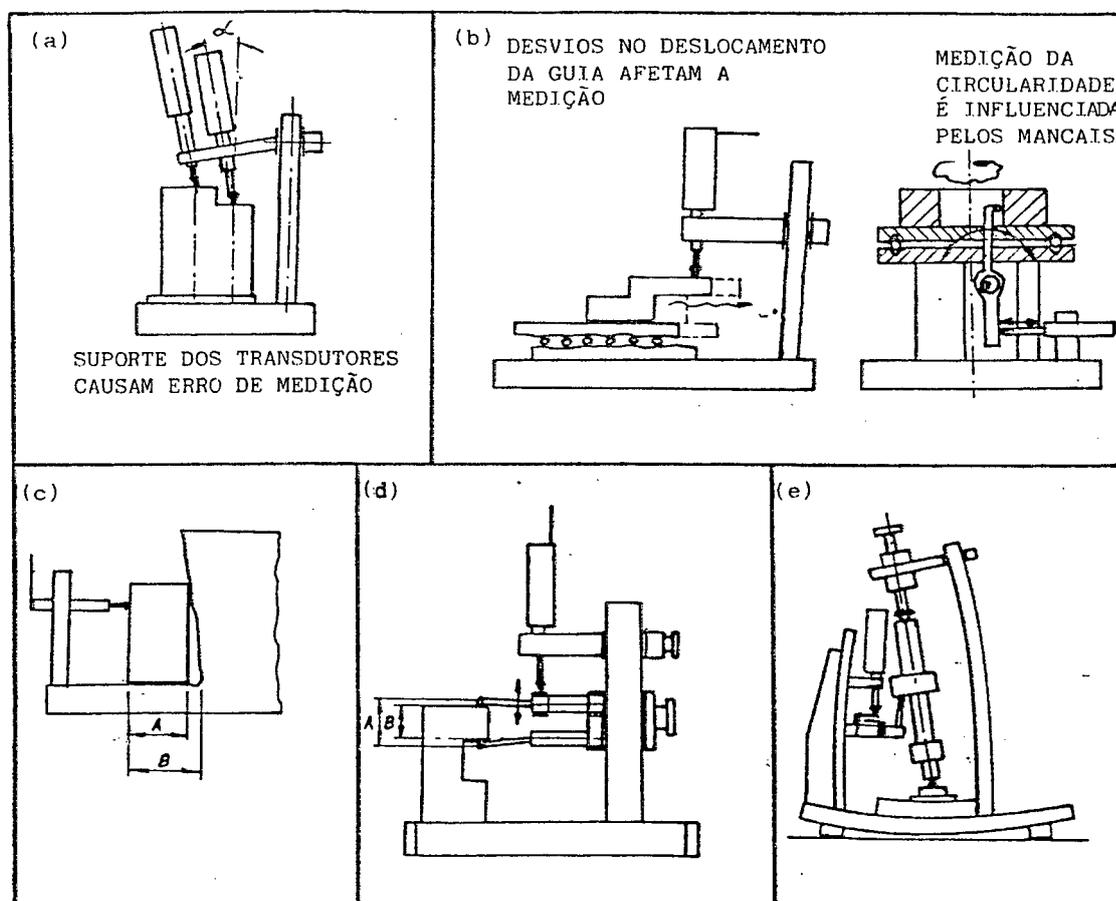
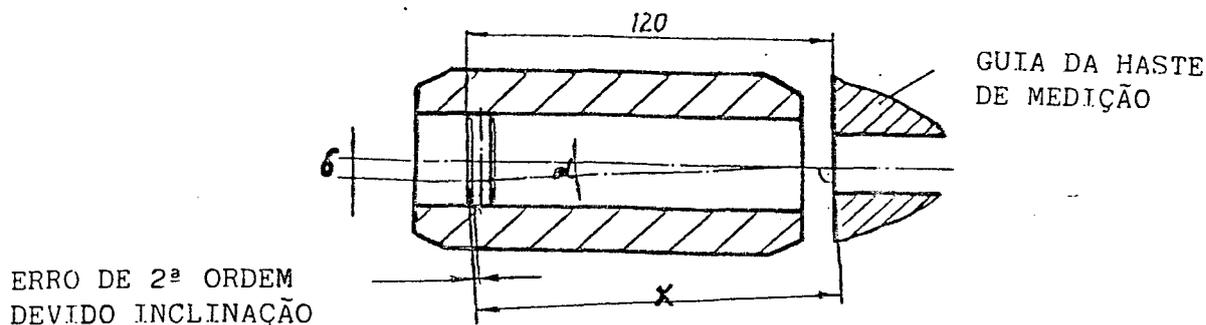


Fig. 3.13 - Erros do dispositivo de medição.

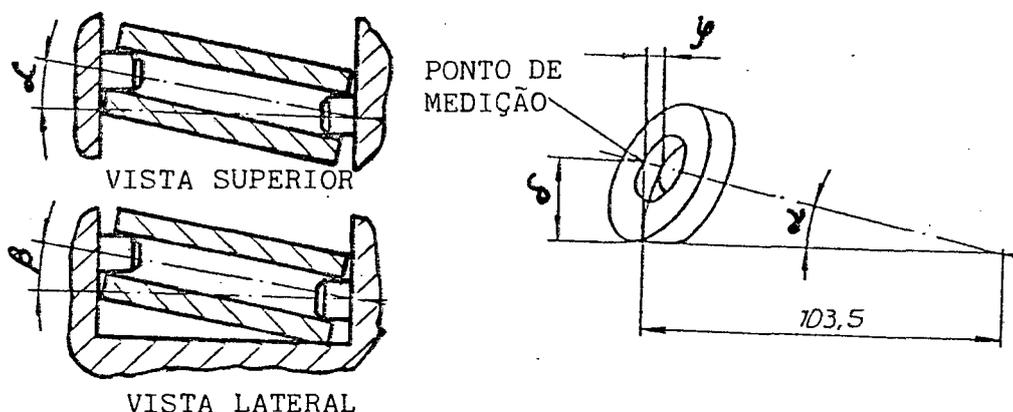
EXEMPLO

Para o protótipo do dispositivo de medição de afastamento em furos foram analisados os erros sistemáticos indicados na figura 3.14.



$$\delta = \pm 1 \text{ mm} \quad \tan \alpha = \frac{\delta}{120} \approx 0,477 \quad \cos \alpha = \frac{120}{x}$$

$$\begin{aligned} \text{ERRO DE MEDIÇÃO} \quad x &\approx 120,004 \text{ mm} \\ &= x - 120 = 0,004 \text{ mm} \end{aligned}$$



$$\delta \approx y \approx \pm 1 \text{ mm}$$

$$\text{TAN} = \frac{\delta}{103,5} \quad \alpha \approx \beta \approx 0,55$$

$$\begin{aligned} \text{ERRO DE MEDIÇÃO} \quad F_{\alpha} - \tan \alpha \cdot \delta &\approx 0,01 \text{ mm} \\ F_{\beta} - \tan \beta \cdot y &\approx 0,01 \text{ mm} \end{aligned}$$

Fig. 3.14 - Erros do protótipo para medição de afastamentos em furos [54] (a) erro de inclinação e deformação da haste do apalpador em relação ao eixo de medição (b) erro de posicionamento da peça a medir.

Das fontes de erros apresentadas, pode-se estimar ou calcular alguns valores de erros sistemáticos, baseando-se nas especificações de projeto do dispositivo, nas características

metrológicas dos medidores e padrões, nas condições do local de medição, e nas especificações da peça a medir.

Uma vez estimados os erros, os mesmos devem ser avaliados se são significativos em relação à incerteza de medição desejada para o dispositivo. Caso o erro for de aproximadamente um décimo da incerteza desejada, o mesmo pode ser desconsiderado para o cálculo do erro sistemático global.

Assim, com a determinação dos erros sistemáticos significativos, pode-se calcular o erro sistemático global Δx que pode ser utilizado para correção dos resultados da medição.

Pela estatística, é comprovado que nem todos os erros ocorrem simultaneamente com o maior valor possível no resultado da medição. Desta forma, para determinação da inexatidão Δx , é melhor calcular o erro pela equação dos desvios médios quadráticos, ao invés da simples soma algébrica de cada erro individual. [66]

Assim, a resultante Δx , da contribuição dos diferentes erros sistemáticos é:

$$\Delta x = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\delta_n)^2}$$

Portanto, os valores dos erros sistemáticos são na maioria dos casos estimados, devendo-se determinar e comprovar na prática mediante ensaios do Dm.

EXEMPLO

Com a análise dos vários fatores de influência do protótipo laboratorial, pôde-se então elaborar uma tabela com os erros sistemáticos de maior importância e sua correspondente avaliação. (fig. 3.15).

ERROS SISTEMÁTICOS DE MEDIÇÃO				
Nº	DESCRIÇÃO	OBSERVAÇÕES	VALOR DO ERRO	AValiação
1	Erro de indicação da haste de medição	inclinação de 30' da haste de medição L=100 mm	S ₁ =+/-4 µm	pequeno mas não desprezível
2	Erro devido a deformação da haste do palpador	F=1N E=2×10 ⁵ N/mm ² L=6mm b=h=3mm	S ₂ =+/-0.05 µm	desprezível
3	Erro de achatamento	F=1N Ø esfera = 3 mm	S ₃ =+/-0.5 µm	desprezível
4	Erro de posicionamento da peça	inclinação de 30' L= 100 mm	S ₄ =+/-14 µm	não desprezível
5	Erro devido inclinação do transdutor	inclinação de 30' L= 100 mm	S ₅ =+/-4 µm	pequeno mas não desprezível
6	Erro devido variação da temperatura	Δt= +/-3°C L= 110 mm α= 23,8 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹	S ₆ =+/-8 µm	não desprezível

Fig. 3.15 - Tabela dos erros sistemáticos

Assim, pode-se calcular Δx , mediante os erros sistemáticos significativos, resultando: $\Delta x = \sqrt{(S_1)^2 + (S_4)^2 + (S_5)^2 + (S_6)^2} \approx 17 \mu\text{m}$

b) Análise dos Erros Aleatórios

As causas mais comuns de erros aleatórios em Dm são:

- oscilações no movimento das guias e mancais durante a medição;
- oscilações não perceptíveis da posição da peça a medir ou nas peças de suporte do dispositivo;
- variações no acabamento superficial do local de medição;
- oscilações da velocidade de medição (vibrações em medições dinâmicas);
- variações no ajuste dos transdutores.

O valor dos erros aleatórios, ou seja, da dispersão de medição, só pode ser determinado quando a medição é repetida várias vezes sob as mesmas condições.

A determinação da grandeza dos erros aleatórios é realizada através de fórmulas de cálculo da teoria da probabilidade [69 e 70].

3.2.7 Projeto, Fabricação e Montagem do Protótipo do Dm

Nesta fase são realizados os cálculos e o dimensionamento dos elementos componentes até a especificação técnica total das peças em desenhos técnicos normalizados.

Através dos desenhos técnicos e listagem das peças, encaminha-se à fabricação um protótipo laboratorial.

Como resultado, obtêm-se as peças que, após o devido tratamento térmico e superficial, pode-se então montar e ajustar o protótipo para testes experimentais.

EXEMPLO

O protótipo laboratorial desenvolvido para testes experimentais de calibração do apalpador eletromecânico de interrupção pode ser observado na figura 3.16.

Na pesquisa de um método mais universal para medição de intervalos em furos, o protótipo laboratorial foi configurado para que também outros métodos de medição (pneumáticos ou indutivos) pudessem ser testados, sem modificação essencial da montagem. No entanto, ambos os métodos com transdutor eletro-indutivo ou sensor pneumático, não são adequados para medição dos afastamentos entre os anéis das válvulas pneumáticas, sendo somente relevante para a pesquisa de métodos alternativos para medição de intervalos em furos.

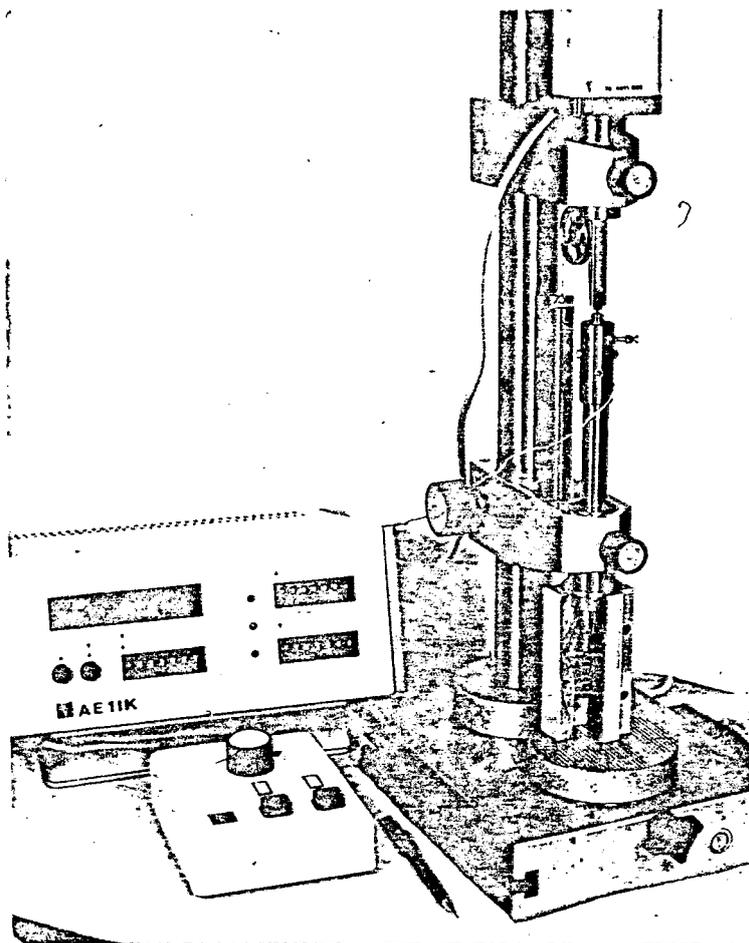


Fig. 3.16 - Montagem laboratorial do protótipo com apalpador eletromecânico [54]

3.2.8 - Qualificação e experimentação do protótipo

No âmbito da qualificação, o requisito principal de um Dm é medir com um erro máximo admissível para o controle confiável dos parâmetros desejados. No desenvolvimento de Dm, a qualificação assume importância fundamental para aprovação e implantação industrial.

A qualificação de Dm é realizada com o fim de avaliar e determinar:

- desvios dimensionais e de forma das tolerâncias exigidas pelo projeto e montagem;
- funcionalidade do sistema de posicionamento e fixação das peças, guias, mancais, posicionamento e fixação de transdutores;
- deficiências na operação do dispositivo;

- erros de projeto e fabricação;
- grandeza dos erros sistemáticos do dispositivo e repetibilidade das medições, bem como as principais causas, para possibilitar as devidas correções e/ou otimizações.

A qualificação é efetuada em duas etapas distintas. A primeira é a análise das fontes de erros inerentes à fabricação e montagem do dispositivo, ou mesmo erros de projeto que poderão influenciar o resultado da medição. Esta etapa visa determinar e estimar o valor dos erros de medição, com intuito de corrigir as deficiências de projeto ou fabricação.

A segunda etapa é a experimentação, através de ensaios, para comprovação e determinação na prática, das principais fontes de erros que afetam os resultados e problemas operacionais que eventualmente o dispositivo possa apresentar.

A experimentação é o passo mais importante para qualificação de um Dm, sendo realizada normalmente através de uma calibração. A calibração é a correlação efetiva entre a medida (leitura) de um sistema e o valor (convencionalmente correto) da grandeza à medir [55].

Através de um ensaio de calibração pode-se:

- analisar o comportamento metrológico e operacional, e obter dados para correção de eventuais problemas funcionais no dispositivo;
- obter dados para avaliação e realização da ajustagem e aferição;
- estabelecer a função transferência e curva de erros ao longo da faixa de operação para posterior compensação;
- determinar a incerteza de medição do dispositivo, e verificar se o mesmo está dentro da faixa aceitável definida no projeto.

A Im expressa o maior erro que o dispositivo poderá impor à medida, ao longo de sua faixa de operação.

Numericamente é dada por:

$$I_m = \pm (\frac{Es}{\sqrt{2}} + \frac{DM(95\%)}{\sqrt{2}}) \text{ máx. na faixa de operação,}$$

onde:

Es = Erro sistemático

DM (95%) = Dispersão de medição a 95% de probabilidade estatística (normalmente adotado).

O critério adotado para qualificação é o dispositivo apresentar uma I_m que seja de 10 a 20% do campo de tolerância de fabricação IT dos parâmetros a serem controlados.

Para determinação experimental dos erros de medição sistemáticos e aleatórios, ou seja, da incerteza de medição através de uma calibração, é adotado o seguinte procedimento geral [71]:

- a) Planejamento do ensaio;
- b) Preparação do experimento;
- c) Execução dos Ensaio;
- d) Processamento dos Dados;
- e) Documentação dos resultados.

A fase experimental deve ser devidamente planejada e preparada para se obter o maior número de informações a respeito do desempenho metrológico e operacional do sistema.

Para isto devem ser preparadas planilhas para anotação das leituras e dados da medição, garantindo uma racionalização dos procedimentos de execução dos ensaios.

Um passo importante após a execução dos ensaios, é avaliar se o dispositivo está apto ao controle dos parâmetros.

Na figura 3.17, está esquematizado um algoritmo para determinação do resultado final dos ensaios através de uma calibração.

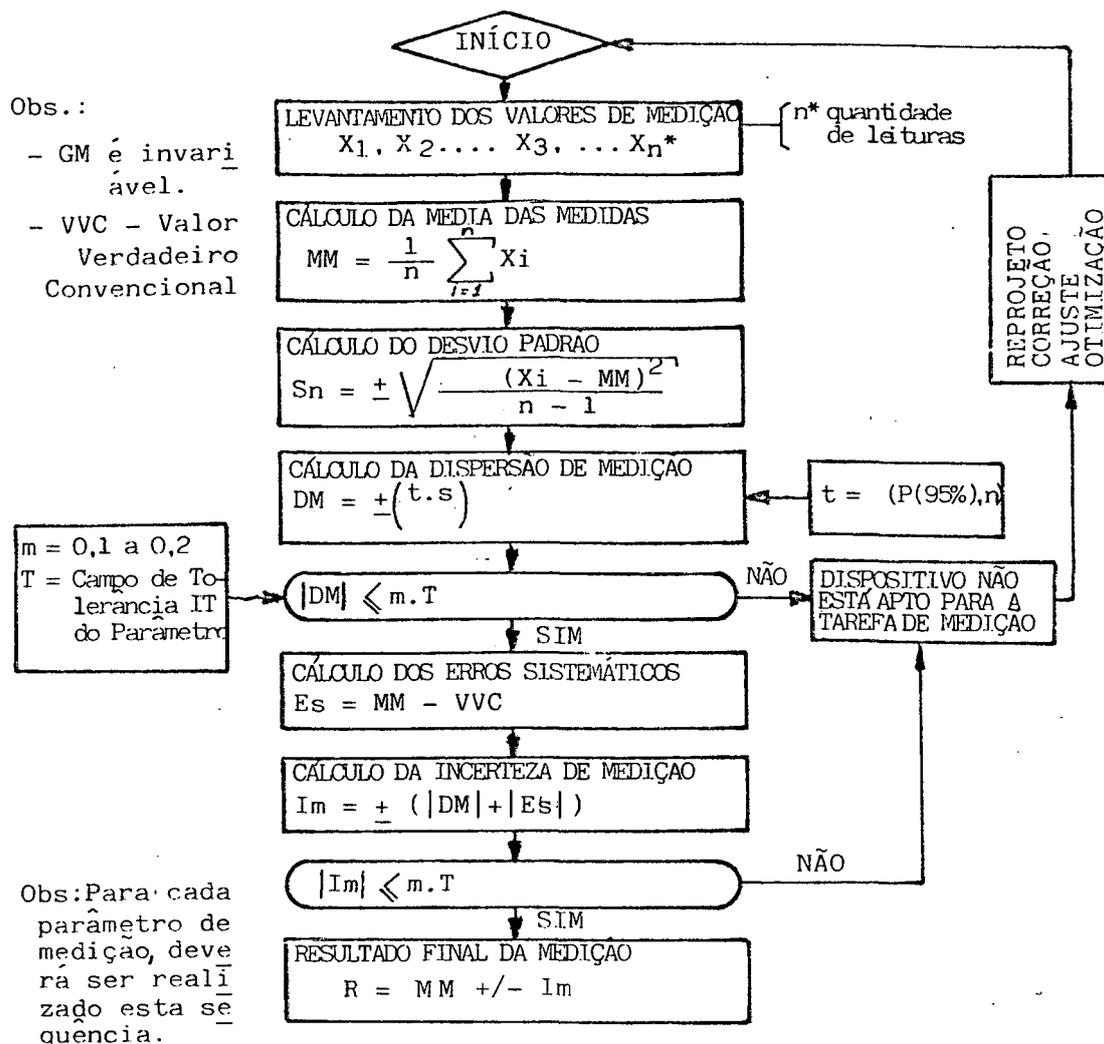


Fig. 3.17 - Algoritmo para determinação da aptidão do dispositivo de medição no controle de um parâmetro.

Pelo resultado da análise experimental, pode-se concluir se o dispositivo de medição preenche os requisitos metrológicos necessários ao controle dos parâmetros desejados das peças.

Pode-se obter, em função da faixa de medição, uma curva de erros, que poderá servir inclusive para identificar quais as causas de erro mais influentes no dispositivo.

EXEMPLO

Com os ensaios do protótipo laboratorial, obteve-se os seguintes valores de medição na calibração do apalpador eletromecânico (fig. 3.18).

BLOCO PADRÃO (MEDIDA REAL) (mm)	MEDIA DAS MEDIDAS X (mm)	DESVIO PADRÃO S (mm)	DISPERSÃO DA MEDIÇÃO DM(95) (mm)	ERRO SISTE- MÁTICO Es (mm)
10.000	10.001	+/- 0.006	+/- 0.004	0.001
20.000	20.001	+/- 0.002	+/- 0.002	0.001
30.000	30.002	+/- 0.005	+/- 0.004	0.002
40.000	40.002	+/- 0.005	+/- 0.004	0.002
50.000	50.003	+/- 0.007	+/- 0.005	0.003
60.000	60.001	+/- 0.006	+/- 0.004	0.001
70.000	70.006	+/- 0.007	+/- 0.005	0.006
80.000	80.006	+/- 0.010	+/- 0.007	0.002
90.000	90.002	+/- 0.008	+/- 0.006	0.002
100.000	100.005	+/- 0.010	+/- 0.007	0.005

Fig. 3.18 - Valores de medição na calibração do apalpador eletromecânico [54].

Estes resultados podem ser representados numa curva de erros de onde se observa a grandeza dos erros sistemáticos e aleatórios ao longo da faixa de operação (fig. 3.19).

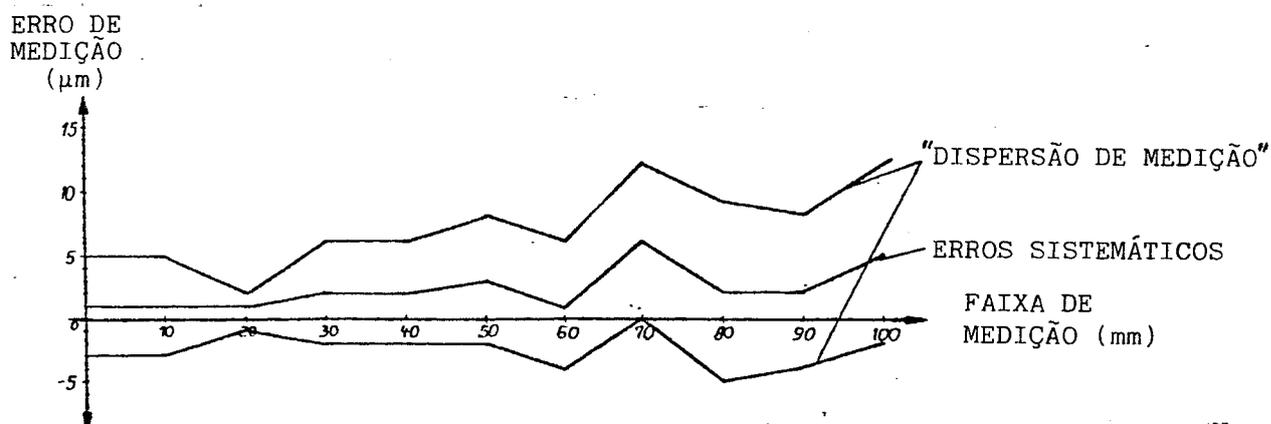


Fig. 3.19 - Curva de erros do apalpador eletromecânico [54].

Pelos resultados, observa-se que o maior valor de erro sistemático é de $+6 \mu\text{m}$ e a maior "dispersão de medição" é de $\pm 7 \mu\text{m}$.

Os testes realizados com o sensor pneumático mostraram uma dispersão de $\pm 20 \mu\text{m}$, e do apalpador com transdutor eletro-indutivo uma dispersão de $\pm 50 \mu\text{m}$.

3.2.9 Avaliação dos Resultados

Com os resultados obtidos na experimentação, pode-se avaliar se as características metrológicas e operacionais atendem aos requisitos desejados. Caso houver fontes de erros de medição, que estejam impossibilitando a aplicação confiável do dispositivo, devem ser operadas correções e otimizações, que permitam atingir os resultados desejados.

EXEMPLO

As principais fontes de erros de medição do apalpador eletromecânico foram: a qualidade de fabricação da guia da haste de medição e o atrito nos mancais do apalpador de contato. A comparação dos resultados obtidos pelos três princípios, mostrou que o apalpador eletromecânico é o mais adequado, atendendo aos requisitos da tarefa de medição.

O sensor pneumático apesar de mostrar bons resultados, não é adequado pois possui restrições devido a:

- grande constante de tempo para medições dinâmicas;
- maior dispêndio para conversão do sinal de medição de pressão em um sinal elétrico.

Os maiores erros apresentados pelo princípio com transdutor indutivo, foram devido ao diâmetro da esfera de contato (03 mm) e as folgas no mancal e guia da haste de medição e da alavanca apalpadora [54].

3.2.10 Documentação

A última fase do projeto envolve a elaboração e revisão dos desenhos técnicos e das especificações das peças componentes, o relatório técnico de montagem com esquemas e figuras e a elaboração do manual de operação e manutenção do dispositivo.

EXEMPLO

Na figura 3.20, pode-se observar o desenho técnico global e as principais vistas correspondentes do dispositivo desenvolvido definitivamente.

O detalhamento do processo de desenvolvimento de dispositivos de medição, com suas fases, atividades, meios auxiliares e resultados, está apresentado na figura 3.21.

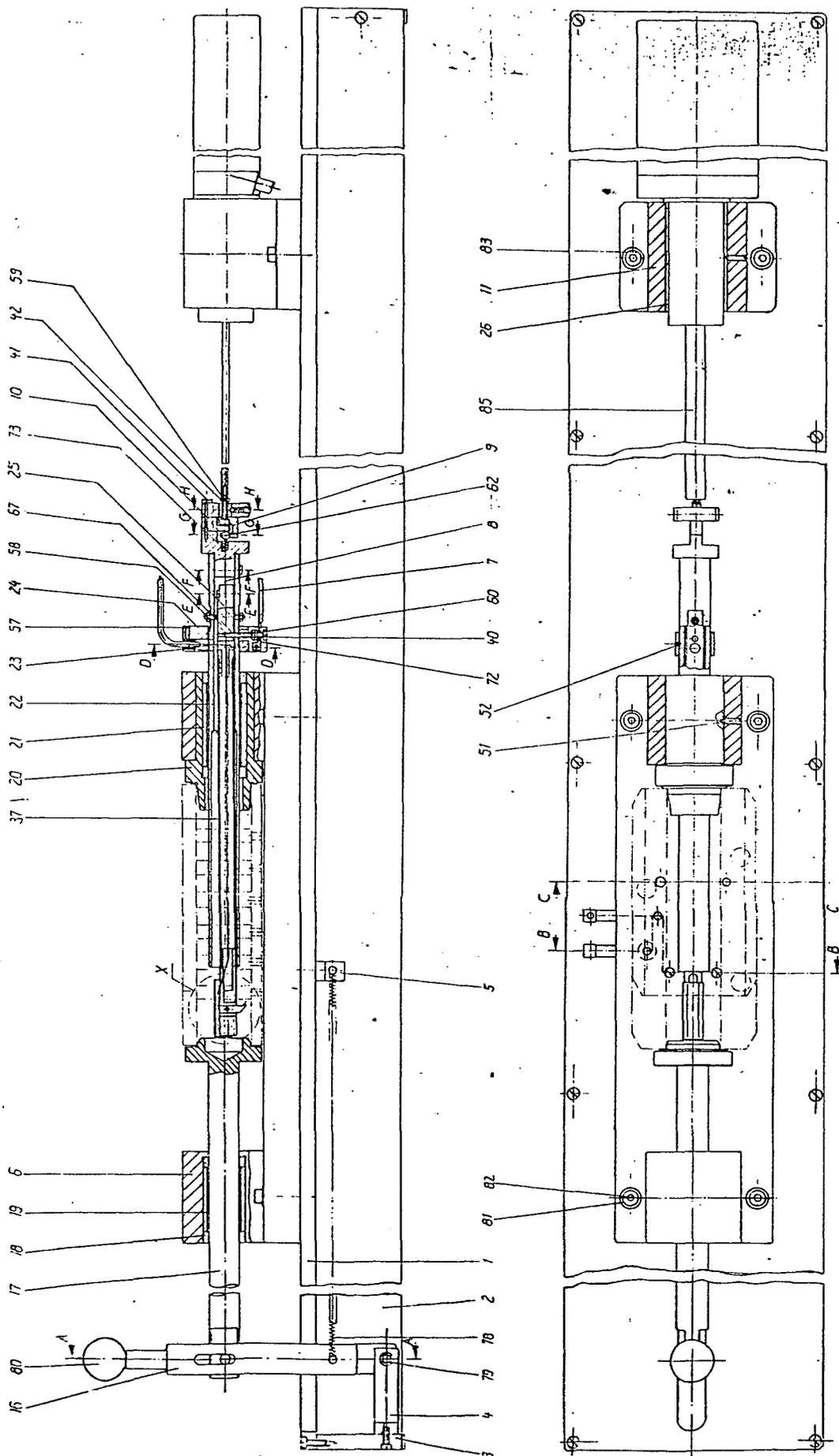
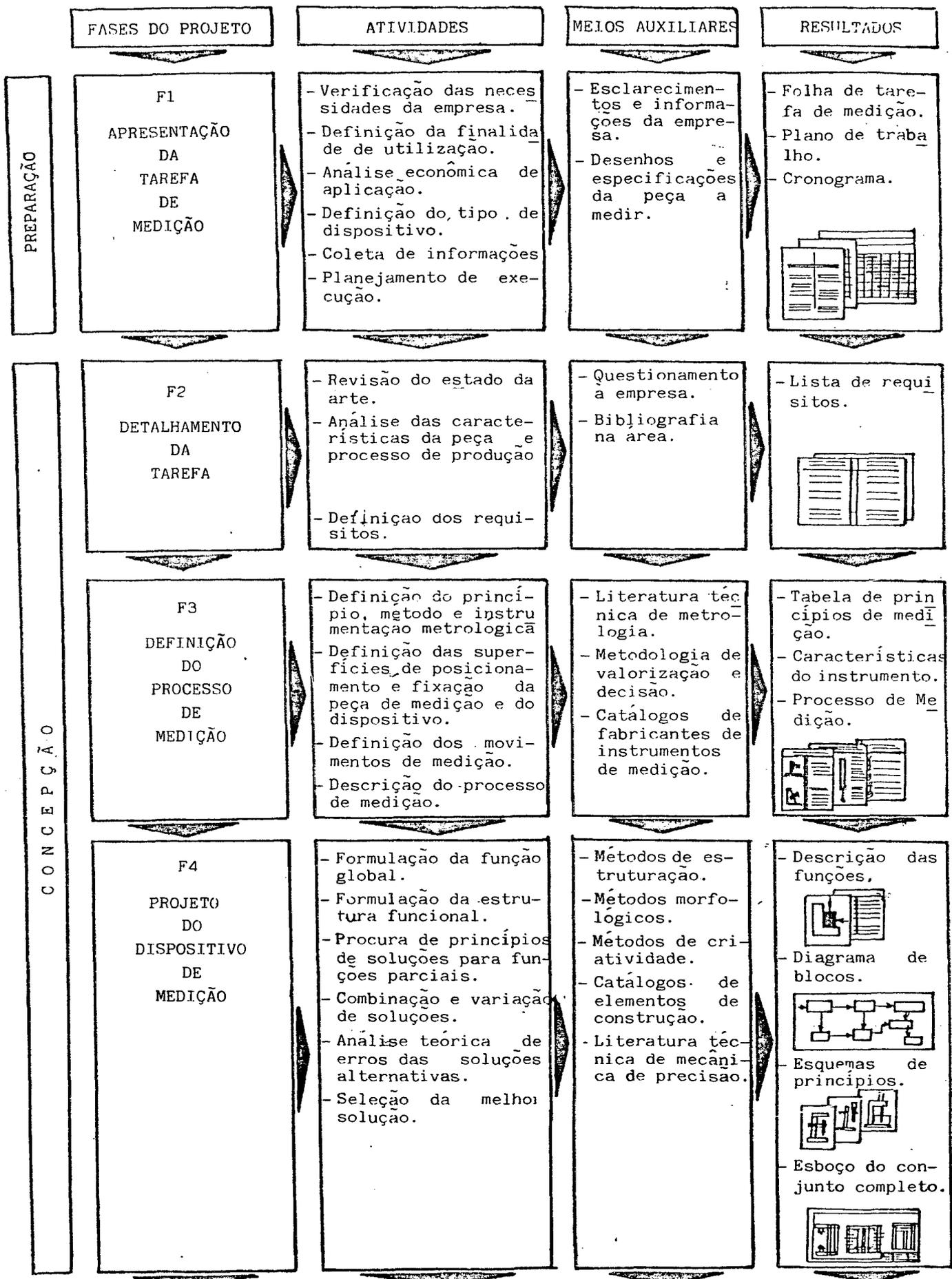


Fig. 3.20 - Desenho técnico do dispositivo para medição do intervalo dos anéis em válvulas pneumáticas [54].



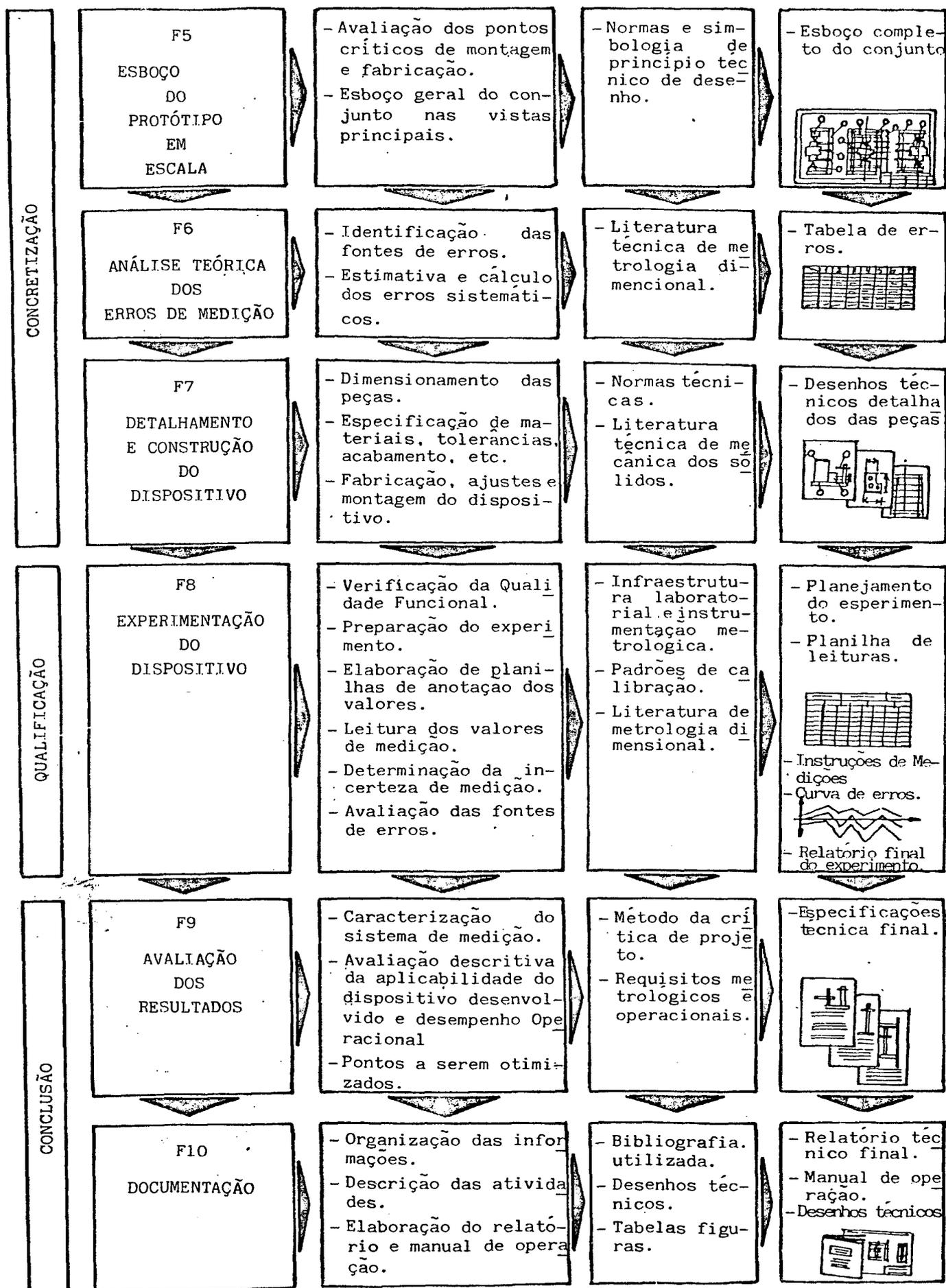


Fig. 3.21 - Sequência de desenvolvimento de dispositivos de medição

4 DESENVOLVIMENTO DE CONJUNTO MODULAR DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

A necessidade da indústria em diversificar e modernizar a sua linha de produtos com alto grau de qualidade, num curto espaço de tempo para conseqüente lançamento no mercado, tem requerido uma significativa elevação da flexibilidade e redução dos tempos de fabricação, direcionando-se ao emprego de sistemas de produção automatizados e flexíveis (FMS).

Neste contexto se enquadra o controle de qualidade, cujos custos por razões econômicas devem ser reduzidos.

A preparação dos Dm, atividade que se eleva, em razão do alto custo de investimento, do tempo demasiado de projeto, do número de peças complexas de diferentes dimensões e sobretudo quando maiores exigências de precisão geométrica são impostas à fabricação, se torna muitas vezes árdua e demorada, sendo somente viável para um grande lote de peças na produção.

Um meio eficaz que possibilita maior rapidez, desde a fase de concepção até a implantação industrial, é o emprego de um CMD de medição para CG.

A utilização de um CMD de elementos de construção padronizados, tem grande importância no contexto atual, pois permite realizar economias apreciáveis no projeto e montagem destes dispositivos, reduzindo o tempo global de desenvolvimento e suprimindo em muitos casos, peças especiais cuja fabricação é difícil e onerosa.

A disponibilidade de um CMD, soluciona em grande parte a questão de investimentos e eleva a flexibilidade e capacidade de resposta do sistema produtivo.

Mediante este conjunto o dispositivo pode ser montado e experimentado em diferentes configurações, através de uma limitada quantidade de elementos, possibilitando adaptações segundo as necessidades do controle de qualidade.

4.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA APLICAÇÃO

Através de um CMD, pode-se configurar a construção do dispositivo para realização de uma medição. Em comparação, com os Dm especialmente projetados, este apresenta as seguintes vantagens:

- reduzidos tempos e custos de desenvolvimento e implantação;
- considerando as dimensões e a diversidade de geometria das peças (complexidade), são montados segundo a referência [72], dispositivos totalmente modulares em 80% dos casos;
- possibilidade de montagens experimentais para testes do princípio de medição ;
- adequado para o controle geométrico de pequenos a médios lotes de peças;
- a graduação das dimensões dos elementos de construção, possibilitam, solucionar uma variedade de tarefas de medição semelhantes;
- reaproveitamento dos módulos para outras configurações futuras;
- une a flexibilidade das CMM, com as vantagens dos dispositivos para controle multidimensional, projetados especialmente para as peças;
- redução no armazenamento de dispositivos especiais;
- simplicidade na determinação do custo de cada dispositivo construído;
- adequado ao projeto e fabricação com estação CAD/CAM, e portanto à filosofia do CIM.

Existem no entanto, algumas limitações na adoção de conjuntos modulares em relação aos dispositivos especiais, onde as principais são:

o CMD é limitado aos elementos graduados disponíveis, impossibilitando uma construção otimizada em relação a rigidez e a massa. Assim em razão da necessidade casual de superdimensionamento para se obter boa rigidez, a massa e o

- obter boa rigidez, a massa e o volume do dispositivo é freqüentemente maior se comparado com o projetado para uma solução específica;
- um conjunto modular não atende a todos os casos possíveis, necessitando de elementos adaptativos ou suplementares dependendo da complexidade da tarefa de medição;
 - uma adaptação aos desejos especiais do usuário não é totalmente possível, como acontece nos projetos específicos;
 - existem maiores despesas quanto à qualidade geométrica e acabamento das superfícies de contato dos vários elementos, encarecendo a aplicação.

4.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE CONJUNTOS MODULARES DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

A concepção do CMD de medição, deve estar fundamentada em alguns fatores principais, como apresenta a figura 4.1.

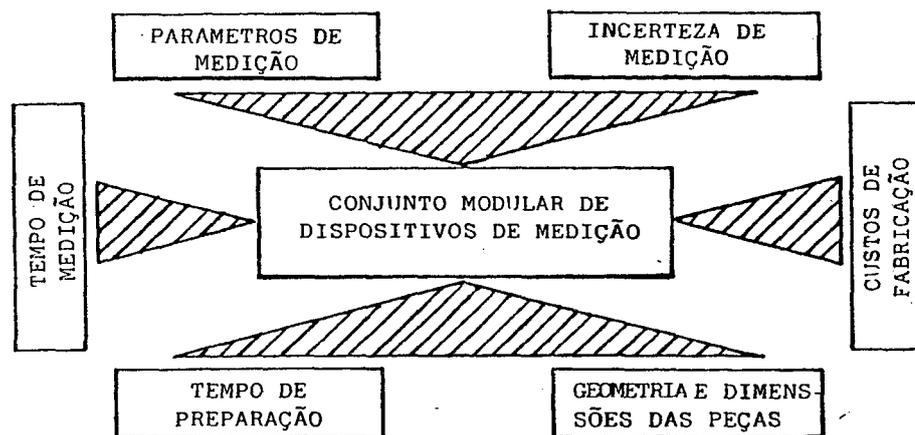


Fig. 4.1 - Fatores para concepção de projeto do conjunto modular de dispositivos de medição.

Baseado nestes fatores, o conjunto modular deve atender a algumas características fundamentais que se distinguem dos Dm especiais, ou seja: modularidade, flexibilidade, versatilidade, intercambiabilidade, qualidade e racionalização de elementos.

4.2.1 Modularidade

A primeira característica que um conjunto modular deve apresentar, é a modularidade e graduação dos elementos, que vai permitir diversas combinações racionais, para montagem de dispositivos abrangendo um grande espectro de dimensões e possibilitando adaptações a diferentes graus de complexidade da geometria das peças a medir.

A modularidade é realizada pela separação dos componentes de um grupo funcional, de forma a possibilitar um grande número de combinações e montagens alternativas dos elementos entre si.

O limite prático para separação de um componente, é determinado na maioria dos casos, devido às influências desfavoráveis da somatória de tolerâncias, na precisão, das várias superfícies de união, na rigidez, e nos maiores dispêndios de montagem e adição de massa, nos custos.

Para garantir um dimensionamento e quantidade racional dos elementos modulares é conveniente uma graduação das dimensões, com base nos números normalizados (Norma ABNT NB-72 e NB-73/DIN 323) [63 e 64]. Estes números normalizados, são uma seleção de números arranjados logaritmicamente, compondo uma série geométrica. A série de números normalizados origina-se do sistema de numeração decimal, onde as faixas intermediárias das potências de dez são subdivididas geometricamente de forma que a relação entre dois números consecutivos seja constante.

Assim, em comparação com as séries aritméticas, aquelas possuem uma relação mais uniforme e racional entre as dimensões [64].

Geralmente, a vantagem de uma graduação dimensional grosseira, está na maior frequência de utilização das peças para diferentes tamanhos da peça a medir e com isto a configuração econômica de uma série ou fabricação seriada.

Em um CMD de medição, a graduação dimensional é basicamente adotada nos elementos de suporte, de posicionamento e de fixação, proporcionando uma melhor adequação às diferentes dimensões das peças a serem medidas (fig. 4.2).

Assim exemplificando, para o suporte de uma peça cilíndrica, pode-se dispor de somente um prisma específico para a aplicação. Com a modularização do prisma, pode-se ajustar para diferentes tipos de diâmetros (fig. 4.3).

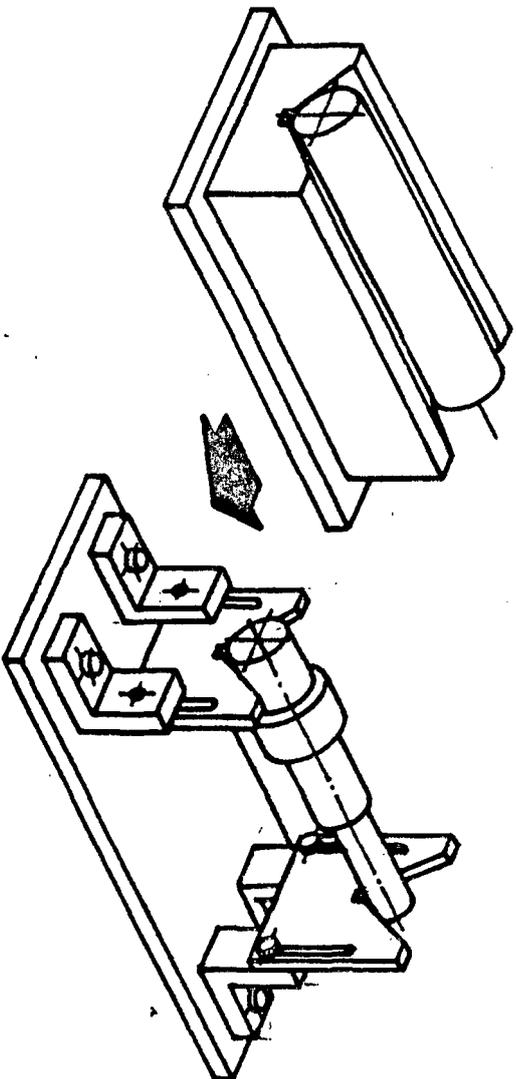
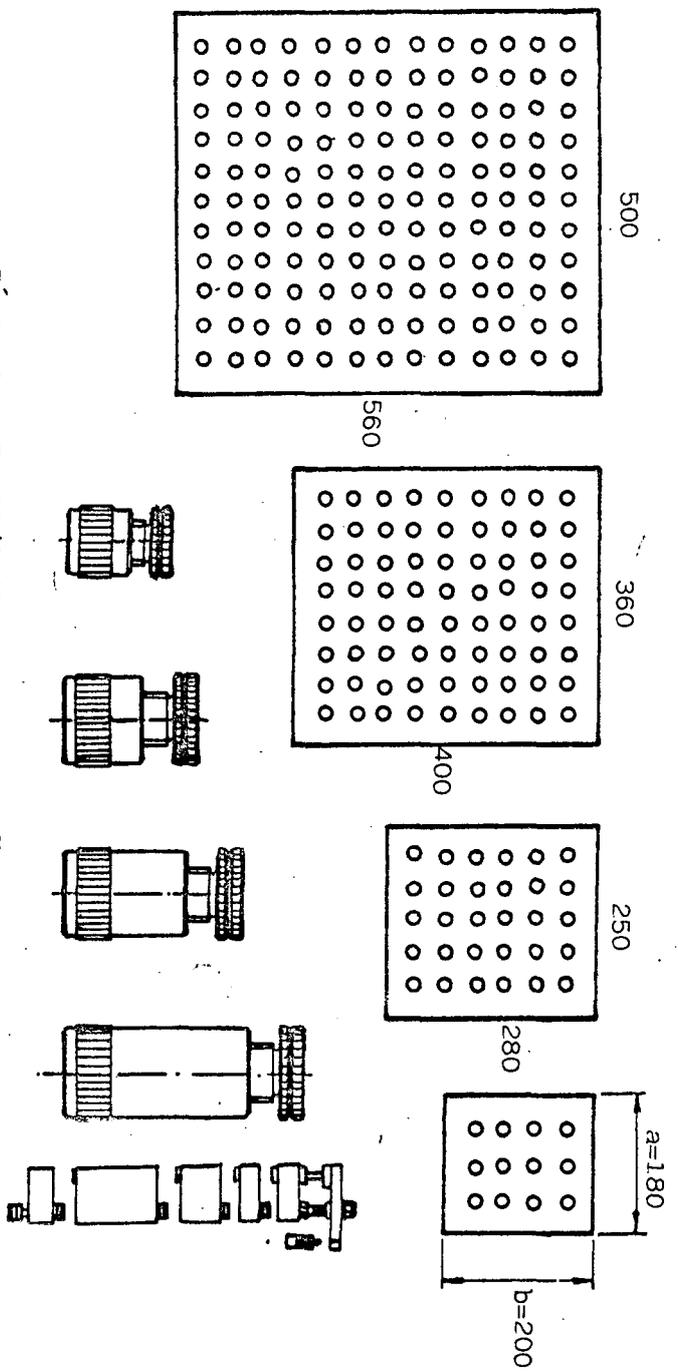


Fig. 4.3 - Modularização de um prisma para posicionamento de peças cilíndricas.



Série de a Ra 20/3 (180 ... 500) $q \approx 1,4$
Série de b Ra 20/3 (200 ... 560) $q \approx 1,4$

Fig. 4.2 - Exemplo de graduação de elementos modulares

A modularidade pode ser avaliada pelo grau de separação, ou seja, pelo número de elementos que compõem um grupo funcional do conjunto modular.

4.2.2 Flexibilidade

A flexibilidade deve possibilitar a ajustagem da posição e localização da peça a medir e dos transdutores, quando é utilizada a mesma configuração do dispositivo, na medição de peças de diferentes dimensões, mas de uma mesma geometria.

A flexibilidade é providenciada basicamente por elementos de guia, de suporte, de posicionamento e de fixação, sendo que os mesmos são freqüentemente ajustáveis mediante guias de escorregamento, rasgos e parafusos.

Assim, pode-se ajustar os elementos de posicionamento e fixação, adequando-se às superfícies de posicionamento da peça a medir, sem a necessidade de elementos especiais adicionais.

Os transdutores também podem ser ajustados e posicionados mediante seus suportes em guias tipo "cauda de andorinha" ou em colunas, sem alteração na configuração do Dm (fig. 4.4).

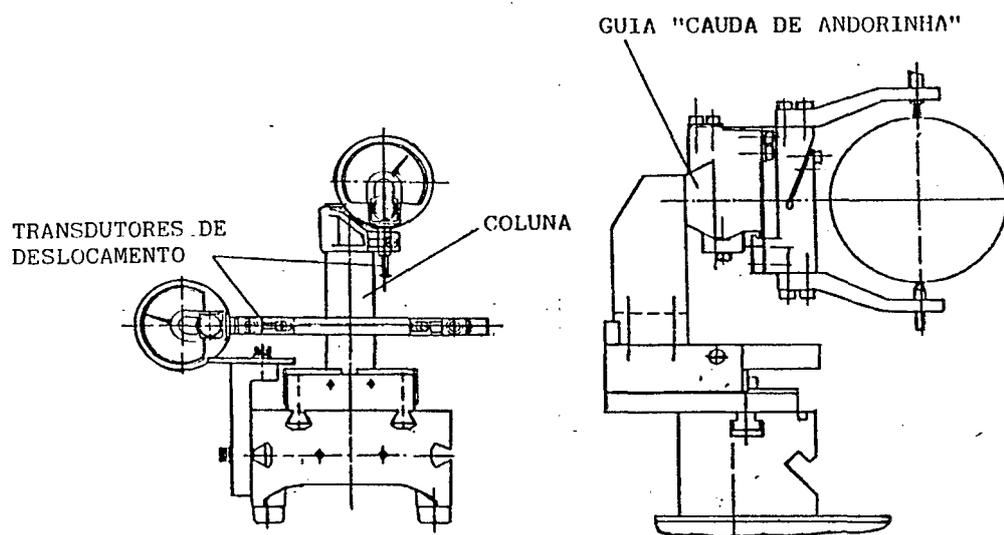


Fig. 4.4 - Ajustagem dos elementos de posicionamento e fixação dos transdutores em guias nos dispositivos de medição.

4.2.3 Versatilidade

Uma característica dos dispositivos modulares, está na redução dos tempos de construção, que contribui para a elevação da produtividade e redução dos custos para implantação.

A versatilidade de montagem e manipulação dos elementos implica na preparação e desmontagem com menor dispêndio de tempo e esforço do operador. Neste sentido, o sistema de união entre os elementos, é o fator preponderante para alcance deste requisito.

Existem dois sistemas de união consagrados por fabricantes de CMD, ou seja, o sistema de rasgos e o sistema de furos roscados e de ajuste. Estes sistemas de união caracterizam os elementos de suporte (placa base, blocos de suporte, etc), apresentado-se na forma de uma matriz, proporcionando diferentes possibilidades de fixação dos demais elementos, conforme a geometria da peça à medir.

Uma análise das vantagens e limitações dos dois sistemas de união, é apresentado na figura 4.5.

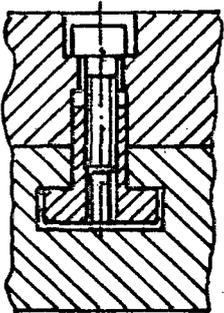
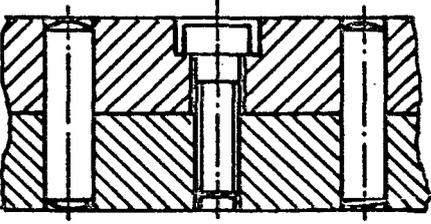
		
PRINCÍPIO	RASGOS "T"	FUROS ROSCADOS E DE AJUSTE
VANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> - boa rigidez - simplicidade de alinhamento - possibilita flexibilidade de posicionamento 	<ul style="list-style-type: none"> - simplicidade de fabricação - maior versatilidade - simplicidade de adaptação - menor nº de elementos - sistema mais universal com elementos normalizados - segurança de união em todas as direções
LIMITAÇÕES	<ul style="list-style-type: none"> - maior número de peças - maior complexibilidade e custo de fabricação - não possui segurança de fixação na direção dos rasgos - pouco versátil para desmontagem. 	<ul style="list-style-type: none"> - a disposição das peças depende do número de furos da matriz - alinhamento das peças depende da precisão de furação dos furos de ajuste.

Fig. 4.5 - Sistemas de união de conjuntos modulares.

Na prática tem-se adotado atualmente, o sistema de furos rasgos, devido as suas melhores características [73].

Existem também, CMD que adotam as vantagens particulares de cada um dos sistemas de união configurando um sistema combinado de rasgos e furos [45] (fig. 4.6).

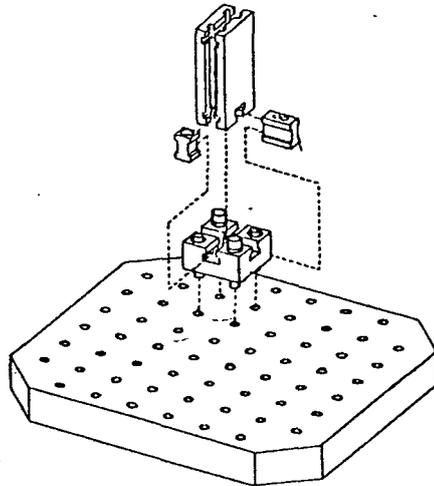


Fig. 4.6 - Sistema combinado de rasgos e furos em um conjunto modular.

A tendência atual está na maior aplicação de sistemas com furos roscados e de ajuste, coaxialmente posicionados, o que possibilita maior número de pontos de ajuste e fixação, em comparação com os sistemas de furos roscados e de ajuste separados, anteriormente utilizados [21 e 22].

Em razão da necessidade de medição de peças pequenas, uma distância entre os furos de 20 a 40 mm, é adequada para disposição dos elementos na configuração do dispositivo.

4.2.4 Intercambiabilidade

Para intercambiabilidade dos elementos modulares, exige-se uma padronização na forma geométrica e nas dimensões dentro de um campo de tolerâncias, o que possibilita a combinação e união das diversas peças em diferentes montagens do conjunto modular.

Assim, para providenciar intercambiabilidade, os elementos devem dispor de uma superfície de junção, que mediante o sistema de união normalizado (rasgos ou furos roscados), possibilitem a montagem das várias peças, sem distorções da posição desejada. A

intercambiabilidade, deve possibilitar também, a troca ou reposição das peças sem deterioração na qualidade construtiva do dispositivo.

Exemplificando para o caso de Dm, há a necessidade de diferentes apalpadores, que são utilizados conforme o caso, sem a modificação dos demais elementos componentes.

4.2.5 Qualidade

É uma característica importante, especialmente para o CMD de medição, visto que as exigências de rigidez, tolerâncias geométricas e dimensionais, acabamento superficial e precisão de posicionamento, são vitais para minimizar os erros de medição e obter a incerteza de medição desejada.

Portanto, verifica-se nos CMD disponíveis, que as peças possuem uma qualidade de fabricação que varia entre IT6 e IT7, com as superfícies retificadas e com tratamento anticorrosivo de niquelagem ou oxidação preta.

A rigidez dos elementos do conjunto, deve ser suficiente para absorver a força de medição, e força de fixação e a massa da peça a medir, bem como a massa dos outros elementos, de maneira a evitar deformações significativas que resultem em erros de medição.

4.2.6 Racionalização de elementos

Para um CMD requer-se a racionalização da variedade de elementos de construção, ou seja, através de uma provisão limitada de elementos resultam um grande número de configurações diferentes, implicando em custos menores para aplicação.

No atendimento desta exigência, é vantajoso que alguns elementos modulares acumule diferentes funções, ou seja, que elementos de medição estejam integrados e elementos de guia e de suporte, na forma de uma unidade de construção universal, que é altamente rentável na constituição do conjunto modular.

A integração de funções é um princípio de projeto que apresenta as vantagens de: [51]

- . redução da quantidade de elementos;
- . miniaturização (reduzida massa e volume);
- . utilização intensiva do elemento;
- . menor dispêndio de montagem e ajustagem.

No entanto, a integração de funções tem a desvantagem da não modularidade, o que reduz as possibilidades de combinações e montagens. Em alguns casos, eleva a complexidade de fabricação do elemento, encarecendo sua aplicação.

Nestes termos, deve-se limitar a modularidade e o número de elementos do conjunto, baseando-se no volume de medição estabelecido para as peças a medir e na complexidade dos parâmetros de medição que o CMD objetiva atender.

A figura 4.7 apresenta uma avaliação das principais características inerentes aos CMD dos fabricantes pesquisados.

	FABRICANTES DE CONJUNTOS MODULARES DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO											
	TESA	H & K	HOMMEL-WERNE	FEINPROF	ALFRE-DEEN	RECTIFIL	ERS	KS	ATI	C.E. JOHANSSON	HELIOS	VERNON
MODULARIDADE	⊗	⊗	○	○	⊗	○	⊗	○	⊗	○	○	○
RACIONALIZAÇÃO DE ELEMENTOS	○	⊗	○	○	○	⊗	⊗	⊗	⊗	○	⊗	⊗
VERSATILIDADE DE MONTAGEM	⊗	○	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
QUALIDADE	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	○	⊗	⊗	⊗	⊗
FLEXIBILIDADE	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	○	⊗	○	⊗	⊗	⊗	⊗
CUSTO	⊗	○	○	○	⊗	○	○	⊗	⊗	⊗	⊗	○
APLICAÇÕES	⊗	⊗	○	○	⊗	○	○	○	○	○	○	○
<p style="text-align: center;">○ Muito bom ⊗ Razoável ○ Limitado</p>												

Fig. 4.7 - Avaliação das principais características dos conjuntos modulares de dispositivos de medição existentes.

4.3 ELEMENTOS FUNCIONAIS

O tipo e quantidade dos elementos de construção baseiam-se no campo de aplicação do conjunto modular, diferenciando-se entre si no fundamento geométrico-material, possibilitando através de diferentes escalas de dimensões, a realização das subfunções parciais descritas no tópico 2.2 deste trabalho, mediante elementos funcionais correspondentes (fig. 4.8).

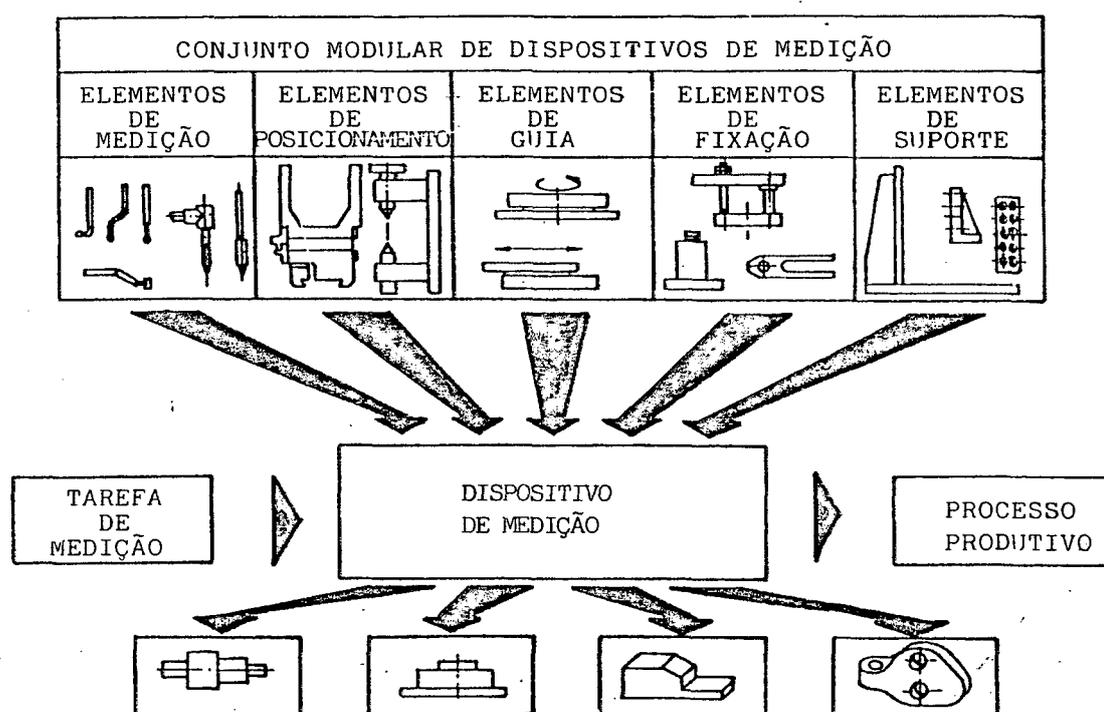


Fig. 4.8 - Elementos funcionais básicos do conjunto modular de dispositivos de medição.

Além destes elementos funcionais básicos, são utilizados, também, os elementos auxiliares, elementos adaptáveis e os elementos especiais, que podem surgir em diversas combinações possíveis nas diferentes tarefas de medição (fig. 4.9)[23].

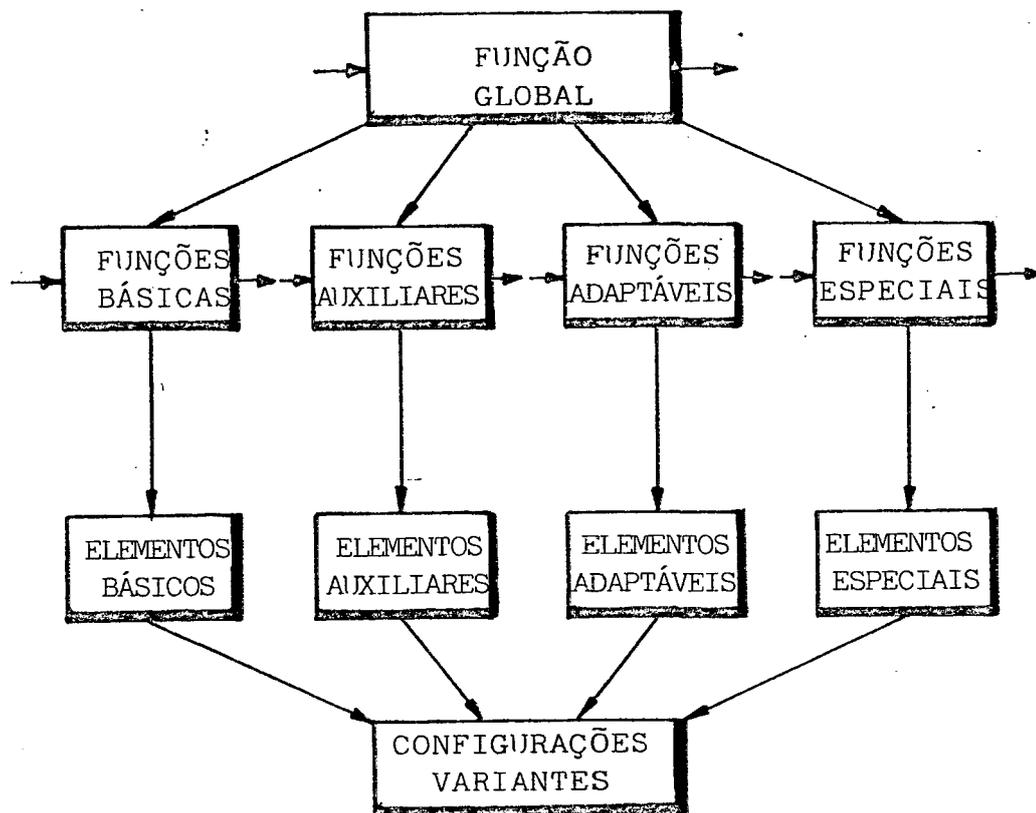


Fig. 4.9 - Tipos de funções e elementos em conjuntos modulares.

Os elementos básicos são sempre utilizados para qualquer configuração alternativa, sendo indispensáveis na composição de um Dm. Estes elementos que fazem parte do CMD, podem ser fabricados em diferentes dimensões graduadas, sendo associados aos demais elementos para atendimento da função global.

Os elementos auxiliares atendem as tarefas de junção entre os elementos básicos, sendo representados geralmente como elementos de união (por ex.: parafusos, anéis elásticos, pinos elásticos), podendo ser adquiridos no mercado e geralmente são normalizados.

Os elementos adaptáveis, servem para adequação dos elementos existentes com base em outros requisitos necessários, como por exemplo, as outras dimensões, materiais ou acabamentos superficiais. Estes elementos podem ser fabricados ou fornecidos pelo fabricante como opcionais.

Os "elementos especiais" atendem à tarefas específicas de medição, através de peças adicionais ao conjunto modular, representando um projeto particular. Estes elementos não modulares, fundamentam-se na limitação econômica e racional de peças do CMD, complementando as funções básicas ou mesmo através de funções especiais ampliando o campo de aplicação a diversas outras tarefas de medição. Estes elementos devem ser fabricados pelo usuário.

4.4 FORMAS CONSTRUTIVAS TÍPICAS DE CONJUNTOS MODULARES

Os conjuntos modulares existentes diferenciam-se, dependendo da família de peças a serem controladas. Assim, existem conjuntos que compõe Dm para colocação horizontal ou vertical de uma família de peças cilíndricas longas (eixos, hastes, colunas, etc.) e GF para peças cilíndricas curtas ou peças prismáticas, em mesas de medição com deslocamento angular ou linear.

4.4.1 Componentes básicos de dispositivos para peças cilíndricas longas

A montagem básica destes Dm, consiste em uma placa base ou suporte, onde estão fixados mecanismos articulados com contrapontas e prismas de posicionamento (fig. 4.10).

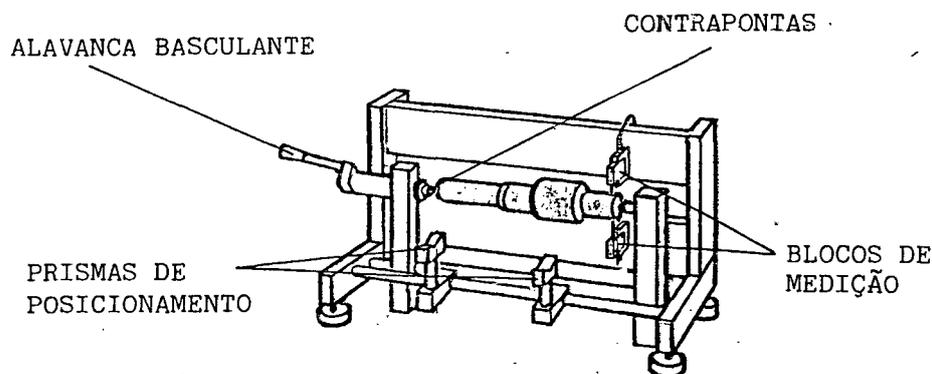


Fig. 4.10 - Configuração básica de dispositivos de medição para peças cilíndricas longas [35].

Peças pesadas, difíceis de serem manipuladas, são colocadas primeiramente em prismas de posicionamento fixados na placa base, onde é ajustada a altura, para que as pontas de posicionamento e fixação fiquem aproximadamente coincidentes com o eixo da peça a medir.

Para posicionamento e fixação dos TD, são utilizados arcos de medição, fixos em suportes ajustáveis que permitem a flexibilidade necessária para medição de diferentes diâmetros (fig. 4.11).

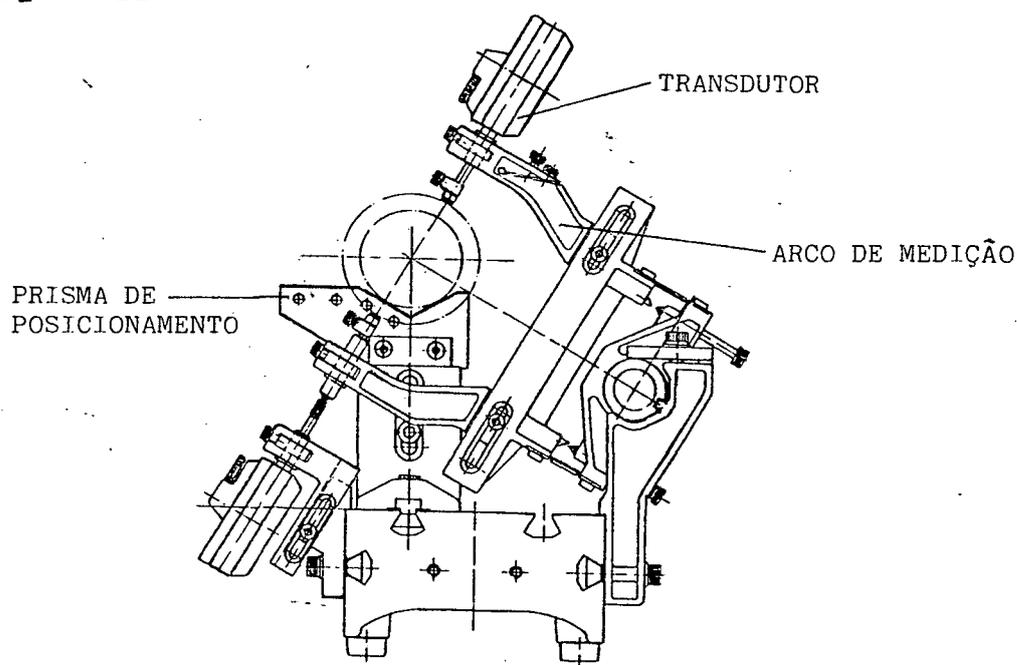


Fig. 4.11 - Prisma de posicionamento e arco de medição [32].

A superfície do palpador inferior do arco de medição entra em contato imediatamente após a peça ser deslocada até a posição de medição. A superfície de contato inferior é deslocável através de guias de molas laminares paralelas, que transmitem o movimento à haste de medição do transdutor.

4.4.2 Componentes básicos de dispositivos para peças cilíndricas curtas ou peças prismáticas.

Estes dispositivos possuem colunas ou placas verticais, onde estão posicionados os arcos de medição com os transdutores, ficando a peça apoiada sobre uma mesa de medição (fig.4.12).

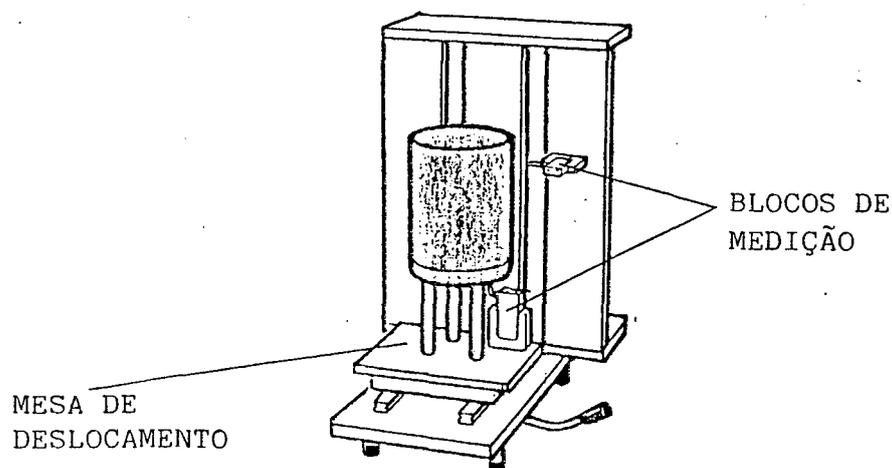


Fig. 4.12 - Configuração básica do dispositivo de medição para peças cilíndricas curtas [35].

Em função destes dispositivos possibilitarem o controle de várias dimensões, além de diâmetros externos, como por exemplo alturas, afastamentos ou diâmetros de furos, os mesmos são construídos com elementos especiais correspondentes.

Para o controle de altura são adaptadas hastes ou suportes ajustáveis com transdutores. O dispositivo a ser configurado para medição de furos, é montado sob a mesa de medição, onde os apalpadores saindo da base, permitem o contato com as faces internas do furo, sem causar problemas de colocação e retirada da peça medir (fig. 4.13).

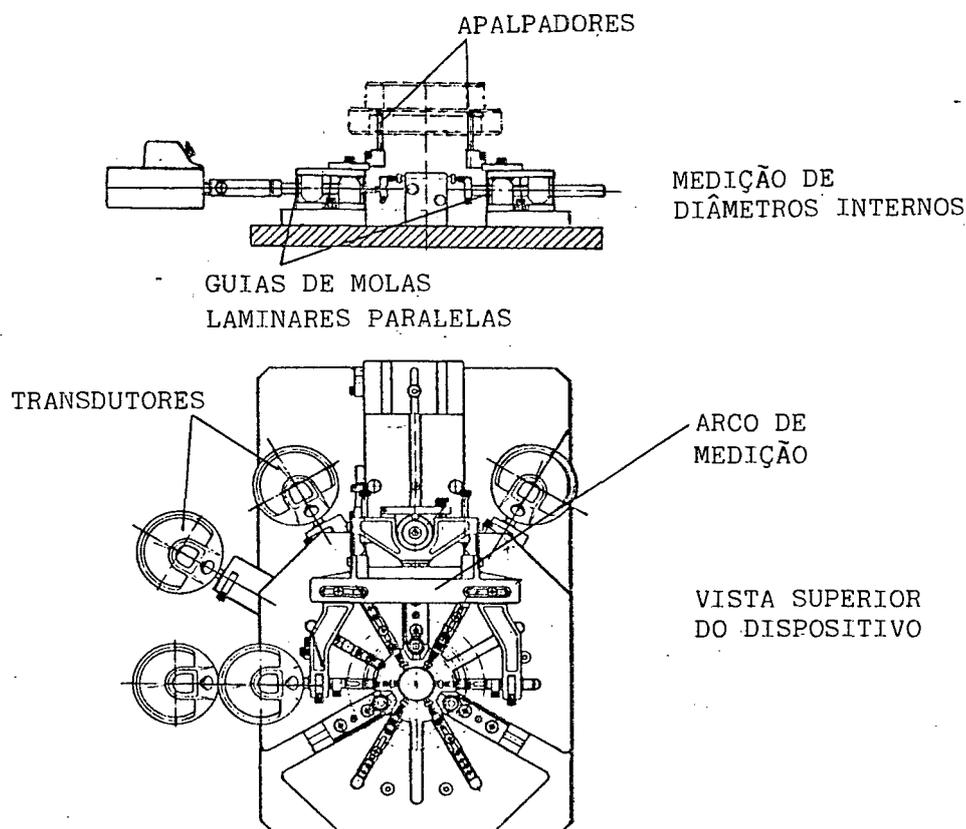


Fig. 4.13 - Dispositivo para medição de anéis [32].

4.5 PROJETO DO CONJUNTO MODULAR PARA DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

No projeto do conjunto modular é necessário, primeiramente, definir os requisitos para medição das famílias de peças desejadas, como por exemplo eixos, discos ou peças prismáticas.

Mediante o estudo bibliográfico, pode-se então definir os requisitos metrológicos e operacionais, passando a ser referenciais à etapa de execução do projeto do conjunto proposto (fig. 4.14).

METROLÓGICOS	E D E E E E E	<ul style="list-style-type: none"> - Incerteza de medição dos dispositivos modulares $\langle \pm 3 \mu\text{m}$ - Atendimento ao princípio de ABBE no posicionamento dos transdutores - Apalpadores com pontas de aço cromo ou metal duro - Segurança contra choques e sobredeslocamento dos transdutores - Força de medição dos apalpadores $\langle 3 \text{ N}$ - Medição de parâmetros dimensionais e geométricos de peças cilíndricas e prismáticas - Faixa de operação dos transdutores de $\pm 2 \text{ mm}$ - Fixação de transdutores com diâmetro de $\varnothing 8h6 \text{ mm}$ por aperto
OPERACIONAIS	D D D E D D	<ul style="list-style-type: none"> - Utilização de elementos normalizados - Utilização de manipuladores proporcionando rapidez de ajustes e simplicidade de operação - Simplicidade de colocação e fixação da peça a medir - Flexibilidade de montagem e simplicidade de ajuste - Rigidez e estabilidade das peças durante a medição - Volume de medição das peças de $= 100 \times 450 \text{ mm}^2$ - Graduação das peças modulares por progressão geométrica de números normalizados (ABNT NB-72 e NB-73)

Fig. 4.14 - Requisitos de projeto do conjunto modular

D - desejado E - exigido [75]

Assim, definidos os requisitos de projeto, as etapas seguintes relacionam-se com a elaboração dos elementos funcionais correspondentes a cada função descrita no capítulo 2.

4.5.1 Definição dos Elementos do Conjunto

Para definição dos elementos do conjunto elaborou-se alternativas de projeto para cada grupo funcional. As alternativas de projeto foram avaliadas, selecionado-se as melhores que atendessem aos requisitos exigidos e desejados.

A seguir serão descritos e apresentados os elementos de cada grupo funcional componente do CMD.

a) Elementos de Medição

Analisando-se os elementos necessários e os problemas de medição a serem resolvidos para o atendimento dos requisitos do conjunto modular, definiu-se, então, apalpadores e transdutores a serem empregados nos dispositivos construídos.

Os apalpadores projetados para o conjunto modular, possuem um diâmetro padrão de $\varnothing 6h6mm$, sendo intercambiáveis para qualquer suporte dos mesmos.

A figura 4.15, mostra alguns exemplos dos diferentes tipos de apalpadores constituintes do conjunto modular.

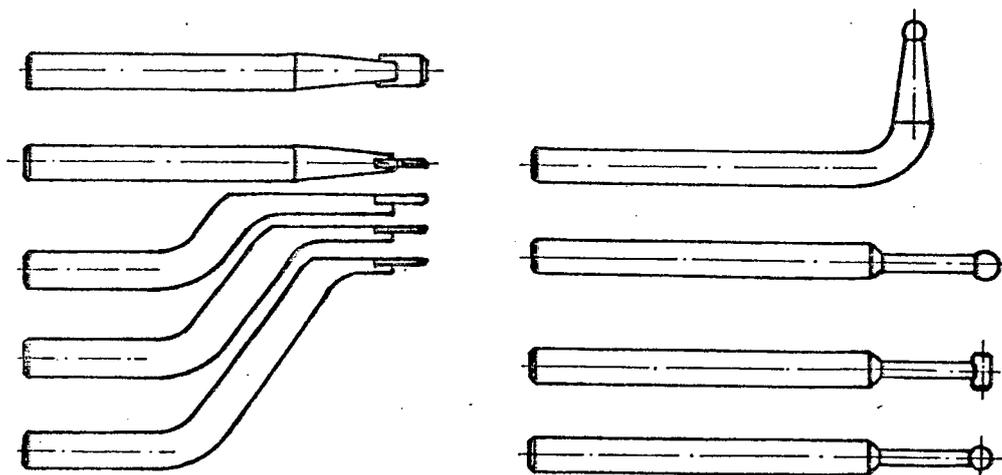


Fig. 4.15 - Apalpadores do conjunto modular protótipo [75].

Para medição de diâmetros com intervalos estreitos entre si, é necessário dispor de hastes com as pontas deslocadas do eixo original, ou seja, com hastes curvas para alcançar os diâmetros desejados, a partir dos diversos arcos de medição (fig. 4.16) posicionados um ao lado do outro.

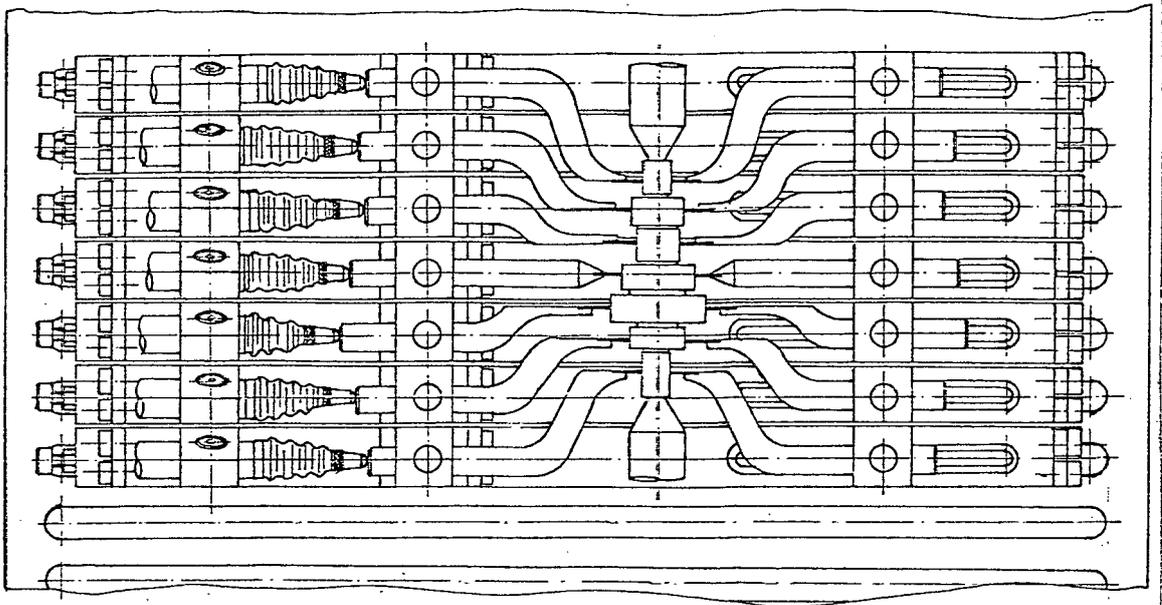


Fig. 4.16 - Hastes apalpadoras curvas para medição de peças pequenas.

Os TD a serem utilizados, são todos aqueles com diâmetro padronizado de $\varnothing 8h6$ mm, de preferência transdutores eletro-indutivos de deslocamento com guia de gaiola de esferas e faixa de operação de ± 2 mm [30].

b) Elementos de posicionamento

Os elementos esboçados e construídos para o CMD protótipo, apresentam soluções para posicionamento de peças cilíndricas como contrapontas, prismas ou buchas de centralização e aperto, e para peças prismáticas dispõe-se de batentes, parafusos, pinos e apoios ajustáveis e intercambiáveis.

Os elementos de posicionamento tem como principais características:

- superfícies de referência de bom acabamento para assentamento das peças;
- posicionamento de famílias de peças de diferentes dimensões e tolerâncias;
- superfícies de contato de material duro, resistente ao desgaste e de pequena rugosidade;
- simplicidade de fixação junto aos elementos de suporte.

Para posicionamento das peças cilíndricas, o contraponto foi projetado juntamente com um sistema de fixação e suportes em um mancal de escorregamento, providenciando a aproximação da peça para junto dos transdutores sobre batentes ajustáveis para definição da posição de medição (fig. 4.17).

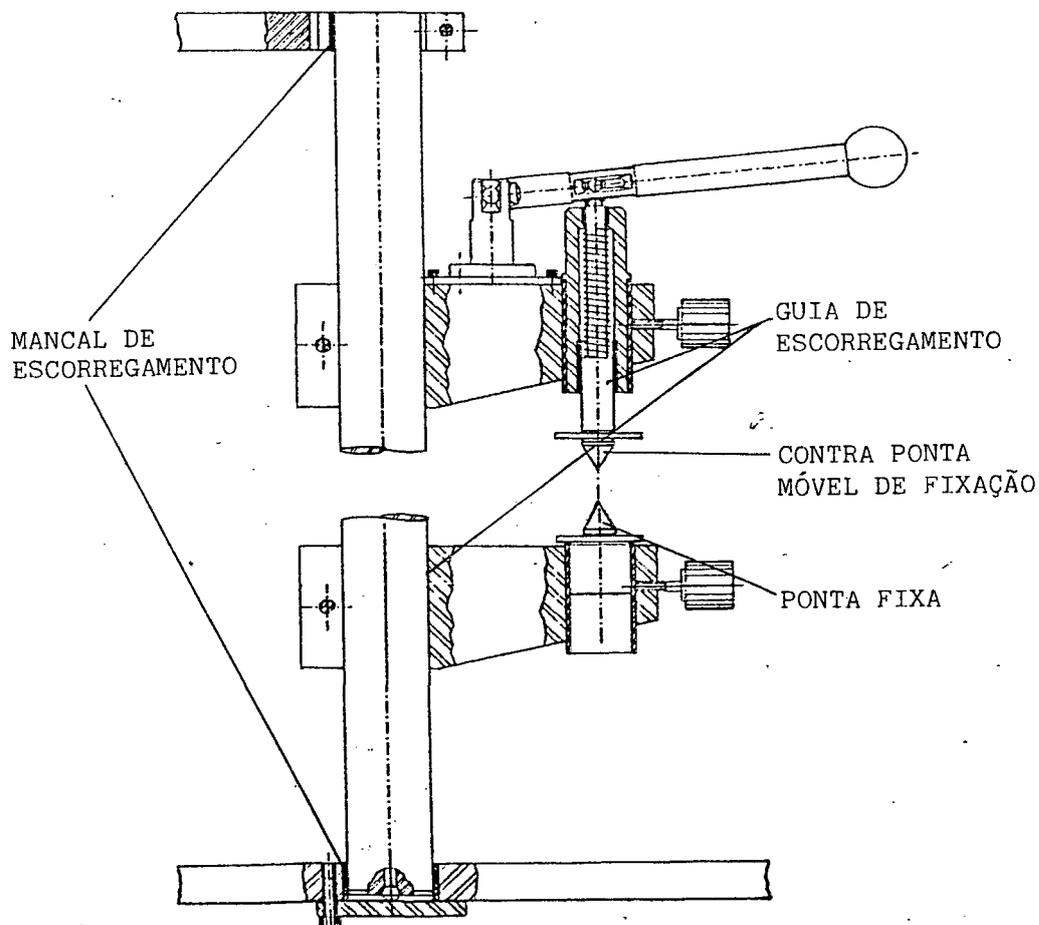


Fig. 4.17 - Dispositivo de posicionamento e fixação de peças cilíndricas entre pontas [75].

No posicionamento de peças cilíndricas sem furo de centro e peças prismáticas com superfícies planas e irregulares de média complexidade, foram elaborados outros elementos de posicionamento modulares e ajustáveis (fig. 4.18).

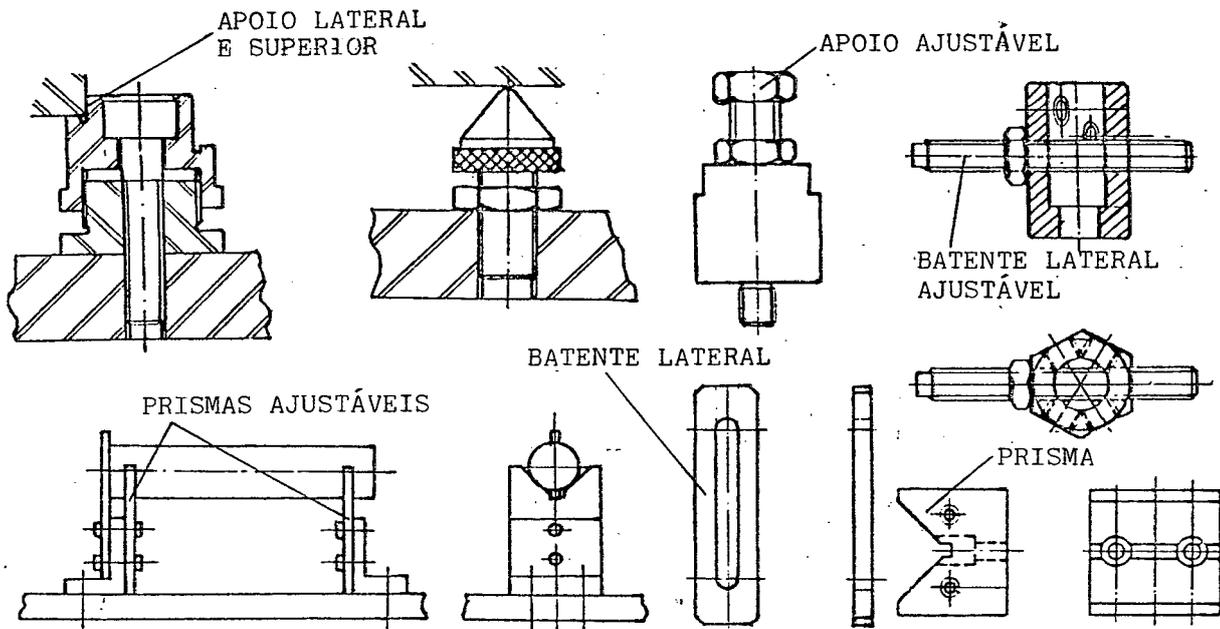


Fig. 4.18 - Exemplos de elementos de posicionamento do conjunto modular [75].

Estes elementos não diferem basicamente dos elementos existentes no mercado, sendo na maioria normalizados e amplamente difundidos [1 a 3].

Para perfis irregulares muito complexos, deverão ser projetados em alguns casos, matrizes ou elementos específicos para definição da posição conforme o perfil geométrico da peça a medir.

Além do posicionamento das peças de medição, foram elaborados elementos mecânicos para posicionamento dos transdutores e retração dos apalpadores.

O posicionamento dos transdutores, na medição dos diâmetros, baseia-se no princípio do arco de medição. Alguns tipos de arcos de medição comercializados por diversos fabricantes de CMD, pode ser observado na fig. 4.19.

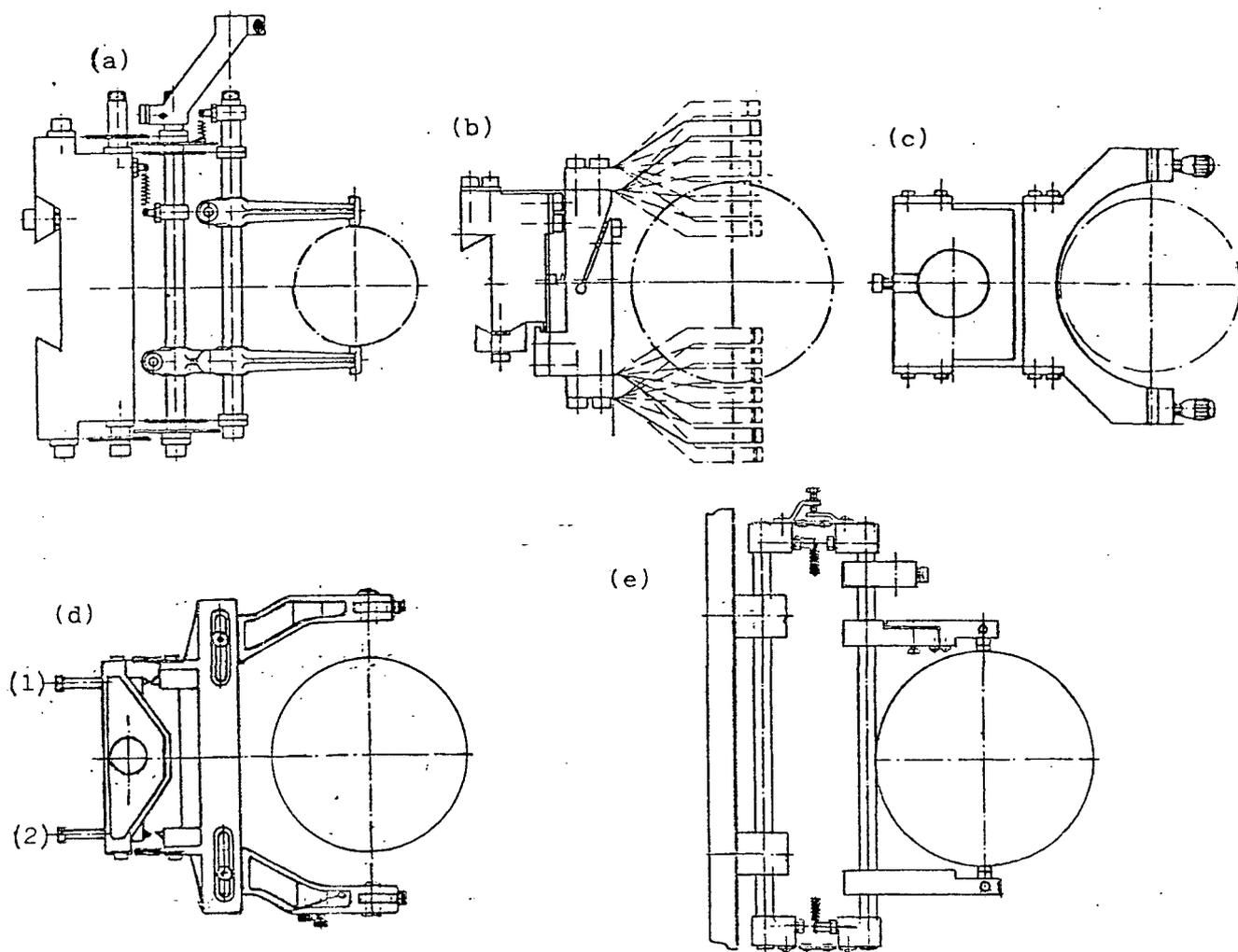


Fig. 4.19 - Tipos de arcos de medição existentes.

(a) não atende ao princípio de ABBE; possui dois pares de molas laminares e é específico para medição de diâmetros [28]; (b) atende ao princípio de ABBE; necessita modificar as hastes suportes dos elementos, para diferentes faixas de medição dos diâmetros; contato direto da ponta de medição do transdutor com a peça, que pode provocar danos; [29] (c) atende ao princípio de ABBE; específico para determinada faixa de medição dos diâmetros; contato direto da ponta do transdutor com a peça de medição [27]; (d) atende ao princípio de ABBE; possibilita o ajuste da

faixa de deslocamento das guias de molas laminares pelos parafusos (1) e (2); específico para medição de diâmetros e o transdutor entra também em contato direto com a peça [34]; (e) não atende ao princípio de ABBE; possui um mancal de mola laminar, que dependendo do dimensionamento, não transmite o deslocamento real correspondente à variação dimensional do diâmetro ao transdutor; possui modularidade possibilitando a montagem de diferentes configurações para controle de outros parâmetros de medição com os mesmos tipos de elementos [30].

Os arcos de medição projetados para o protótipo, são configurados à partir das hastes suportes com seção quadrada de 12mm, possibilitando montagens compactas com o posicionamento dos TD, numa posição transversal à peça cilíndrica de medição, atendendo ao princípio de ABBE.

Nas extremidades das hastes, são montadas as molas laminares paralelas para formar então a guia de deslocamento necessária à medição.

Junto às molas laminares, foram instalados batentes ajustáveis que tem a função de:

- possibilitar o ajuste da posição de repouso da guia e portanto do apalpador, evitando choques quando do posicionamento da peça a medir na posição de medição;
- limitar o deslocamento máximo das molas laminares, conservando sua integridade e a do arco de medição.

Para proteger os TD de choques diretos, de forças transversais e sobredeslocamento devido ao contato direto com a peça, idealizou-se um pequeno módulo a partir de uma guia de molas laminares paralelas que transmite o movimento do apalpador à ponta sensora do transdutor.

Este módulo também possui o mesmo modelo de molas laminares com batentes ajustáveis adotado no arco de medição. Sua concepção foi formulada para atender à medição de afastamentos, ou seja, intervalos entre os diâmetros, modificando-se somente a direção e posição do apalpador.

A fig. 4.20, mostra alguns exemplos de montagens do arco de medição desenvolvido para o conjunto modular e seus elementos componentes.

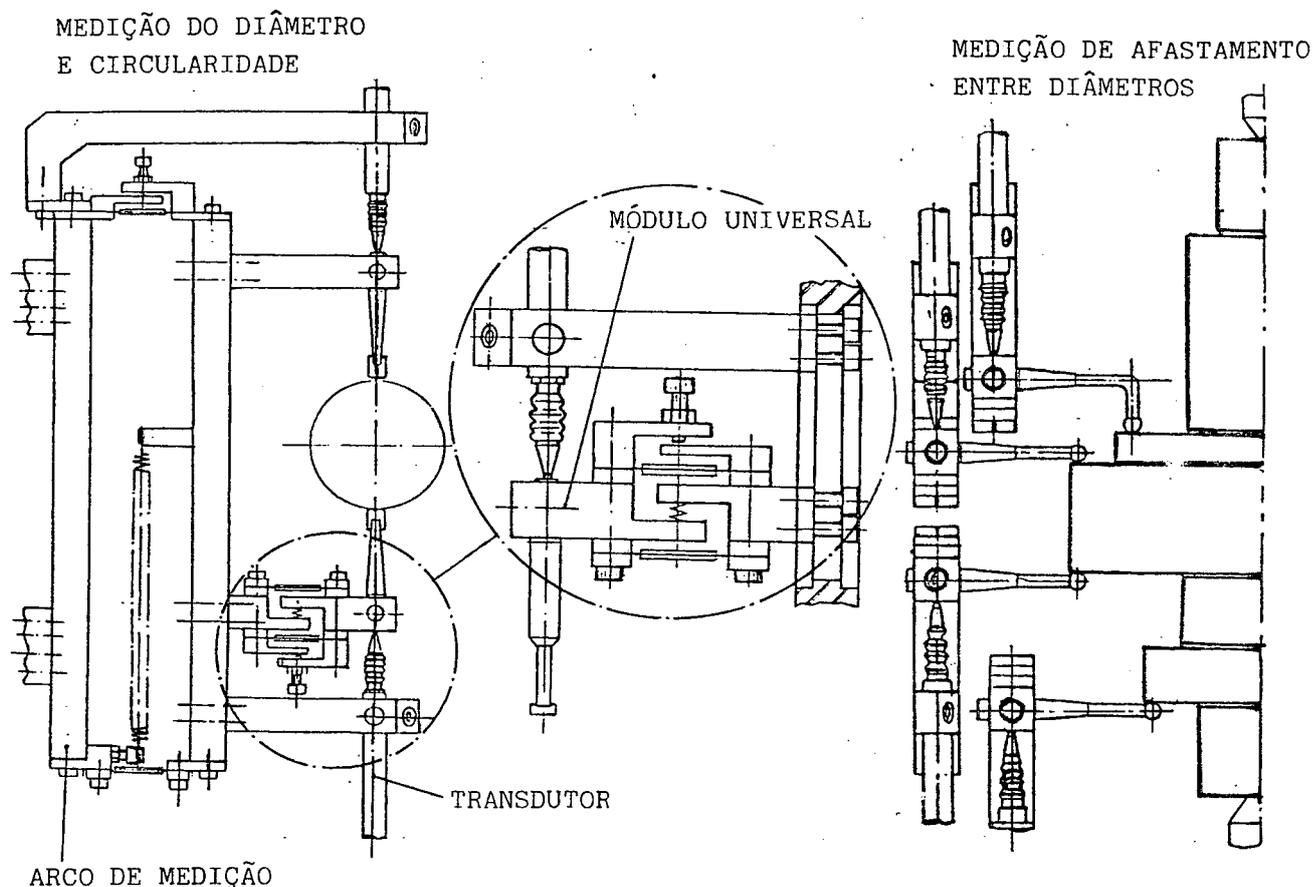


Fig. 4.20 - Configurações do arco de medição de diâmetros e o módulo universal do conjunto modular protótipo [75].

Pode-se observar, que o módulo caracteriza um modelo universal com elementos padronizados, que pode ser adotado para qualquer parâmetro de medição desejado.

Como vantagem principal em relação aos modelos existentes, este arco de medição constituído por hastes suportes, pode ser montado em diferentes configurações e aplicações. Assim, atende-se não somente a medição de peças cilíndricas, mas também a peças de diferentes geometrias, o que permite grandes economias ao

usuário, que pode expandir o conjunto conforme suas necessidades.

Com o intuito de evitar choques, danos e distorções aos apalpadores e transdutores no momento do posicionamento da peça a medir para medição de afastamentos (medições axiais) entre diâmetros, elaborou-se um dispositivo de posicionamento e retração mecânico, atendendo aos seguintes requisitos:

- retração de todos os apalpadores com menor número de operações e tempo dispendido;
- flexibilidade para aplicação em diferentes posições dos módulos de medição;
- ajustagem independente para regulagem do curso de retração e posicionamento de cada um dos módulos de medição;
- dispositivo com poucos componentes e custos reduzidos de fabricação.

Atualmente, os dispositivos de retração existentes atuam por princípio eletropneumático, onde alguns baseiam-se em uma unidade de sucção diretamente conectada aos TD [30], e outros mediante pequenos pistões incorporados a um bloco de medição, que desloca as guias de molas laminares paralelas retrocedendo os apalpadores (fig. 4.21).

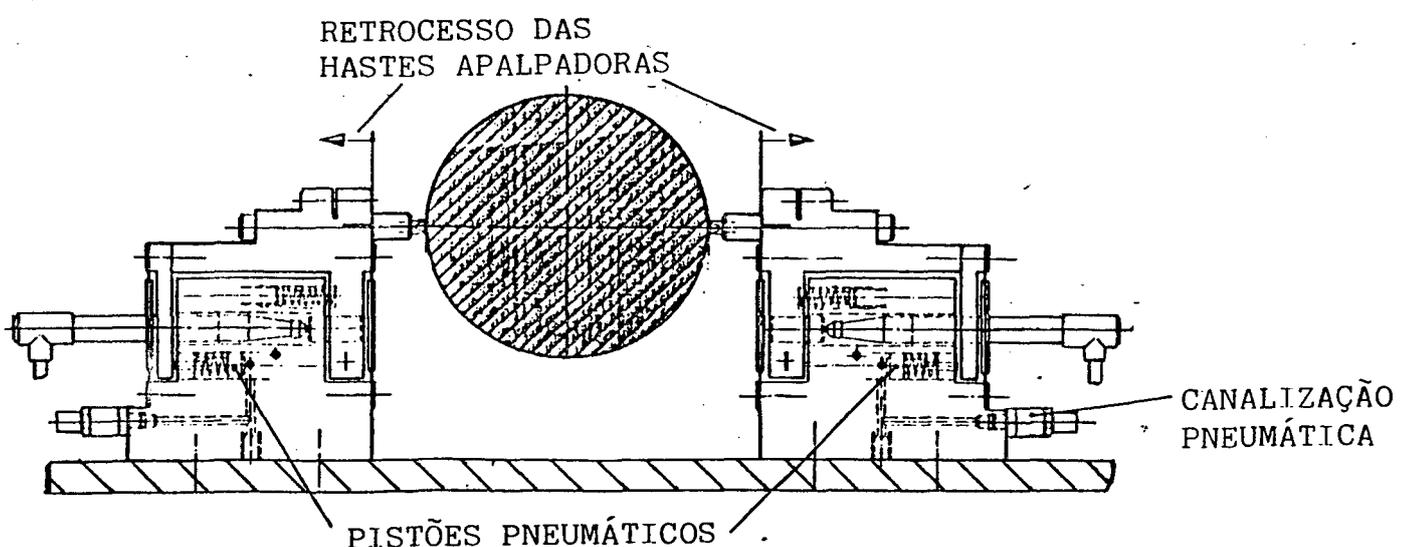


Fig. 4.21 - Dispositivo eletropneumático para retração do transdutor e apalpador [31]

Estas soluções, no entanto, encarecem o sistema de medição, além de necessitar o suprimento de ar comprimido para atuação do dispositivo.

Assim, idealizou-se um dispositivo mecânico, que realiza a retração dos apalpadores e TD, sem a atuação direta do operador.

A retração é ativada, através de uma alavanca ajustável que entra em contato com a peça à medir no momento que esta se aproxima da posição de medição.

A alavanca realiza a rotação de uma barra de seção quadrada onde estão fixados fios de nylon, que tracionam os módulos com as guias de molas laminares paralelas, que por sua vez retraem os apalpadores (fig. 4.22).

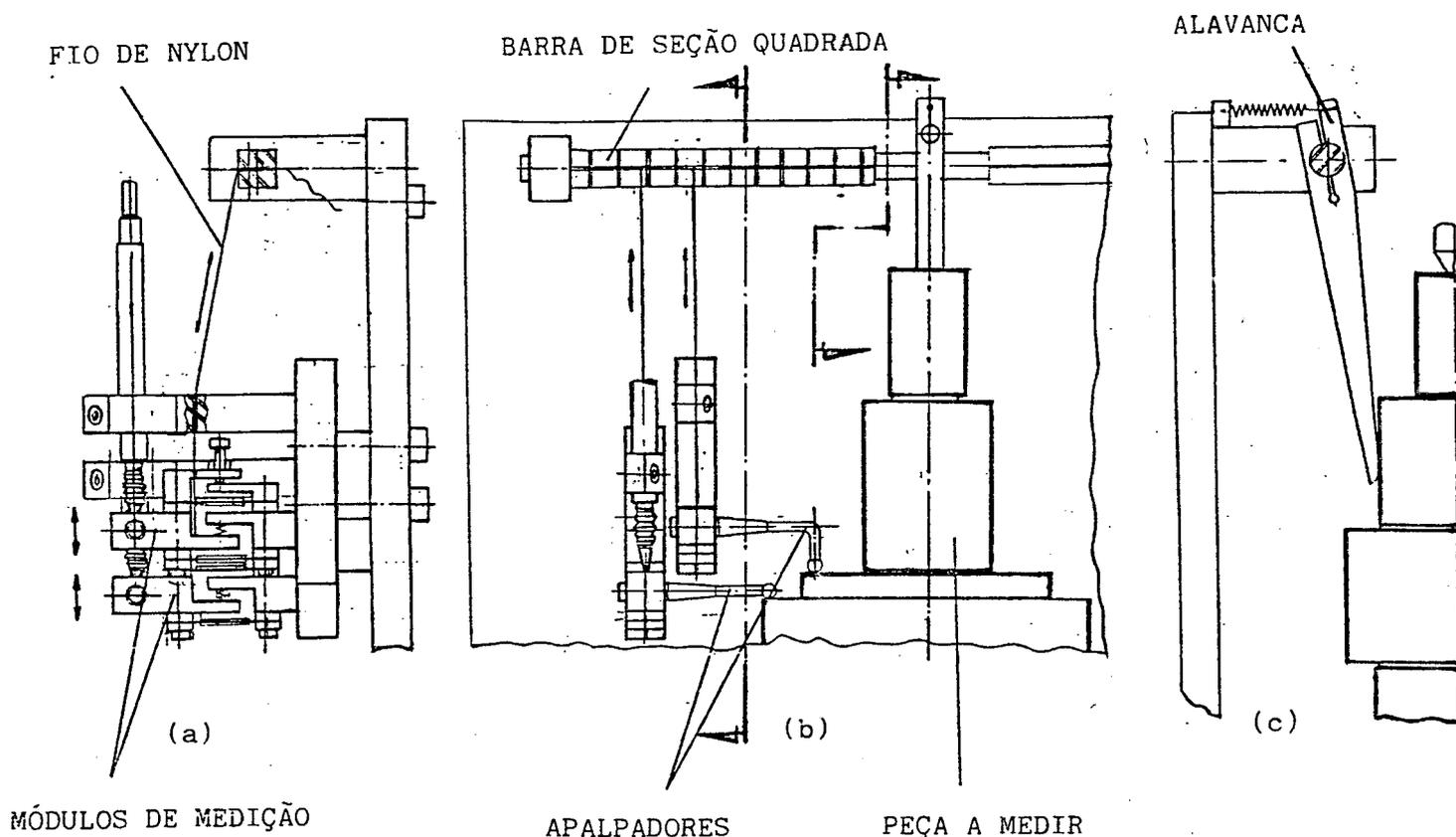


Fig. 4.22 - Dispositivo de retração dos apalpadores [75]. (a) Vista lateral direita dos módulos de medição, (b) Vista frontal, (c) Vista lateral esquerda da alavanca em contato com a peça.

No estado de repouso, os apalpadores estão retraídos. Com a aproximação da peça de medição, os apalpadores retornam a sua posição original, entrando em contato com a superfície de medição dos parâmetros a serem controlados.

Retirando-se a peça da posição de medição, os apalpadores voltam a se retrair. Desta forma, uma vez ajustado o dispositivo de retração, o operador não necessitará acioná-lo a cada colocação da peça, ficando os apalpadores a favor da segurança, sem possibilidade de choques e danos.

c) Elementos de fixação

O projeto dos elementos de fixação constituintes do MFS protótipo, baseou-se nos princípios de fixação mecânicos já consagrados e normalizados para fixação de peças em processos de usinagem.

Conforme a figura 4.17, utilizou-se de um contrapontos com um mecanismo que pressiona a ponta móvel, contra a peça a medir, através de uma mola. A peça a medir pode então ser liberada através de uma alavanca que retrai a ponta móvel de fixação.

Para medição de peças de perfis diversos, foram projetados elementos de fixação modulares e ajustáveis, permitindo a fixação lateral ou superior das peças sobre os elementos de posicionamento. Estes elementos atuam mecanicamente através de excêntricos e parafusos como mostra figura 4.23.

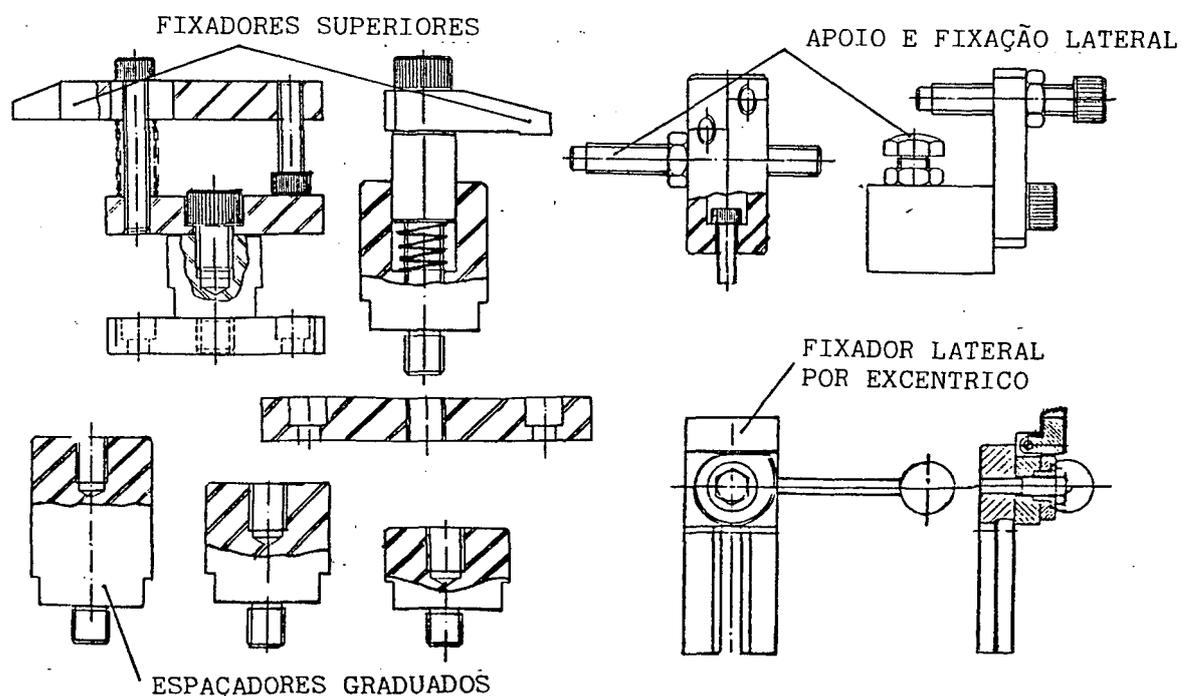


Fig. 4.23 - Elementos de fixação de peças de diversos perfis geométricos [75].

Alguns elementos de fixação, variam segundo uma graduação de dimensões normalizadas para permitir a fixação de diferentes alturas e dimensões das peças.

Como característica, estes elementos possuem boa ergonomia para o operador, proporcionando simplicidade e rapidez de colocação e retirada das peças. Além disso, devem adaptar-se à geometria da peça, onde a resultante das forças garanta segurança à posição da peça e confiabilidade ao processo de medição.

A exemplo dos elementos de posicionamento, estes elementos possuem versatilidade para diferentes disposições de fixação sendo facilmente montados nos elementos de suporte.

d) Elementos de guia

Na configuração do CMD, os elementos de guia terão aplicações em três tarefas principais:

- deslocamento da peça à medir até os transdutores ou vice-versa;
- deslocamento dos apalpadores para aquisição das variações dimensionais das peças;
- deslocamento e posicionamento dos suportes dos transdutores;

No caso da medição de peças cilíndricas, optou-se por um mancal de escorregamento, possibilitando o posicionamento do contrapontas juntamente com a peça a medir até a posição de medição.

Para minimização de folgas no deslocamento e posicionamento, previu-se uma ranhura no mancal que é ajustado por aperto através de um parafuso.

No deslocamento dos apalpadores, ou melhor, do arco de medição, são utilizadas as consagradas guias de molas laminares paralelas, devido as suas qualidades vantajosas em relação aos demais tipos de guias e em razão de ser adequado a pequenos deslocamentos, que é o caso do método de medição diferencial adotado para determinação das dimensões das peças.

Para deslocamento dos suportes dos transdutores e apalpadores, projetou-se guias prismáticas de escorregamento mediante rasgos oblongos nas hastes suportes, proporcionando flexibilidade e posição ortogonal desejável para medição dos diâmetros.

No caso da medição de peças de perfis diversos, utilizou-se de uma mesa de deslocamento com guias lineares de rolamento, que desloca uma placa suporte, onde são fixados os elementos de posicionamento e a peça a medir. Com a colocação e fixação da peça sobre a placa, pode-se movimentá-la até a posição de contato com os apalpadores para realizar a medição.

Na medição de discos e peças cilíndricas curtas, é utilizada sobre a placa suporte uma mesa giratória de rolamento, possibilitando a medição de diâmetros e circularidade em diferentes pontos.

Foram desenvolvidas também, mesas de deslocamento com guias de rolamento, que podem ser combinadas para realizar a medição da localização de furos, de rasgos em eixos cilíndricos, etc. (fig. 4.24).

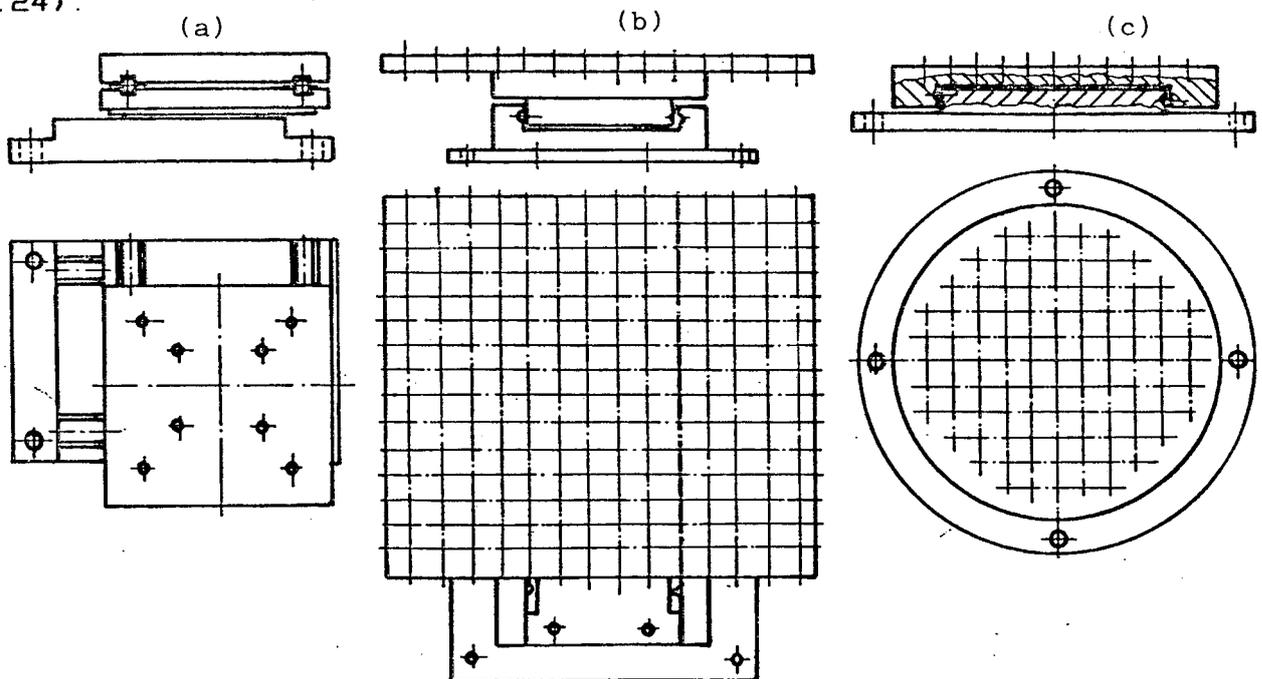


Fig. 4.24 - mesas de deslocamento do conjunto modular protótipo. (a) mesa de coordenadas para localização de furos; (b) mesa de deslocamento linear; (c) mesa de deslocamento angular.

e) Elementos de suporte

Os elementos de suporte do CMD, são configurados como a maioria dos outros existentes, ou seja, através de peças com superfícies planas de seções quadradas ou retangulares.

Algumas características de projeto destes elementos são:

- modularidade;
- graduação das dimensões geométricas com o fim de atender a uma combinação mais racional possível de montagem;
- rigidez estática suficiente para admissão das forças resultantes das massas dos vários elementos além das forças de fixação e medição;
- sistema de união para fixação e suporte dos demais elementos.

Na configuração de um CMD, sempre se faz necessária a utilização de uma placa base, onde se possa fixar as demais peças e construir o dispositivo. Além da placa base são necessários blocos de suporte, colunas para placas verticais e hastes suportes para disposição dos elementos de medição.

No detalhamento dos elementos de suporte, foi necessário definir qual o sistema de união a ser adotado, para possibilitar as diversas combinações necessárias à construção.

O princípio de união e seus elementos devem atender os requisitos de:

- simplicidade de montagem, desmontagem e ajuste de posição;
- rigidez, precisão e estabilidade;
- variedade de disposição dos elementos entre si para diferentes aplicações;
- utilização de elementos normalizados e disponíveis.

Analisando-se várias alternativas como: imãs permanentes, encaixes, engates rápidos, etc..., decidiu-se adotar o princípio de união de furos roscados e parafusos, que mais satisfaz aos requisitos desejados.

Para providenciar flexibilidade de posicionamento e ajuste entre os elementos de suporte, foi adotado o sistema de furos oblongos.

Assim, os elementos de suporte caracterizados por uma matriz de furos ou rasgos oblongos em suas superfícies frontal e lateral, e por uma graduação dentro de uma série de dimensões normalizadas, possibilitam diferentes montagens e adaptações das peças.

As mesmas características apresentam as hastes suporte dos arcos de medição, possuindo secção quadrada com oblongos passantes, permitindo diferentes configurações de posicionamento e fixação entre si e nos placas-suporte (fig. 4.25).

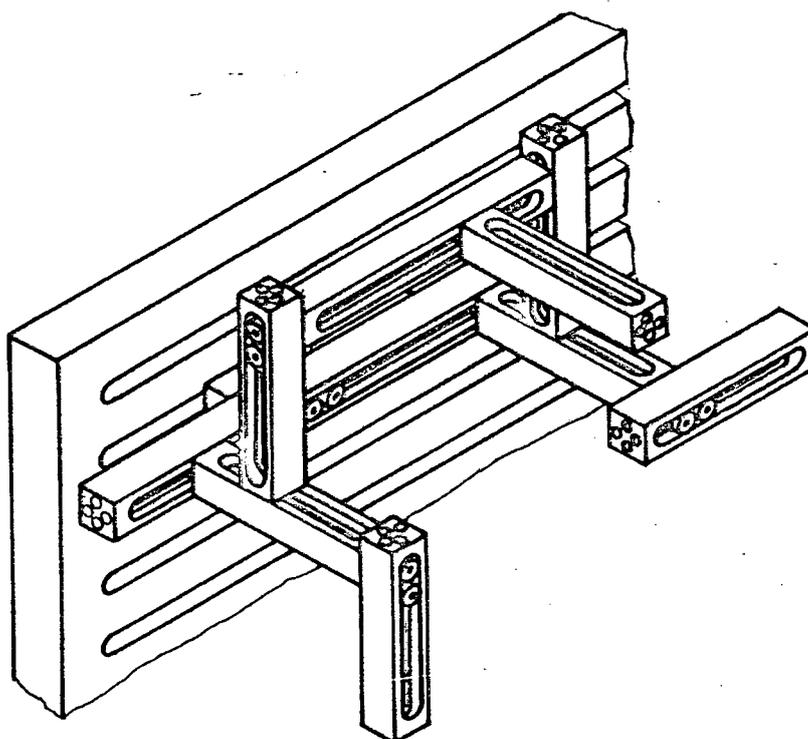


Fig. 4.25 - Configurações de montagem das hastes suporte aplicáveis à sustentação de arcos de medição e suportes de transdutores.

Outros elementos de suporte são as hastes para alojamento e fixação dos transdutores em arcos de medição ou em outras hastes suporte na posição desejada para medição.

Estas hastes, devem ser montadas de forma a se obter rigidez suficiente para garantir uma posição estável e coaxial dos TD e em relação ao diâmetro a ser controlado. (princípio de ABBE).

A fixação dos TD é realizada por emperramento, ou seja, por aperto que restringe o diâmetro de fixação evitando deformações pontuais que podem afetar sua funcionalidade (fig. 4.26).

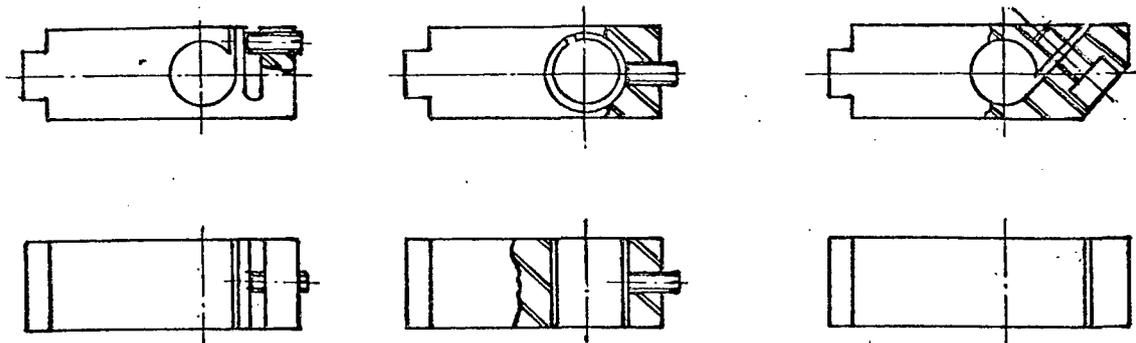


Fig. 4.26 - Tipos de fixação dos transdutores nos suportes [75].

Como resultado, estão esboçados na fig. 4.27, os elementos dos grupos funcionais do conjunto modular projetado.

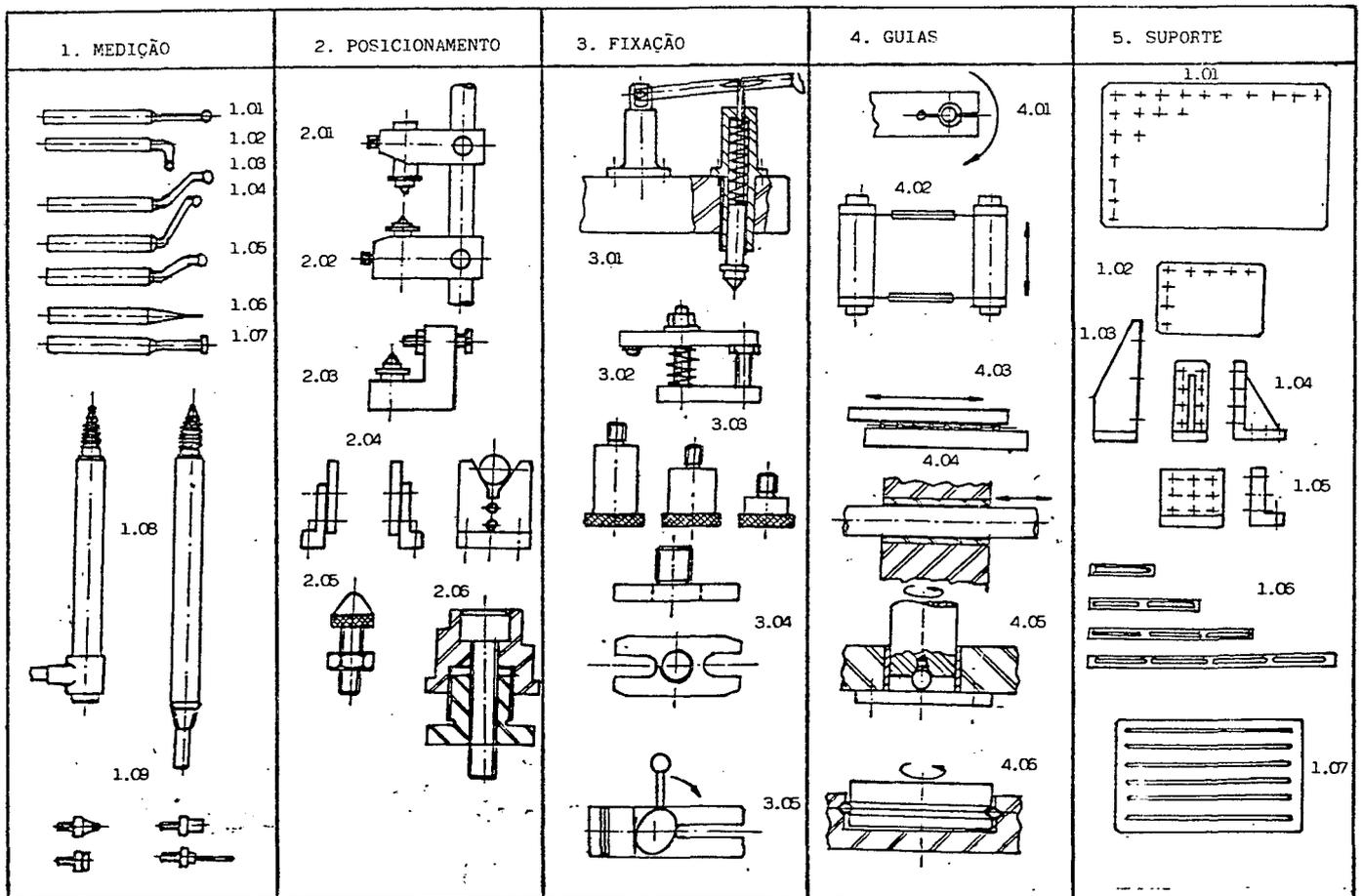


Fig. 4.27 - Elementos do conjunto modular [75].

4.5.2 Configuração de montagem dos dispositivos de medição

Com a definição dos elementos modulares, pode-se então elaborar e esboçar a configuração do protótipo para controle de peças cilíndricas e prismáticas.

Para posicionamento de peças cilíndricas longas (eixos), adotou-se a posição vertical, devido às seguintes vantagens:

- dispensa a utilização de prismas de pré-posicionamento;
- melhora a visibilidade e acesso para posicionamento e fixação dos elementos de medição;
- a massa da peça atua de maneira a favorecer a estabilidade e rigidez do dispositivo.

Um esquema geral das peças componentes do conjunto, com suas possibilidades de montagem e interrelacionamento a partir da placa base pode ser observada na fig 4.28.

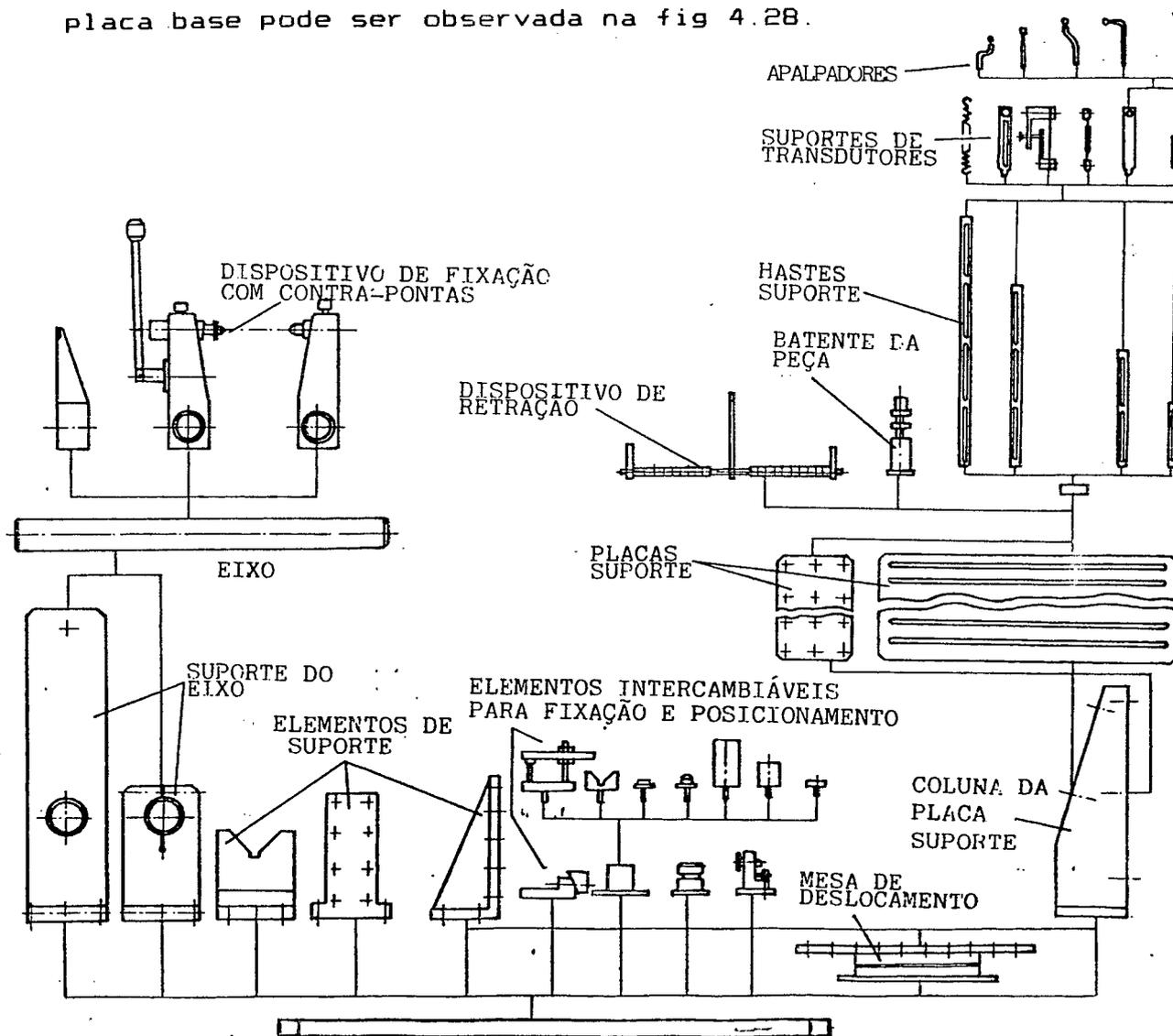


Fig. 4.28 - Esquema geral dos elementos componentes do conjunto modular desenvolvido [75].

Na fig. 4.29, pode-se observar o dispositivo para medição de peças cilíndricas em uma perspectiva isométrica.

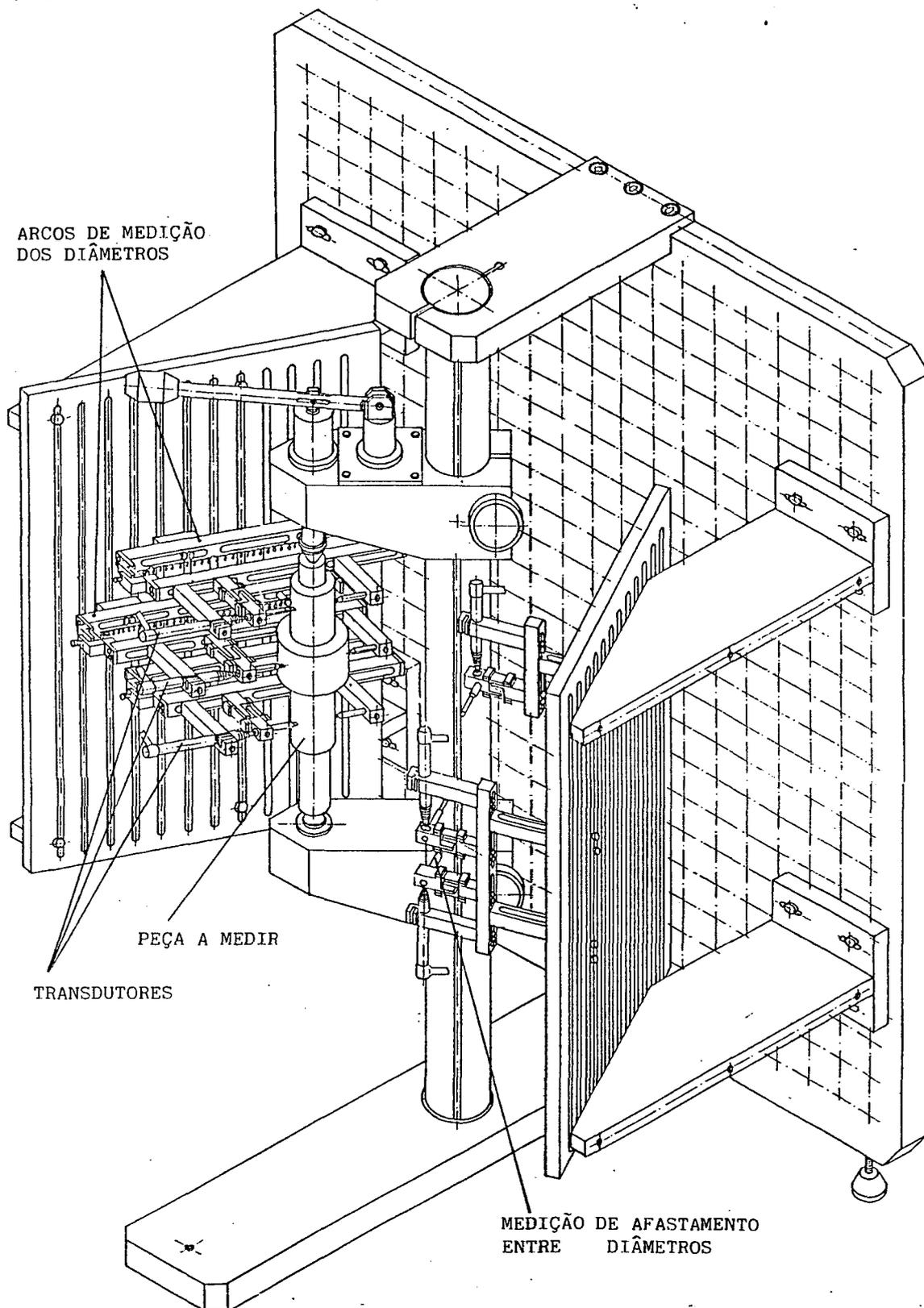


Fig. 4.29 - Dispositivo para medição de peças cilíndricas do conjunto modular [75].

Os elementos de medição estão dispostos sobre duas placas inclinadas, uma de cada lado do eixo de posicionamento do contrapontas. A placa a esquerda é responsável pelo controle dos diâmetros da peça, enquanto que a outra a direita, é utilizada para medição do afastamentos entre diâmetros (medições axiais).

Assim, o eixo é controlado em dois estágios de medição independentes, simplificando a montagem e o processamento dos dados da medição.

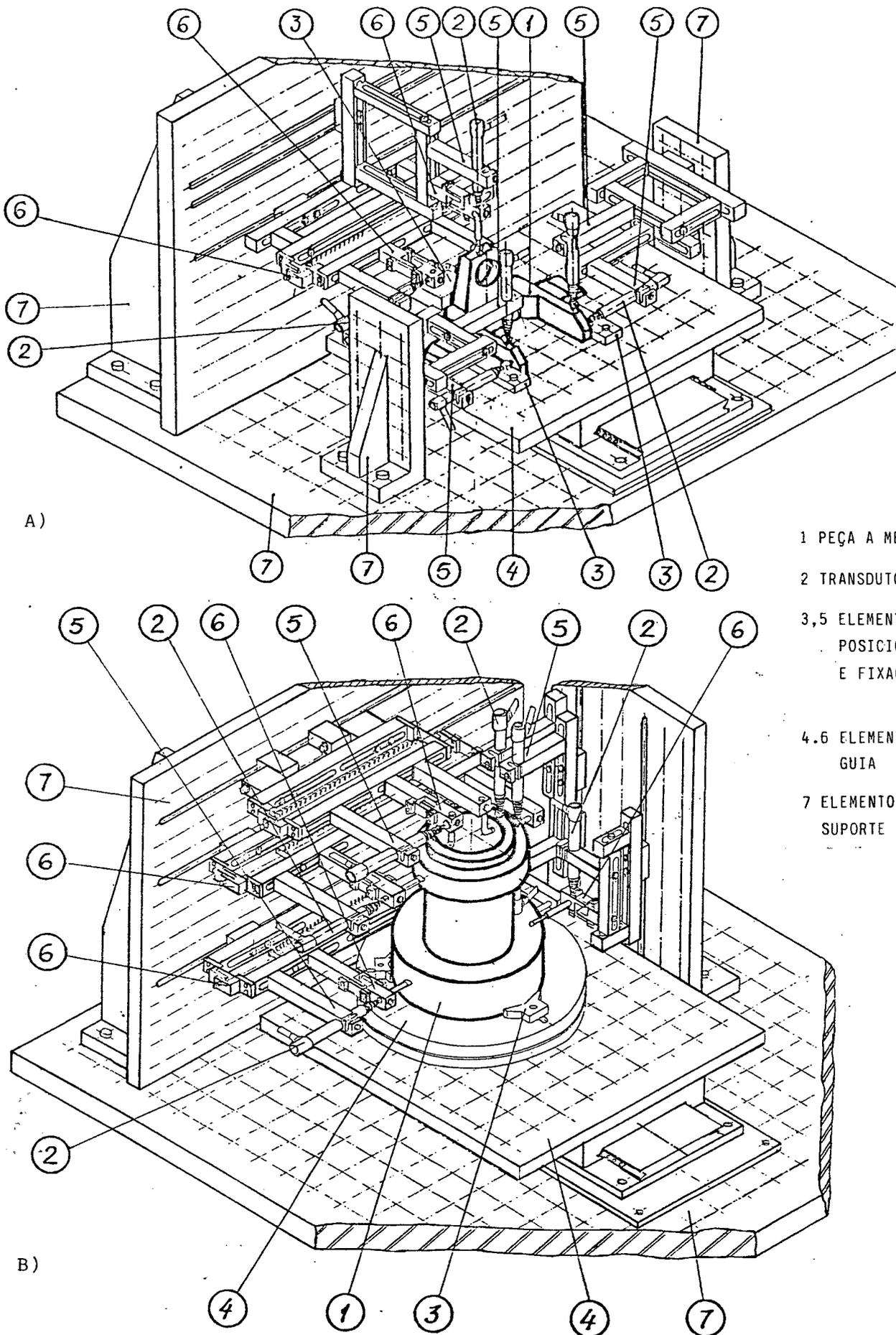
Os arcos de medição podem ser posicionados e ajustados sobre a superfície das placas, fixados por parafusos M6 nos rasgos oblongos correspondentes.

Para medição de peças prismáticas ou de geometria irregular, coloca-se a placa base na posição horizontal e a placa de sustentação dos elementos de medição na posição vertical (fig. 4.30), utilizando os mesmos suportes. Desta forma, a peça a medir é disposta sobre uma mesa de deslocamento, onde após ser posicionada e fixada, é movimentada até a posição de medição.

4.6 EXPERIMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

A experimentação teve como objetivo analisar e avaliar o desempenho metrológico e operacional, segundo uma calibração de um Dm montado para medição de eixos, a partir do CMD desenvolvido. Através da experimentação, pode-se identificar as principais fontes de erro e aspectos a serem melhorados no projeto do conjunto protótipo.

Primeiramente, é realizada uma análise teórica das principais fontes de erro do dispositivo montado, sendo então descritos os ensaios realizados para determinação dos erros de medição e analisados os resultados.



1 PEÇA A MEDIR

2 TRANSDUTORES

3,5 ELEMENTOS DE POSICIONAMENTO E FIXAÇÃO

4,6 ELEMENTOS DE GUIA

7 ELEMENTOS DE SUPORTE

Fig. 4.30 - Exemplos de dispositivos modulares [75]

A) dispositivo para medição de peça prismática;

B) dispositivo para medição de peça cilíndrica com furo.

4.6.1 Análise teórica dos erros do protótipo laboratorial

Uma análise prévia das fontes de erro presentes, indicam que as principais advêm da construção mecânica do dispositivo, sendo que os demais erros provenientes do sistema de medição, do operador, etc., podem ser considerados à princípio desprezáveis.

Assim, os principais pontos críticos que podem provocar erros de medição estão expostos na fig. 4.31.

4.6.2 Descrição do Ensaio

Para ensaiar o protótipo, realizou-se a montagem de dois arcos de medição, com configurações diferentes, para medição de diâmetros do lado passa (P) e não passa (NP) de um calibrador tampão.

A figura 4.32, mostra a montagem experimental, os arcos de medição nº 1 e nº 2 e o calibrador tampão com os pontos de medição.

O experimento foi realizado em um ambiente com condições estáveis de temperatura e isento de vibrações.

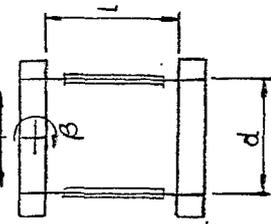
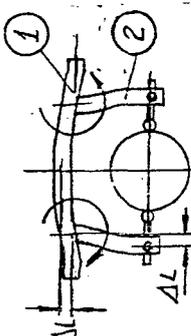
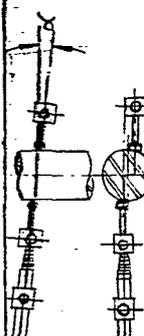
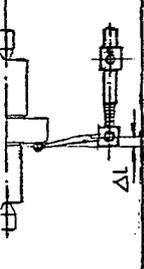
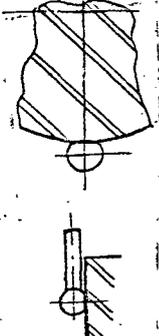
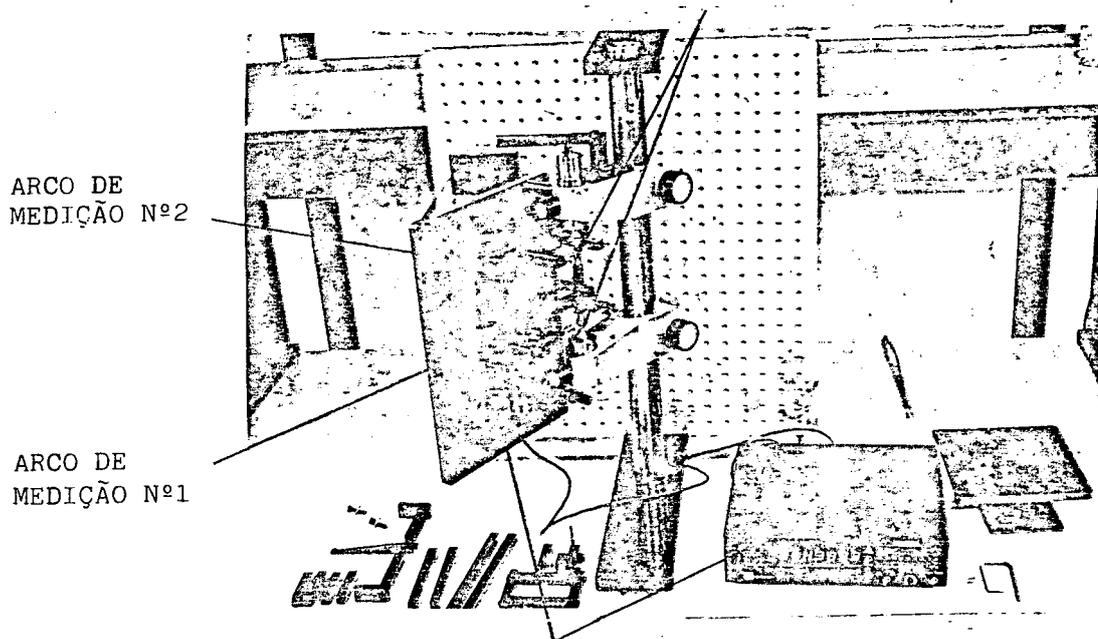
FONTES DE ERRO DO PROTÓTIPO DO DISPOSITIVO MODULAR DE MEDIÇÃO					
Nº	DENOMINAÇÃO DA FONTE DE ERRO	DESCRIÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS	REPRESENTAÇÃO	GRANDEZA DO ERRO	AVALIAÇÃO
1	Desvio nas guias de deslocamento dos apalpaadores e medidores	<ul style="list-style-type: none"> rigidez torsional e transversal das guias de molas laminares paralelas para suportar a massa dos transdutores apalpaadores, etc. engaste das molas laminares garantia das dimensões l e d da guia de molas ortogonalidade de montagem das guias de molas para eliminar deflexões parasitas 		Para $l = 20 \text{ mm}$ $\Delta d = 0,5 \text{ mm}$ $d = 20 \text{ mm}$ $\Delta l = 1 \text{ mm}$ $\Delta d = 17 \mu$ $\Delta l = 3 \mu$	São desprezíveis mas devem ser verificados mediante ensaios
2	Deformação das hastes, suporte e apalpaadores	<ul style="list-style-type: none"> rigidez à flexão e aos momentos impostos pela força de medição 		haste 1 o/ 4 rasgos $F=3N \Delta l=1mm$ haste 2 suporte dos apalpaadores $F=3N \Delta l=2mm$ haste 1 com rasgo $F=3N \Delta l=5 \mu m$ haste sem rasgo $F=3N \Delta l=1 \mu m$	Podem ser desconSIDERADOS pois as deformações permanecem constantes após a zeragem dos medidores
3	Desvios de posicionamento dos suportes de medidores e apalpaadores	<ul style="list-style-type: none"> inclinacão dos apalpaadores em relação aos parâmetros devido a problemas de fabricação ou montagem dos elementos de suporte 		$\alpha = 10^\circ$ (inclinacão) $\delta = 0,50mm$ $\delta = 7 \mu m$	NÃO SÃO desprezíveis Deven ser comprovados na prática
4	Deformação dos apalpaadores	<ul style="list-style-type: none"> medição de afastamento produz um momento de flexão devido à força de medição 		Para $F=1N \Delta l=10 \mu m$ Para $F=3N \Delta l=27 \mu m$	Devido à medição diferencial e a força de medição constante este erro pode ser desconSIDERADO em função da zeragem
5	Deformação dos pontos de medição (achatamento)	<ul style="list-style-type: none"> força de medição provoca achatamentos nas superfícies de contato dos apalpaadores provocando retroação nos valores de medição 		$F=3N$ superfícies de contato cilíndricas $\delta = 0,4 \text{ mm}$ / superfícies de contato esférica/cilíndrica $\delta = 0,6 \mu m$	Pode ser considerado desprezível

Fig. 4.31 - Tabela das fontes de erro do dispositivo modular protótipo.

PONTOS DE MEDIÇÃO NO
CALIBRADOR TAMPÃO



TRANSDUTOR ELETRO-ÓPTICO E UTS

Fig. 4.32 - Montagem experimental do protótipo e instrumentação utilizada

Para realização do ensaio de calibração do dispositivo, foi necessário determinar as dimensões dos diâmetros P e NP por um sistema de medição padrão (SMP). Desta forma, determinou-se as diferenças dos diâmetros P e NP com uma I_m de $\pm 0,6 \mu m$, adotando-se como SMP o metroscópio horizontal do Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMETRO - máquina de ABBE RL-530) (Fig. 4.33).

LABMETRO	PLANILHA DE LEITURAS		EXECUTOR: LJS		ATIVIDADE: PL-094		FOLHA: 01		
	DATA: 13/09/98		HORARIO INICIO: 14:30 H		HORARIO TERMINO: 17:40 H				
SISTEMA DE MEDIÇÃO A CALIBRAR (SMC) CONJUNTO MODULAR-PROTÓTIPO PARA MEDIÇÃO DE DIÂMETROS			SISTEMA DE MEDIÇÃO PADRÃO (SMP) METROSCÓPIO HORIZONTAL (MÁQUINA DE ABBE) RL - 530						
CONDIÇÕES DE ENSAIO TEMPERATURA AMBIENTE: 20 \pm 1°C			UMIDADE RELATIVA: 65 \pm 5%		TENSÃO DA REDE: 222 \pm 2V				
PONTOS	CICLOS (mm)	1	2	3	4	5	N	DM (mm)	DIFERENÇA EM MÓDULO (mm)
CALIBRADOR	P	10,4929	10,4928	10,4933	10,4938	10,4938	10,493	$\pm 0,6$	-
	NP	10,6786	10,6783	10,6785	10,6783	10,6787	10,678	$\pm 0,5$	0,185
OBSERVAÇÕES: Força de medição = 1N									

Fig. 4.33 - Valores de medição obtidos pelo sistema de medição padrão.

Ajustados os transdutores pelo diâmetro P, mede-se o diâmetro NP, que é comparado com a diferença mais provável dos diâmetros obtido pelo SMP, determinando assim os erros de medição do dispositivo através de uma medição diferencial.

Foram realizados dez ciclos de medição de cada diâmetro do calibrador tampão, com cada um dos dois arcos de medição. Cada ciclo compreendia a colocação do calibrador tampão, o ajuste do zero do transdutor em um diâmetro P, a retirada do calibrador para inversão, a recolocação para medição do diâmetro NP, e anotação do valor de medição.

Com o objetivo de se avaliar o comportamento do dispositivo modular de uma forma mais global, adotou-se dois corpos de prova cilíndricos com vários diâmetros diferentes (eixos escalonados). O ciclo de medição compreendeu a colocação de um corpo de prova (eixo nº 1), o ajuste do zero do transdutor, a retirada para colocação do outro corpo de prova para medição e anotação dos valores obtidos.

Para cada diâmetro A, B, C, D, E e F e o afastamento Y, foram realizados 10 ciclos de medição com cada arco de medição.

Assim, pôde-se avaliar os resultados de medição em diferentes posições dos dois arcos de medição, para diferentes diâmetros de medição, simulando um caso real de utilização do dispositivo.

A fig. 4.34, apresenta o protótipo e as dimensões de medição dos corpos de prova.

ARCO PARA MEDIÇÃO DE DIÂMETRO

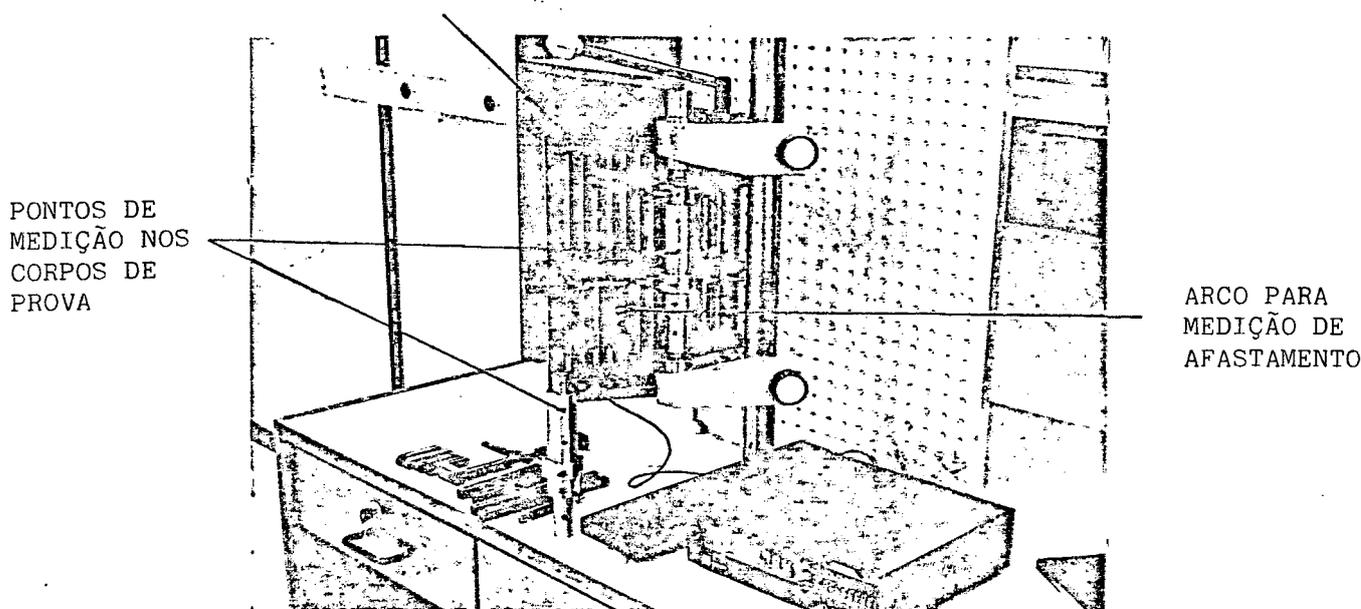


Fig. 4.34 - Montagem experimental do protótipo para medição dos eixos escalonados.

Os valores obtidos na medição dos diâmetros e afastamento dos dois corpos de prova pelo SMP, está mostrado na fig. 4.35.

LABMETRO		PLAVILHA DE LEITURAS	EXECUTOR: LJS	ATIVIDADE: PL-094	FOLHA: 01				
		DATA: 13/09/98	HORARIO INICIO: 14:30 H		HORARIO TERMINO: 17:40 H				
SISTEMA DE MEDIÇÃO A CALIBRAR (SMC) CONJUNTO MODULAR-PROTÓTIPO PARA MEDIÇÃO DE DIÂMETROS			SISTEMA DE MEDIÇÃO PADRÃO: (SMP) METROSCÓPIO HORIZONTAL (MÁQUINA DE ABBE) RL - 538						
CONDIÇÕES DE ENSAIO		UNIDADE RELATIVA: 65 +/- 5%			TENSÃO DA REDE: 222 +/- 2V				
TEMPERATURA AMBIENTE: 20 +/- 10C									
PONTOS	CICLOS (nn)	1	2	3	4	5	K	BH (mm)	DIFERENÇA EM MÓDULO (mm)
	EIXO Nº 1 DIÂMETROS	A	20,0324	20,0318	20,0320	20,0330	20,0325	20,032	+/- 1
B		35,8784	35,8800	35,8795	35,8785	35,8789	35,879	+/- 1	-
C		50,1476	50,1472	50,1480	50,1478	50,1475	50,147	+/- 1	-
D		37,9826	37,9820	37,9834	37,9834	37,9827	37,982	+/- 1	-
E		25,1517	25,1707	25,1695	25,1720	25,1705	25,171	+/- 2	-
F		25,1870	25,1866	15,1862	25,1850	25,2860	25,186	+/- 2	-
AFAST.		V	19,7543	19,7538	19,7535	19,7530	19,7552	19,754	+/- 2
EIXO Nº 2 DIÂMETROS	A	20,3694	20,3690	20,3686	20,3696	20,3687	20,369	+/- 1	0,337
	B	36,2970	36,2960	36,2966	36,2968	36,2973	36,294	+/- 1	0,418
	C	50,2906	50,2901	50,2890	50,2894	50,2888	50,289	+/- 2	0,142
	D	38,1803	38,1792	38,1788	38,1783	38,1789	38,179	+/- 2	0,197
	E	24,9762	24,9742	24,9756	24,9759	24,9744	24,975	+/- 2	0,196
	F	24,9864	24,9860	24,9872	24,9856	24,9854	24,986	+/- 2	0,200
	AFAST.	V	20,0589	20,0575	20,0572	20,0584	20,0582	20,058	+/- 2

..OBSERVAÇÕES: Força de medição = 1N

Fig. 4.35 - Valores de medição dos diâmetros e afastamento dos corpos de prova pelo sistema de medição padrão.

4.6.3 Execução do Ensaio

Para experimentação do protótipo, foram elaboradas planilhas, para anotação dos valores de medição e informações relevantes, com o objetivo de garantir uma coleta racional dos dados dos ensaios.

A figura 4.36, mostra as leituras e informações obtidas na medição do calibrador tampão e dos eixos escalonados com arco de medição nº 1.

A fig. 4.37, mostra as leituras obtidas dos mesmos diâmetros com o arco de medição nº 2 e mais as leituras da medição do afastamento.

4.6.4 Determinação dos Erros de Medição

Após a obtenção dos valores de medição pela calibração, são processados os dados para determinação dos erros sistemáticos e aleatórios de medição. As referências [55,65 e 66] e o item 3.3.2 deste trabalho, apresentam as equações e a seqüência do cálculo necessário para determinação da incerteza de medição.

Os resultados da média das medidas (MM), do erro sistemático (Es), da dispersão de medição com 95% de probabilidade estatística (DM (95)) e da incerteza de medição (Im) para cada diâmetro medido no dispositivo pelos dois arcos de medição, é apresentado na Fig. 4.38.

LABMETRO		PLANILHA DE LEITURAS			EXECUTOR: MWP		ATIVIDADE: PL-094			FOLHA: 01	
		DATA: 17/09/90			HORARIO INICIO: 13:30 H			HORARIO TERMINO: 16:40 H			
SISTEMA DE MEDIÇÃO A CALIBRAR (SMC) CONJUNTO MODULAR-PROTÓTIPO MEDIÇÃO DE DIÂMETROS COM ARCO DE MEDIÇÃO Nº 1				SISTEMA DE MEDIÇÃO PADRÃO (SMP) MEDIDOR INCREMENTAL DIGITAL (MT-10) Dr. JOHANNES HEIDEHAIN COM UNIDADE DE TRATAMENTO DE SINAL (RL- 0418)							
CONDIÇÕES DE ENSAIO TEMPERATURA AMBIENTE: 25 +/- 1°C				UNIDADE RELATIVA: 75 +/- 5%				TENSÃO DE REDE: 222 +/- 2V			
PONTOS	CICLOS (nn)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DIFERENÇA ENTRE OS DIÂMETROS DOS EIXOS Nº 1 e Nº 2	A	0,3321	0,3315	0,3321	0,3306	0,3316	0,3320	0,3320	0,3323	0,3315	0,3314
	B	0,4168	0,4144	0,4134	0,4154	0,4138	0,4158	0,4153	0,4142	0,4140	0,4153
	C	0,1421	0,1420	0,1416	0,1410	0,1416	0,1413	0,1411	0,1409	0,1423	0,1414
	D	0,1994	0,1997	0,1983	0,1982	0,1982	0,1975	0,1979	0,1974	0,1978	0,1974
	E	0,1918	0,1925	0,1936	0,1932	0,1928	0,1927	0,1938	0,1926	0,1934	0,1927
	F	0,1963	0,1974	0,1968	0,1959	0,1975	0,1964	0,1965	0,1978	0,1956	0,1972
X=P-NP	X	0,1850	0,1842	0,1842	0,1848	0,1840	0,1847	0,1840	0,1837	0,1847	0,1834
OBSERVAÇÕES		Força de medição = 3 N									

Fig. 4.36 - Valores de medição obtidos com o arco de medição nº 1.

LABMETRO		PLANILHA DE LEITURAS			EXECUTOR: MWP		ATIVIDADE: PL-094			FOLHA: 01	
		DATA: 18/09/90			HORARIO INICIO: 09:20 H			HORARIO TERMINO: 12:10 H			
SISTEMA DE MEDIÇÃO A CALIBRAR (SMC) CONJUNTO MODULAR-PROTÓTIPO MEDIÇÃO DE DIÂMETROS COM ARCO DE MEDIÇÃO Nº 2 E ARCO DE MEDIÇÃO DE AFASTAMENTO				SISTEMA DE MEDIÇÃO PADRÃO (SMP) MEDIDOR INCREMENTAL DIGITAL (MT-10) Dr. JOHANNES HEIDEHAIN COM UNIDADE DE TRATAMENTO DE SINAL (RL- 0418)							
CONDIÇÕES DE ENSAIO TEMPERATURA AMBIENTE: 22 +/- 1°C				UNIDADE RELATIVA: 75 +/- 5%				TENSÃO DE REDE: 222 +/- 2V			
PONTOS	CICLOS (nn)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diferença entre os diâmetros dos eixos nº 1 e nº 2	A	0,3365	0,3347	0,3353	0,3358	0,3351	0,3352	0,3354	0,3354	0,3351	0,3354
	B	0,4211	0,4209	0,4210	0,4210	0,4206	0,4217	0,4213	0,4206	0,4208	0,4210
	C	0,1426	0,1420	0,1421	0,1413	0,1424	0,1418	0,1422	0,1417	0,1420	0,1419
	D	0,2020	0,2020	0,2018	0,2018	0,2017	0,2019	0,2020	0,2017	0,2017	0,2025
	E	0,1915	0,1917	0,1914	0,1921	0,1915	0,1913	0,1921	0,1914	0,1912	0,1910
	F	0,1978	0,1980	0,1977	0,1977	0,1974	0,1977	0,1977	0,1977	0,1975	0,1981
X=P-NP	X	0,1860	0,1862	0,1867	0,1856	0,1857	0,1858	0,1863	0,1860	0,1860	0,1863
AFASTAMENTO	Y	0,3062	0,3040	0,3047	0,3049	0,3041	0,3054	0,3051	0,3039	0,3055	0,3036
OBSERVAÇÕES		Força de medição = 2 N									

Fig. 4.37 - Valores de medição obtidos com o arco de medição nº 2.

DIÂMETROS (mm)	MM (mm)	VCC (mm)	Es (mm)	DM(95) (mm)	$I_m = +/- (DM/+Es/)$ (mm)	
ARCO DE MEDICAO N 1	A	0.332	0.337	-0.005	+/-0.001	+/- 0.006
	B	0.415	0.418	-0.003	+/-0.002	+/- 0.005
	C	0.141	0.142	-0.001	+/-0.001	+/- 0.002
	D	0.198	0.197	+0.001	+/-0.002	+/- 0.003
	E	0.193	0.196	-0.003	+/-0.001	+/- 0.004
	F	0.197	0.200	-0.003	+/-0.002	+/- 0.005
	X	0.184	0.185	-0/001	+/-0.001	+/- 0.002
ARCO DE MEDICAO N 2	A	0.335	0.337	-0.002	+/-0.001	+/- 0.003
	B	0.421	0.418	+0.003	+/-0.001	+/- 0.004
	C	0.142	0.142	0.000	+/-0.002	+/- 0.002
	D	0.202	0.197	+0.005	+/-0.001	+/- 0.006
	E	0.191	0.196	-0.005	+/-0.001	+/- 0.006
	F	0.198	0.200	-0.002	+/-0.001	+/- 0.003
	X	0.186	0.185	+0.001	+/-0.001	+/- 0.002
AFASTAM.	Y	0.305	0.304	-0:001	+/-0.002	+/- 0.003

Fig. 4.38 - Tabela dos resultados dos ensaios realizados.

Mediante a tabela, pode-se observar que o maior valor de erro sistemático é da ordem de +/- 5 μm em cada um dos arcos de medição de diâmetros. A maior dispersão foi de +/- 2 μm na medição dos diâmetros B, D e F do arco nº 1. A incerteza de medição máxima foi de +/- 6 μm , obtida nos dois arcos de medição.

Na medição do diâmetro do calibrador tampão a DM (95) foi de +/- 1 μm e a I_m de +/- 2 μm . Para medição do afastamento obteve-se uma DM (95) de +/- 2 μm e uma I_m de +/- 3 μm .

4.6.5 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos na calibração, comprovaram o bom desempenho metrológico do protótipo. As causas mais prováveis dos erros sistemáticos são as deficiências de fabricação ou montagem das peças do dispositivo que ocasionaram inclinações dos apalpadores e transdutores em relação aos diâmetros medidos.

A diferença dos erros sistemáticos obtidos na medição dos diâmetros dos dois eixos escalonados em comparação com o calibrador tampão, foi que os pontos de contato para medição na

máquina de ABBE, não foram exatamente os mesmos na medição com o dispositivo, o que provocou erros de medição devido a maior rugosidade e aos erros de forma dos eixos escalonados em comparação com as superfícies polidas do calibrador tampão.

Os desvios de deslocamento das guias de molas laminares paralelas, foram também uma fonte de erros. As deficiências nos engastes das molas e a própria fabricação provocou tensões e deformações, em função do deslocamento das mesmas, ocasionando erros de medição.

Os problemas ficaram mais evidentes no arco de medição nº 1, devido a distância e a massa suportada pelas molas laminares ser bem maior que o arco de medição nº 2, provocando maior influência à dispersão dos resultados da medição.

Pode-se afirmar com base nos resultados, que para a medição de peças cilíndricas retificadas, o dispositivo possui uma Im de $\pm 2 \mu\text{m}$.

A Im de outros dispositivos construídos a partir do conjunto modular, vai depender principalmente de:

- ajuste da posição dos transdutores em relação ao padrão de medição;
- rigidez das guias e suporte dos arcos de medição e elementos do dispositivo;
- estabilidade, rigidez de fixação e precisão no posicionamento da peça a medir no dispositivo;
- atendimento ao princípio de ABBE;
- forma da ponta de medição para possibilitar contato pontual com a superfície de medição da peça;
- Im do instrumento de medição utilizado (transdutor, UTS e indicador).

De uma forma geral, o comportamento metrológico e operacional foi muito bom, visto que este protótipo apresentou algumas deficiências de fabricação, que podem ser reduzidas, utilizando-se para isto de um ferramental adequado para obtenção de peças com estreitas tolerâncias geométricas.

4.6.6 Sugestões de Melhorias

Mediante a experimentação do protótipo observou-se alguns aspectos que podem ser modificados e otimizados para concepção de um produto industrializável.

São eles:

- projeto das guias de molas laminares em um módulo mais rígido, com menor número de elementos e com uma melhor qualidade de engaste das molas, garantindo maior versatilidade de montagem e melhor qualidade no deslocamento;
- substituição dos furos oblongos por furos passantes com ajustes, simplificando a fabricação, sem perda da flexibilidade;
- acabamento superficial retificado com estreitas tolerâncias geométricas (planicidade, paralelismo, etc) das hastes suporte;
- utilização de um sistema combinado de rosca e furo de ajuste com pino, na matriz de furos da placa base e nos elementos de suporte;
- elaboração de elementos adicionais para suporte e posicionamento a serem utilizados em tarefas de medição de peças de diferentes geometrias.

5 PROJETO AUXILIADO POR COMPUTADOR DE DISPOSITIVOS MODULARES DE MEDIÇÃO

Em razão do espectro limitado de elementos de construção de um conjunto modular, da padronização das dimensões e forma de união dos elementos, e da existência destes pontos de união pré-definidos nos elementos de suporte (matriz de furos), a aplicação do CAD é bastante adequada para auxiliar o projeto da configuração de dispositivos modulares de medição.

O planejamento e projeto de Dm mediante o emprego de uma estação de CAD, é justificável ainda devido aos seguintes benefícios:

- elementos modulares podem ser armazenados num banco de dados com a especificação completa da geometria e dados técnicos;
- projeto é realizado em curto espaço de tempo, através do emprego de grupos de construção de freqüentes composições dos elementos modulares;
- modificações nos dispositivos, baseados nos requisitos da tarefa de medição são simples de se realizar no computador;
- projeto pode ser adaptado através de elementos adicionais específicos para as necessidades da tarefa de medição;
- racionalização na repetição da construção de dispositivos, com base na documentação elaborada na forma de planos de montagem com representação espacial e desenhos cotados;
- desenvolvimento da construção do dispositivo somente com o desenho da peça sem necessidade de peça protótipo;

Assim, de maneira geral, o CAD possibilita racionalizar ainda mais, o desenvolvimento dos Dm, além de proporcionar um arquivo de dados e documentação de simples elaboração e manipulação.

Neste trabalho, com o fim de elevar a velocidade no projeto de Dm, baseado nas vantagens descritas, foi implementado em uma estação de CAD uma biblioteca de elementos bidimensionais correspondentes aos vários elementos que compõe o CMD desenvolvido.

A biblioteca foi desenvolvida para realizar a construção do dispositivo da forma mais simples e racional ao projetista, sendo que o mesmo deve possuir os conhecimentos básicos de operação dos comandos do AUTOCAD* para manipulação dos desenhos, arquivamento e impressão pelo traçador gráfico.

5.1 CONFIGURAÇÃO DA BIBLIOTECA DE ELEMENTOS

A primeira atividade realizada na formulação da biblioteca foi o armazenamento de desenhos bidimensionais simplificados (ícones) de cada elemento no computador.

Os desenhos simplificados correspondem aos desenhos técnicos das peças em escala 1:1, mas isentos de cortes, sinais de acabamento, etc., nas vistas frontal, superior e lateral esquerda.

A elaboração da biblioteca foi realizada baseado em um sistema de menu de ícones. Os menus de ícones são particularmente simples, fáceis de serem utilizados e compreendidos, razão pela qual foram adotados na implementação da biblioteca de elementos na estação de CAD.

A seleção das peças e das vistas desejadas é realizada a partir de um menu principal, dando origem à submenus com opções para chegar à inserção da vista desejada do elemento [76].

A estruturação do menu principal corresponde aos grupos de elementos funcionais do conjunto modular (elementos de medição, de suporte, etc.). Dentro de cada grupo, é apresentado um menu com os diversos tipos de elementos. Com a seleção do elemento apresenta-se um outro menu com as diferentes dimensões

* AUTOCAD é marca registrada da Autodesk Inc.-USA.

disponíveis. Selecionando-se a dimensão do elemento, tem-se ainda outro menu com as principais vistas do elemento desejado. Na sequência, são solicitadas as coordenadas do ponto de inserção da vista da peça. Através do cursor ou teclado, escolhe-se este ponto e em seguida o ângulo de rotação desejado.

Os menus de ícones são representados através de um grande retângulo com vários retângulos internos (slides), cada qual com um desenho simbólico da peça e um pequeno quadrado à direita, que serve para escolher a opção desejada através do cursor (fig. 5.1).

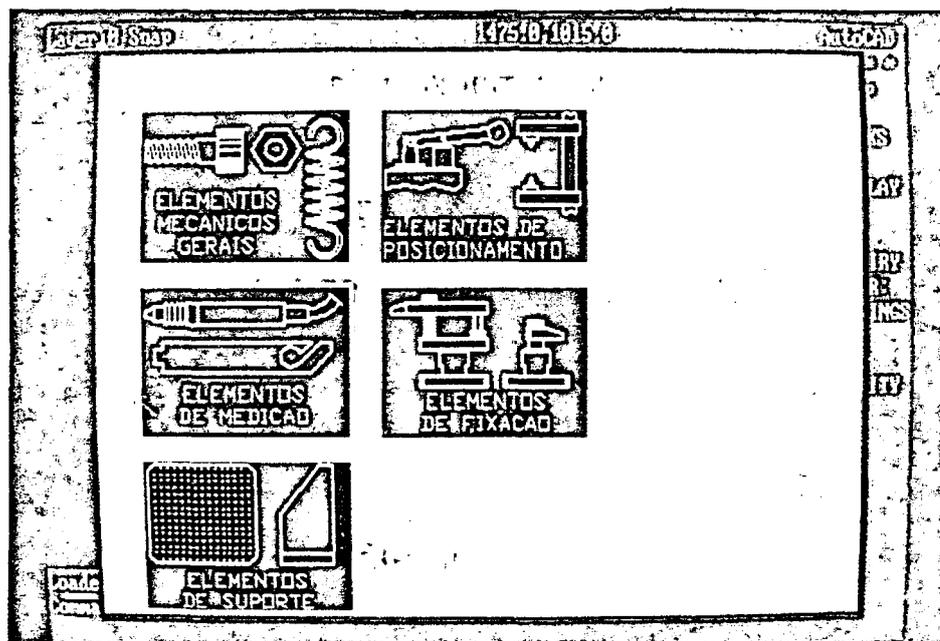


Fig. 5.1 - Menus de ícones da biblioteca de elementos [76].

Em cada menu, foi implementado duas opções para facilitar a procura e seleção dos elementos:

- CANCELA: cancela a chamada ao menu de ícones voltando ao ambiente normal de edição de desenhos;
- MENU ANTERIOR: possibilita ao usuário o retorno ao último menu apresentado, na procura da vista da peça desejada.

Com o objetivo de simplificar ainda mais o trabalho do projetista, foram desenvolvidos grupos de elementos do conjunto, configurando módulos distintos, que freqüentemente são utilizados na construção, como por ex., os arcos de medição de diâmetro ou de afastamento.

Assim, são apresentadas algumas variantes destes módulos no submenu correspondente (fig. 5.2).

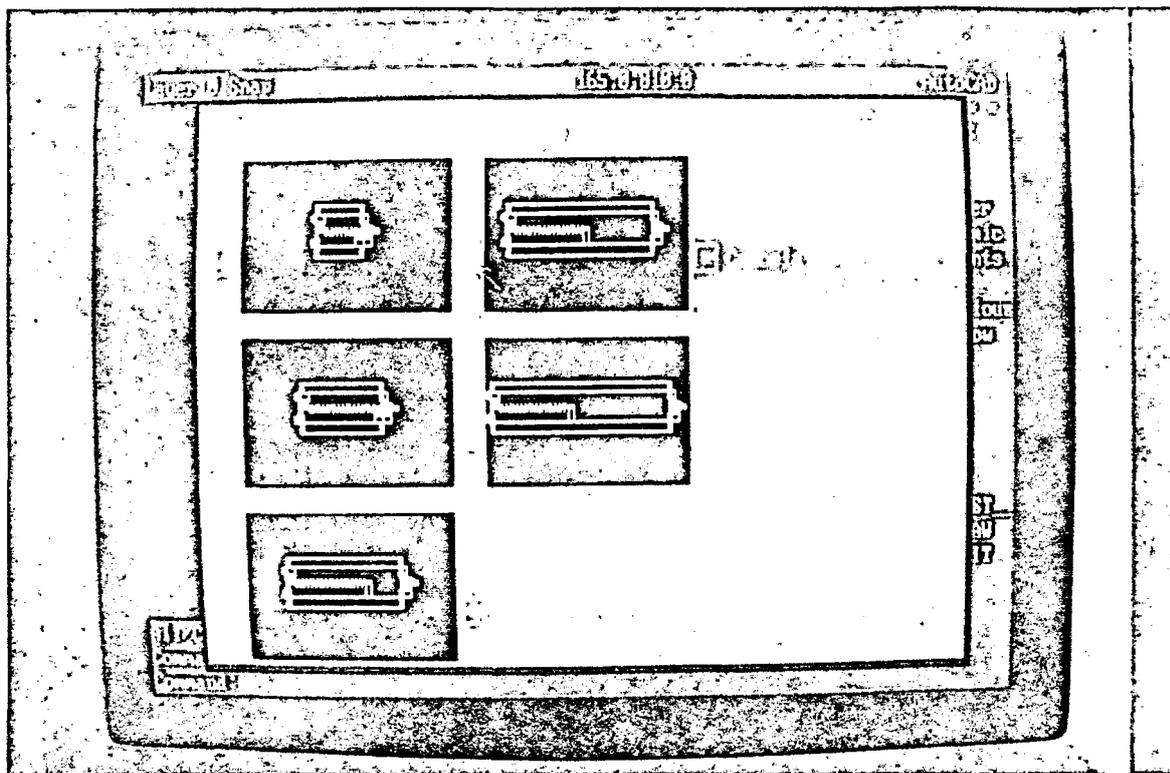


Fig. 5.2 - Exemplo do Menu com os grupos de construção [76].

Cada um destes módulos pode ser selecionado e manipulado separadamente, da mesma forma que os elementos unitários.

Em razão de freqüentes construções semelhantes, foram arquivados no computador, na forma de banco de dados, alguns desenhos de elementos de construção, montados para composição das vistas principais do dispositivo, podendo ser utilizado como exemplo de soluções para outros dispositivos desejados. Desta forma, o projetista ao iniciar o projeto, seleciona primeiramente no banco de dados, uma vista de dispositivo que está mais próxima da solução do problema de medição. Exemplificando, para medição de peças cilíndricas, tem-se as vistas superior, frontal e lateral, com os vários elementos de suporte, de guia, de fixação e de medição já dispostos, proporcionando uma rápida adaptação da construção à geometria e aos parâmetros desejados da peça à medir.

Mediante a "montagem" do dispositivo na tela do computador, pode-se então arquivá-lo no banco de dados ou então imprimir uma cópia mediante uma plotadora.

5.2 ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE DISPOSITIVOS

O projeto da configuração do dispositivo na estação de CAD, subdivide-se basicamente em quatro etapas que envolvem a transferência das vistas da peça a medir, a seleção dos elementos modulares da biblioteca, o posicionamento dos elementos junto a peça a medir para elaboração das vistas do dispositivo e finalmente o arquivamento e impressão dos desenhos.

Na fig. 5.3, estão resumidas as etapas e atividades correspondentes.

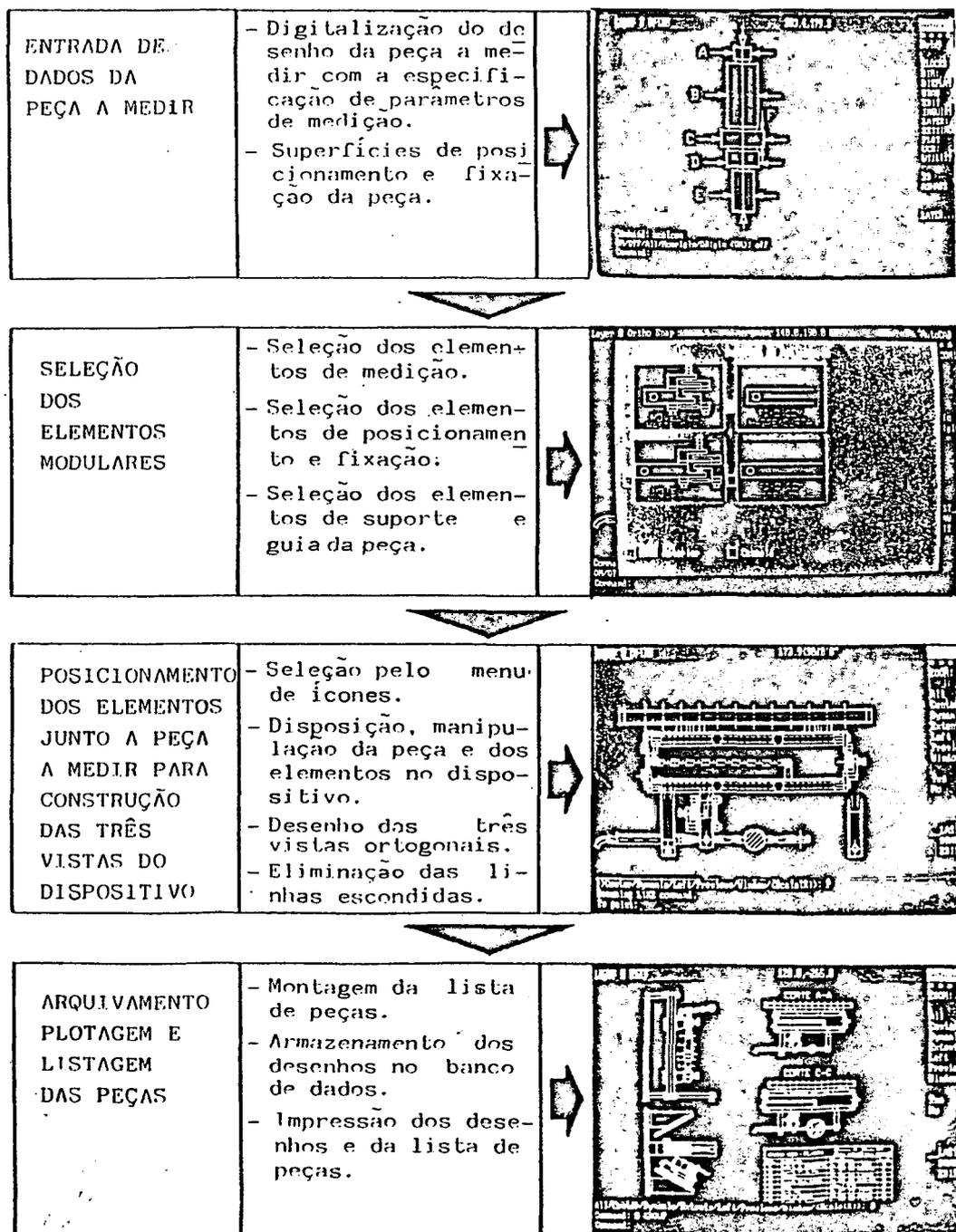


Fig. 5.3 - Seqüência de atividades para projeto de dispositivos modulares mediante a biblioteca de elementos na estação de CAD [76].

A primeira etapa é digitalizar os desenhos das vistas da peça a medir em escala 1:1, a partir do desenho técnico cotado com as especificações de controle dos parâmetros.

As especificações da tarefa de medição devem esclarecer ao projetista quais as superfícies de medição, de posicionamento e fixação.

O projeto do dispositivo é realizado, então, com a chamada do menu principal e a seleção dos elementos funcionais. Primeiramente, são selecionados os elementos de suporte e guia da peça a medir. Conforme a geometria da peça, são selecionados e dispostos os elementos de posicionamento e fixação. Assim, a vista da peça a medir, pode ser deslocada na tela do computador para a posição de fixação. A seguir, são selecionados os elementos de medição e os correspondentes elementos de posicionamento e suporte junto aos parâmetros a serem controlados. O mesmo procedimento é adotado nas demais vistas desejadas para representação do dispositivo. Concluído o projeto, pode-se então eliminar manualmente as linhas escondidas, preencher a lista de peças e arquivar os desenhos.

No banco de dados, estão também armazenados, os desenhos técnicos cotados de cada peça componente do conjunto, com as especificações necessárias (tolerâncias, acabamento superficial, tratamento térmico, etc.)

Os desenhos, bem como a lista de peças, podem ser obtidas a qualquer momento mediante a plotadora. Um exemplo de projeto realizado pode ser observado na fig. 5.4.

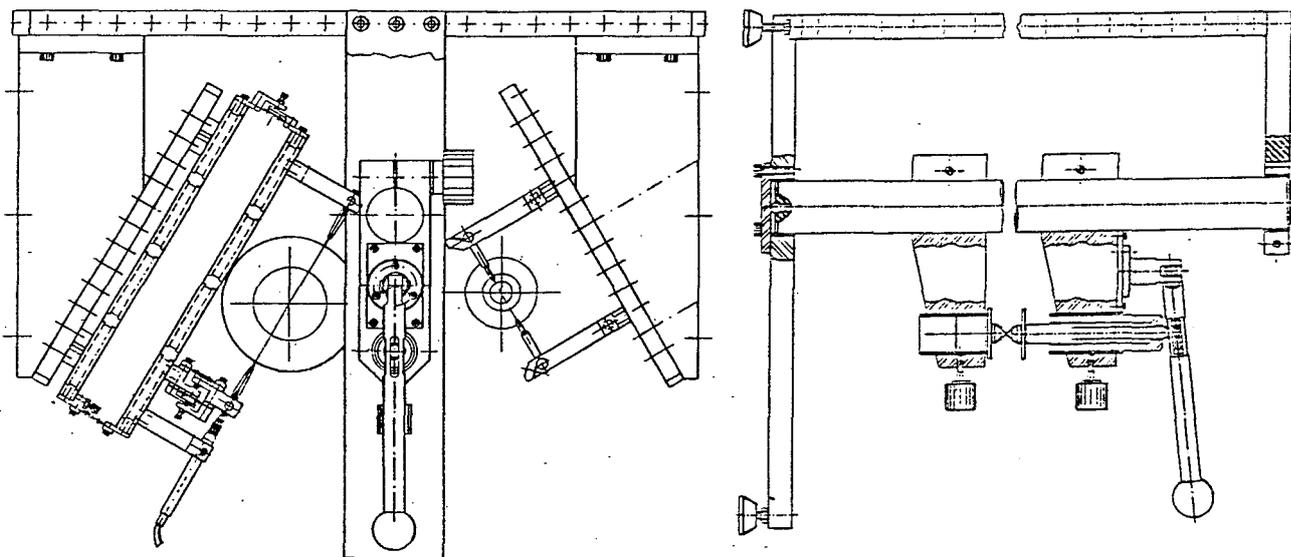


Fig. 5.4 - Exemplo de projeto de dispositivo realizado na estação de CAD [76].

5.3 COMPARAÇÃO COM OUTROS PROGRAMAS DE CAD PARA PROJETO DE DISPOSITIVOS

Os fabricantes de CMD de fixação desenvolveram programas próprios de CAD para auxiliar o projeto. Alguns destes sistemas possibilitam a geração de desenhos em três dimensões (3D), com perspectiva explodida ou até a representação de modelamento sólido com tratamento de imagem [45].

A maioria dos programas desenvolvidos, ainda estão em sistemas 2D, devido a facilidade de aprendizagem e manipulação e pelos menores tempos de resposta do computador. No entanto, a representação bidimensional restringe a visibilidade, devendo-se no mínimo eliminar as linhas escondidas nos desenhos.

O número de usuários de bibliotecas de elementos modulares com representação em 3D, ainda é pequena, devido principalmente à necessidade de qualificação dos projetistas e da grande capacidade do sistema computacional, incorrendo em elevados custos.

As vantagens de utilização de um sistema 3D, estão na possibilidade de simulação da aproximação da peça aos transdutores, a verificação das interferências entre os elementos e a geração automática da lista de peças, com a ordenação de números de identificação para cada elemento sólido representado.

Comparando-se a biblioteca desenvolvida no programa "AUTOCAD Release 10", para construção de dispositivos de medição, com os demais existentes, a mesma apresenta praticamente os mesmos recursos que os sistemas em 2D, mas com a vantagem de selecionar os elementos através de ícones, ao invés de códigos ou nomes que exigem o conhecimento prévio dos elementos.

O objetivo foi configurar a biblioteca, para simplificar o trabalho do projetista para seleção das peças e a manipulação das mesmas, na constituição das vistas do dispositivo, em um sistema de baixo custo para ser absorvido por pequenas a médias empresas.

Futuramente, pode-se ainda aperfeiçoar o sistema, com ampliação da biblioteca e evoluir para geração de desenhos tridimensionais dos dispositivos.

5.4 INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

Com o objetivo de determinar a economia de tempo na elaboração de um projeto de Dm com a biblioteca de elementos na estação de CAD em comparação ao projeto convencional na prancheta com tecnógrafo, foi realizado um teste prático.

O teste consistiu em desenhar um dispositivo para medição de um eixo em cinco diâmetros e três intervalos entre diâmetros, em suas vistas principais juntamente com a listagem das peças e especificações.

O tempo total do projeto com estação de CAD foi de 14h em comparação com o tempo de 20h, correspondente ao projeto manual, alcançando-se uma redução de 30% no tempo global de projeto. Este valor também é confirmado na literatura [45].

Um exemplo da redução do tempo de desenvolvimento de um Dm em comparação com um dispositivo especial, e com a utilização do CAD pode ser observado na fig. 5.5.

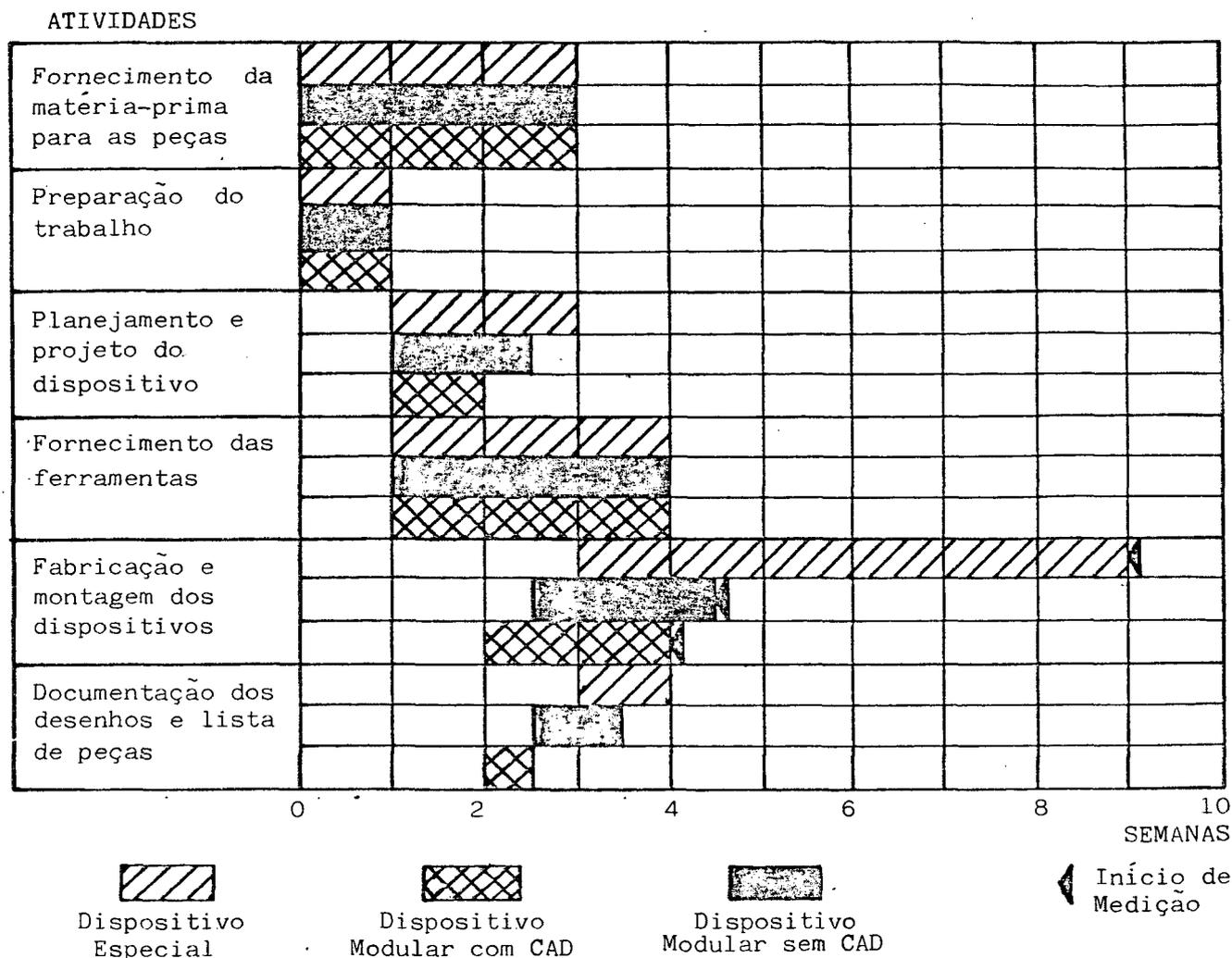


Fig. 5.5 - Comparação no tempo de desenvolvimento entre dispositivo especial, dispositivo modular e dispositivo modular com CAD [44]

Outro teste realizado, foi a comparação nos tempos de montagem de um dispositivo, com e sem o desenho da montagem. Assim, para a montagem de um Dm somente com o desenho da peça, necessita-se de 2 a 3 h dependendo da complexidade da peça. Baseando-se num desenho, pode-se montar o mesmo dispositivo em menos de 1h.

A biblioteca de elementos elaborada a partir de um programa de CAD existente, permite ao usuário uma simples manipulação dos componentes do conjunto modular para construção dos dispositivos desejados, desde que haja um conhecimento básico de operação dos comandos do programa.

Esta experiência básica é necessária, primeiramente, para desenhar e arquivar o desenho das vistas da peça a ser medida. No entanto, caso haja necessidade de elaborar e implementar novos elementos modulares na biblioteca, a fim de atender a outras tarefas de medição, deve-se seguir o seguinte procedimento básico:

- elaboração dos desenhos das vistas dos elementos sem cotagem;
- arquivamento de cada desenho das vistas em subdiretório respectivo a biblioteca de elementos;
- elaboração de ícones para cada peça e vistas, acrescentando-se o nome da peça e/ou número de identificação;
- criação de slides para cada ícone, editando-se a seguir na posição desejada nos menus da biblioteca de elementos;
- registro do nome dos slides na biblioteca de slides.

Desta forma o usuário poderá incorporar elementos adicionais modulares ou específicos para construção do dispositivo, e implementá-los na biblioteca CAD conforme as necessidades.

6 CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS PARA APLICAÇÃO DE CONJUNTOS MODULARES DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

A aplicação de um CMD de medição, em comparação com os outros meios de controle dimensional adotados atualmente nas indústrias, é determinada principalmente pelo tamanho do lote de peças a serem controladas, a complexidade da tarefa de medição e a flexibilidade necessária para medição de diversos parâmetros de peças diferentes.

A fig. 6.1, apresenta algumas indicações sobre o campo de aplicação de CMD de medição, dentre outros meios comumente empregados.

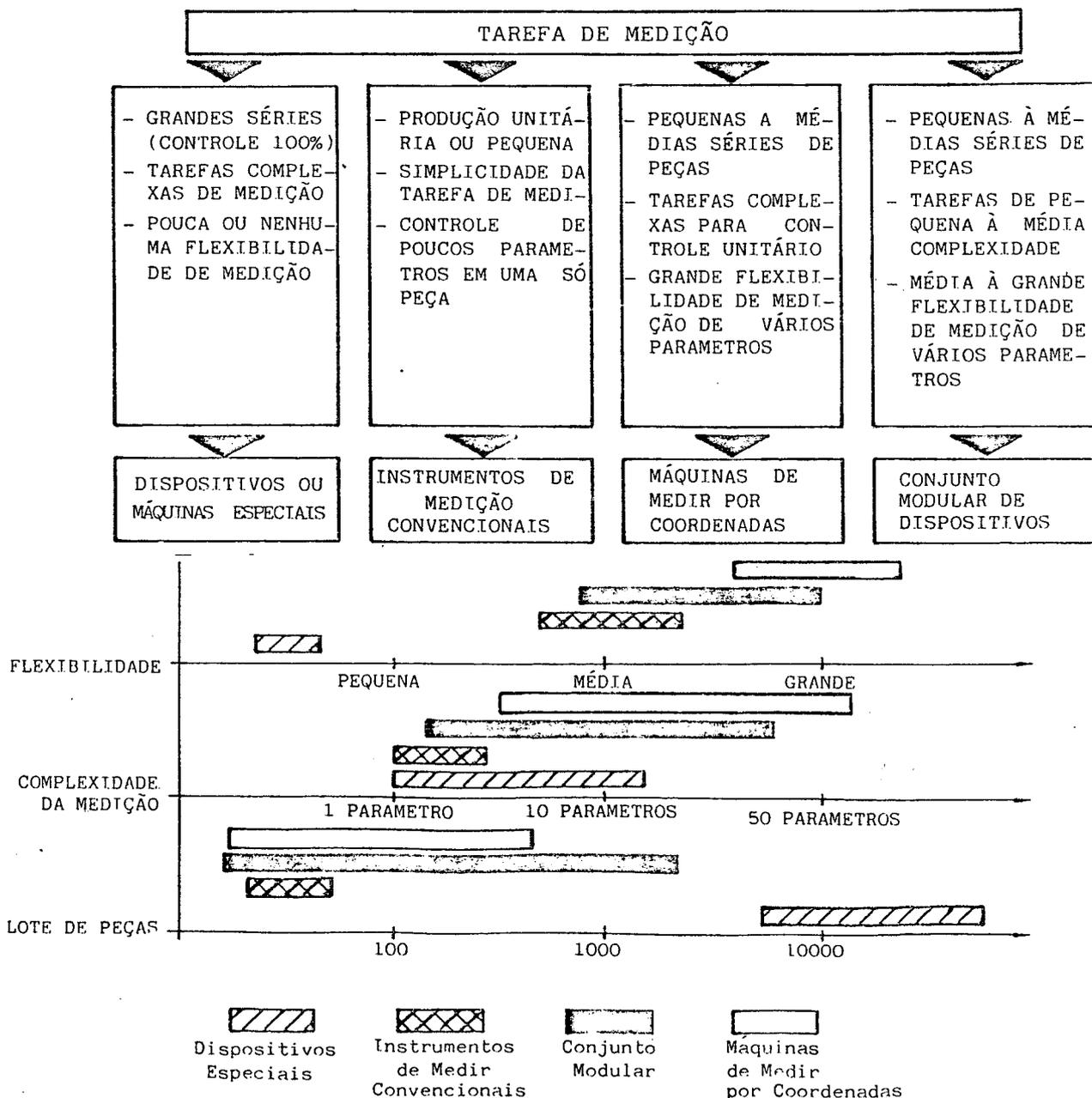


Fig. 6.1 - Campo de aplicação do conjunto modular de dispositivos de medição em relação aos outros meios de controle

O campo de aplicação de CMD de medição adequa-se aos seguintes casos [13]:

- pequenos a médios lotes de peças;
- reduzida freqüência de repetição da peça (máx. de 5/ano);
- pequeno período de utilização (Ex.: máx. de 20 dias para 5 utilizações/ano).
- pequenas a médias dimensões de peças (< 300 mm);
- tolerâncias dos parâmetros a serem controlados com um máximo de +/- 0,01 mm.

Para aplicação com crescente freqüência de repetição e períodos de utilização, cresce o custo do dispositivo modular em relação ao especial, podendo tornar-se dispendioso e anti-econômico.

6.1 COMPARAÇÃO DE CUSTOS

O desenvolvimento de dispositivos está relacionado, na maioria das vezes, aos consideráveis custos, que dependem de vários fatores. Desta forma, é recomendável verificar, antes de decidir pelo desenvolvimento, se a construção de um dispositivo especial ou a aplicação de um dispositivo modular é mais vantajosa.

A base para tal consideração econômica é a avaliação das despesas efetuadas nas etapas de projeto, fabricação e montagem dos dispositivos.

As possíveis despesas são determinadas com relativa exatidão, baseadas em valores de custo relativo e de uma seqüência de cálculo [2 e 4]. A maior dificuldade está, no entanto, na determinação dos custos de desenvolvimento dos dispositivos, que estão na fase inicial de planejamento, onde há somente uma representação superficial sobre as características construtivas.

A fabricação de dispositivos é realizada freqüentemente em uma produção unitária, onde somente em alguns casos são determinados resultados exatos das despesas de projeto e de fabricação.

Um método para seleção do tipo de dispositivo menos dispendioso é baseado na determinação do grau de complexidade. [2,4 e 13].

O grau de complexidade poderá ser determinado segundo os seguintes critérios para Dm:

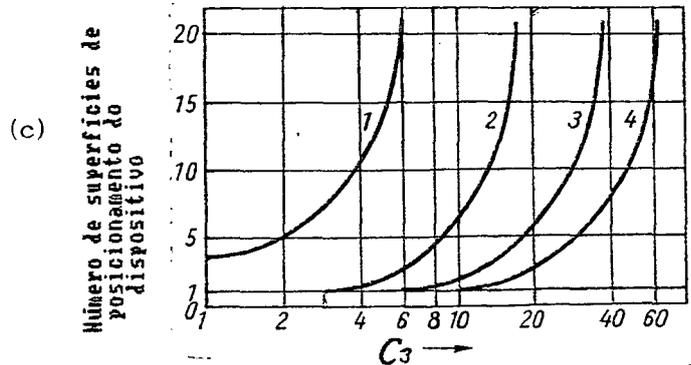
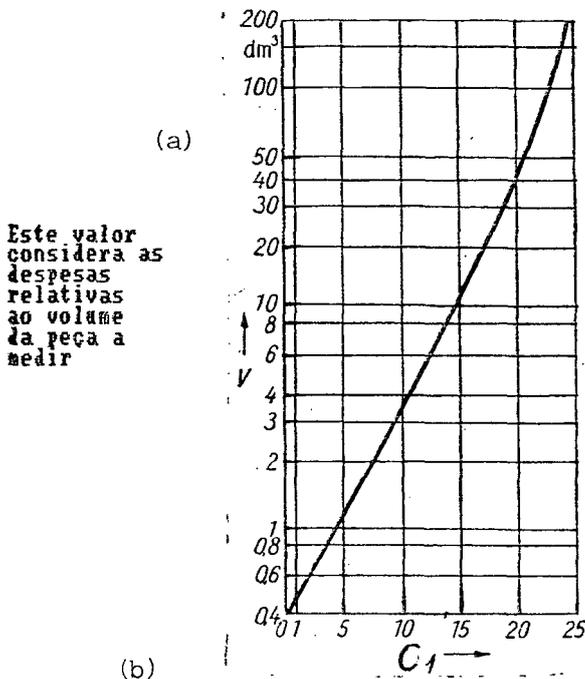
- volume da peça à medir (C_1);
- forma, posição e acabamento da superfície de posicionamento da peça (C_2);
- definição do posicionamento da peça (restrição dos graus de liberdade) (C_3);
- guias necessárias para deslocamento da peça e/ou dos transdutores (C_4);
- princípio de fixação da peça (C_5);
- tipo e quantidade de parâmetros de medição (C_6);
- tolerância dos parâmetros a serem controlados (C_7).

A determinação do grau de complexidade de dispositivos de fixação para máquinas-ferramenta, é apresentada na literatura [2]. Para cada critério é formulado um diagrama que indica o valor característico conforme a complexidade da tarefa. A soma dos valores característicos, resulta no grau de complexidade (C) do dispositivo.

$$C = \sum_{i=1}^7 C_i$$

Os diagramas apresentados para dispositivo de fixação, podem ser adotados, da mesma forma, na determinação dos valores correspondentes C_1 , C_2 , C_3 e C_5 para Dm (fig. 6.2).

Para determinação dos critérios C_4 , C_6 e C_7 foram elaborados os diagramas correspondentes com base nas experiências práticas de construção de Dm servindo como referência para o cálculo do grau de complexidade (fig. 6.3).



Este valor considera as despesas do dispositivo relativas ao tipo de elemento de posicionamento utilizado.

- 1 posicionamento primitivo da peça (p.ex.: através de peças normalizadas como pinos cilíndricos e parafusos)
- 2 posicionamento simples (p.ex.: pinos de posicionamento, anéis de posicionamento, guias, peças com rasgos)
- 3 posicionamento de peças que necessitam elementos complementares dispendiosos (p.ex.: peças parafusadas ou fundidas, suportes) ou que precisam ser ajustáveis
- 4 posicionamento com elevadas despesas, utilização de perfis especiais, dispositivos de centragem, etc.

Este valor considera as despesas da forma, posição e acabamento das superfícies de posicionamento da peça

- I superfícies de apoio não interrompidas ou com rebaiços
- II superfícies com rebaiços ou superfícies de forma anelar
- III pinos de posicionamento; superfícies graduadas, prismáticas ou em relevo; complicada segurança na utilização; apoios ajustáveis.

(a) superfícies de apoio não endurecidas
(b) superfícies de apoio endurecidas

C ₂	POSICÃO DA SUPERFÍCIE DE POSICIONAMENTO DA PEÇA EM RELAÇÃO A SUPERFÍCIE DA BASE DO DISPOSITIVO		
	paralela	em 90	em > ou < 90
0	Ia	-	-
2	IIa/IIb	-	-
4	IIIb	Ia	Ia
6	IIIa	IIa/IIb	IIb
8	IIIb	IIIa	IIIa
10	-	IIIb	IIIb
12	-	-	IIIa
15	-	-	IIIb

(d)

Este valor considera as despesas na fixação da peça a medir. Os valores valem para cada elemento de fixação.

C ₅	
0	através de peças normalizadas, como parafusos, pinos, etc.
2	através de elementos simples de fixação, como ferros de fixação, garfos de fixação, fusos de fixação, contrapontas, prismas, etc.
4	peças com formas descomplicadas; através de elementos de fixação dispendiosos, como: placas de fixação, ferros de fixação complicados, fusos de fixação com buchas, etc.
5	através de uma fixação bastante dispendiosa como: fixação centrada ou em placas de 3 castanhas, pinças de fixação, fixação de peças de paredes finas, elementos de fixação rápida

Fig. 6.2 - Diagramas para determinação dos critérios utilizados no cálculo do grau de complexidade de dispositivos de medição. (a) Critério C₁ (b) Critério C₂ (c) Critério C₃ (d) Critério C₅ [2].

(a)

Este valor considera os tipos e quantidade das guias necessárias na construção do dispositivo para deslocamento da peça e dos transdutores.

C ₄	QUANTIDADE DAS GUIAS			
	1	2	4	8 e +
0	a, b, c	a, b	-	-
2	d	c	a, b	-
4	e	d	c	a, b
6	-	e	d	c
10	-	-	e	d

guias e mancais de escorregamento sem grandes exigências de precisão no deslocamento
guias de molas laminares paralelas com razoável precisão no deslocamento
guias e mancais de rolamento com características de baixo atrito mas sem grande precisão no deslocamento ; guias de escorregamento de precisão
guias e mancais de rolamento de precisão
guias e mancais aerostáticos

(b)

Este valor considera as despesas relativas ao tipo e quantidade de parâmetros de medição

C ₆	QUANTIDADE DE PARÂMETROS DE MEDIÇÃO			
	1	2	4	8 ou +
0	a, b	a	-	-
2	c	b	a	-
4	d	c	b	a
6	-	d	c	b, c
10	-	-	d	d

- (a) medição de alturas, afastamento e superfícies simples de peças, sem dispêndio de muitos elementos
(b) medição de diâmetros e afastamentos com superfícies dispendendo razoável quantidade de elementos
(c) medição de diâmetros internos, afastamentos, batimentos radial e axial de peças cilíndricas; medição de perpendicularismo, paralelismo, etc.
(d) medição de parâmetros extremamente complexos com dispêndio de vários elementos, como p. ex.: centralização de rasgos, planicidade, localização de furos, cilíndricidade, concentricidade.

Este valor considera as tolerâncias dos parâmetros da peça a medir e as suas dimensões relativas.

(c)

C ₇	TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS (mm)				
	Dimensões do parâmetro (mm)				
	< 6	6 a 30	30 a 100	100 a 300	300 a 500
0	0.2	0.4	0.6	1	1.6
2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6
4	0.05	0.08	0.12	0.16	0.24
8	0.01	0.03	0.04	0.06	0.10
12	0.006	0.010	0.015	0.020	0.050
16	0.002	0.003	0.005	0.008	0.020

Fig. 6.3 - Diagramas dos critérios (a) C₄, (b) C₆ e (c) C₇

Além do grau de complexidade, a diferenciação na aplicação dos dispositivos baseia-se ainda na tamanho do lote de peças, na frequência de utilização e no período de utilização do dispositivo por lote.

Desta forma, foram desenvolvidos diagramas comparativos dos custos percentuais, baseados no grau de complexidade e no período de utilização x número de aplicações, para definição do campo de aplicação dos dispositivos modulares e especiais de fixação (fig. 6.4).

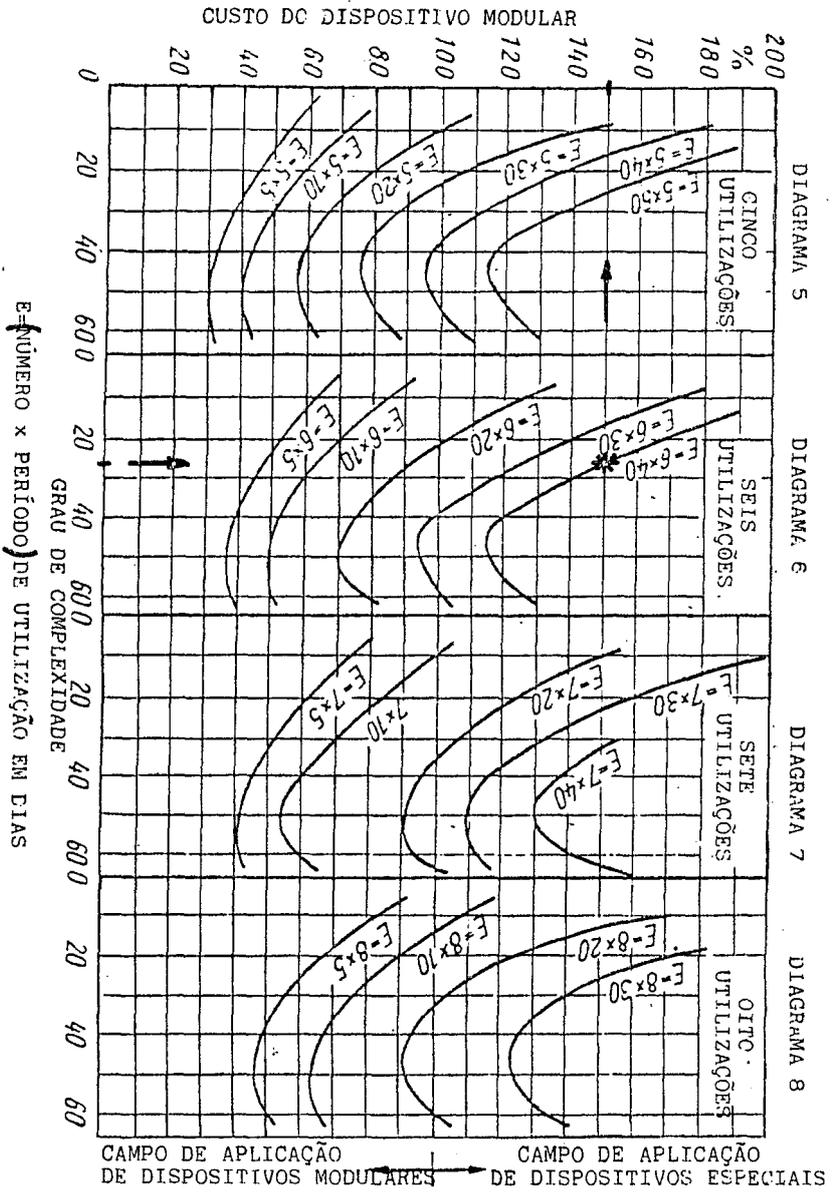
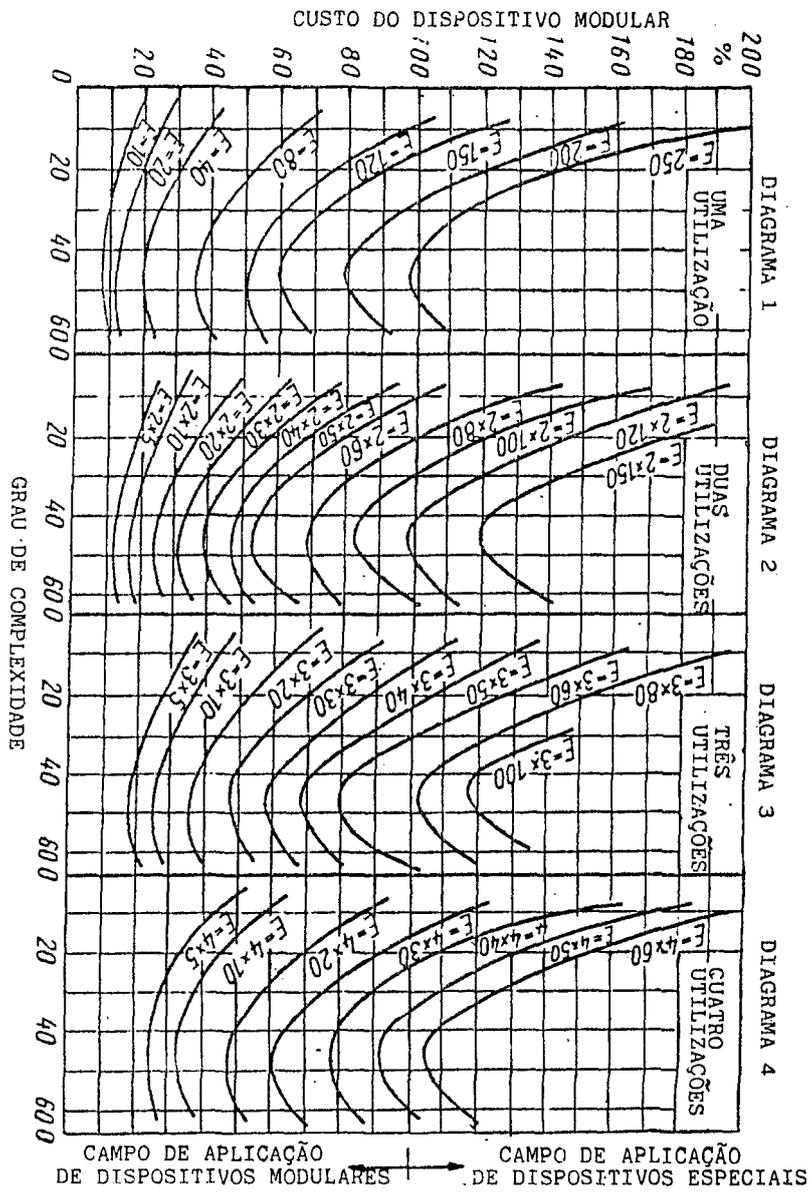


Fig. 6.4 - Diagramas para comparação de custos entre dispositivos modulares e especiais de fixação [2].



Estes diagramas podem ser adotados da mesma forma para comparação de custos entre dispositivos modulares e especiais de medição.

Para exemplificar uma situação prática é apresentada a seguinte tarefa de medição:

Dados:

C_1 - volume da peça a medir = $0,07 \text{ dm}^3$;

C_2 - superfície de apoio de forma anelar não endurecida;

C_3 - posicionamento apoiado simples;

C_4 - necessidade de um mancal para rotacionar a peça; dois mancais para dispositivo de fixação; três guias de deslocamento de alta precisão; doze guias para posicionamento e ajuste dos elementos de medição e suporte;

C_5 - fixação rápida e centralizada, de pequena área de contato em peça de parede fina;

C_6 - medição em três pontos de dois parâmetros complexos;

C_7 - tolerância dos parâmetros;

a) localização do canal $x = 15 \pm 0,3 \text{ mm}$

b) espessura do canal $y = 2 \pm 0,05 \text{ mm}$

número de utilizações por dia = 6

período = 40 dias

Segundo os diagramas, foram determinados os seguintes valores para os critérios:

$C_1=0$; $C_2=2$; $C_3=0$; $C_4=10$; $C_5=5$; $C_6=6$; $C_7=3$.

$$\text{Grau de Complexidade } C = \sum_{i=1}^7 C_i = 26$$

Pelo diagrama da figura 6.4, tem-se para $E=6 \times 40$, um percentual de 150%, ou seja, o dispositivo especial é 50% mais econômico que o dispositivo modular.

Na determinação dos valores dos critérios, baseados nos diagramas propostos, deve-se sempre analisar e observar as condições e requisitos da tarefa de medição. Os diagramas para os critérios C_4 , C_6 e C_7 representam uma proposta inicial para determinação do grau de complexidade de D_m .

7 CONCLUSÕES

A aplicação industrial de dispositivos de medição, tem por finalidade aumentar a eficiência, a confiabilidade e racionalizar o processo de controle de qualidade, quando as mesmas tarefas de medição são frequentemente realizadas.

Como resultados do trabalho obteve-se:

- Um protótipo de conjunto modular de dispositivos de medição com as seguintes potencialidades:
 - . possibilita a construção de dispositivos para medição de parâmetros geométricos de peças cilíndricas, prismáticas e irregulares, sendo compatível com qualquer tipo de transdutor de deslocamento de \varnothing 8H7 mm;
 - . retração mecânica dos apalpadores para medição de afastamento, garantindo a integridade do dispositivo e da peça a medir;
 - . elementos modulares caracterizados por possuírem matriz de furos ou rasgos oblongos, possibilitando grande versatilidade e flexibilidade de montagem;
 - . módulo universal compacto para medição de diversos parâmetros;
 - . medição de diâmetros e afastamentos em peças cilíndricas em dois estágios, garantindo simplicidade de montagem e do processo de medição;
 - . boa performance metrológica dos dispositivos ensaiados, com uma incerteza de medição de $\pm 2 \mu\text{m}$ para peças cilíndricas retificadas.
- Uma sistemática de desenvolvimento de Dm, que é particular em relação ao processo de desenvolvimento geral dos produtos (VDI 2222), em razão da necessidade de se resolver primeiramente o problema da tarefa de medição, para então solucionar o problema do projeto construtivo do dispositivo. Assim, com base na estrutura funcional geral do dispositivo de medição, pode-se definir a quantidade, o tipo e a orientação dos transdutores, selecionar o princípio e método

de medição, bem como estabelecer os movimentos que caracterizam o processo de medição, para então elaborar e selecionar os princípios de soluções dos vários elementos funcionais componentes do dispositivo de medição.

- Uma biblioteca de elementos em um programa de CAD, apresentando menus de ícones respectivos aos vários elementos componentes do conjunto desenvolvido, além de elementos mecânicos normalizados. Juntamente com a biblioteca, foram elaborados e armazenados grupos de construção configurando módulos distintos, utilizados freqüentemente, o que permite maior velocidade na elaboração dos desenhos de montagem dos dispositivos, alcançando-se até 30% de redução no tempo em relação aos métodos convencionais;

- uma orientação para definição do campo de aplicação do conjunto modular de dispositivos de medição, mediante as seguintes restrições:

- . pequenos a médios lotes de peças (10 a 1000 peças);
- . tarefas de medição de pequena a média complexidade (5 a 20 parâmetros de medição);
- . reduzida freqüência de repetição da peça (máx. de 5/ano);
- . pequeno período de utilização (Ex.: máx. de 20 dias para 5 utilizações/ano);
- . peças de pequenas a médias dimensões ($< 300 \text{ mm}^3$);
- . tolerâncias de fabricação a serem controladas de no máximo $\pm 0,01 \text{ mm}$;

- caracterização dos principais elementos funcionais envolvidos em dispositivos de medição e conjuntos modulares, como: elementos de medição, de suporte, de guia, de posicionamento e de fixação.

A experiência adquirida com os trabalhos realizados para desenvolvimento de quatro dispositivos de medição para a indústria, além do conjunto modular protótipo a ser industrializado, resultaram num ferramental teórico-prático, que visa racionalizar de forma geral as atividades de projeto.

As aplicações mostraram que [59 e 60], os dispositivos tem sido empregados preferencialmente numa forma semi-automatizada, flexível e junto das unidades de fabricação.

Com o emprego do conjunto modular desenvolvido juntamente com a biblioteca de elementos no CAD para projeto da configuração dos dispositivos, pode-se alcançar até 80% de redução no tempo global de desenvolvimento em relação ao projeto de um dispositivo especial por métodos convencionais.

As aplicações do conjunto modular, e conseqüentemente da biblioteca de elementos correspondentes, podem ser ainda ampliados para construção de dispositivos de ajuste, de fixação de peças em máquinas-ferramenta para usinagens leves e em máquinas de medir por coordenadas.

Algumas recomendações para continuidade do trabalho estão a seguir listadas:

- otimização do conjunto modular desenvolvido, principalmente quanto aos aspectos de fabricação de precisão e projeto das guias de deslocamento dos apalpadores, além da ampliação para atendimento à outras tarefas e aplicações;
- verificação da potencialidade do protótipo otimizado, com a realização de vários ensaios de calibração para peças de diferentes perfis geométricos e parâmetros de medição, em situações adversas (p. ex.: temperatura de até 50° C, vibrações, choques), simulando situações reais que ocorrem indústria;
- associação da biblioteca de elementos do CAD com um programa de CAM, para geração de programas CNC, na fabricação de elementos modulares padronizados;
- estudo da adequação e aplicação do conjunto modular para automatização da colocação e retirada da peça a medir bem como de todo ciclo de medição;
- estudo e desenvolvimento de um sistema computacional especialista, que mediante a entrada da peça com os parâmetros desejados de medição, é selecionada e apresentada uma solução mais próxima da configuração do dispositivo de medição;
- aperfeiçoamento e elaboração de um programa de computador para análise econômica de aplicação do conjunto modular em relação aos dispositivos especiais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Paul, P. "Vorrichtungsbau", 4^a Edição, Berlin, VEB Verlag Technik, 1988.
- [2] Fronober, M. "Vorrichtungen, Gestalten, Bemessen, Bewerten", 10^a Edição, Berlin VEB Verlag Technik, 1988.
- [3] Mauri, H. "Construção de Dispositivos I e II" São Paulo, Editora Polígono, 1972.
- [4] Ehrenfeld, O. "Rationelle Vorrichtungs-konstruktion - Methoden und Hilfsmittel", VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1983.
- [5] Wilm, H-St. Prusseit, H. Arndt, P. Steinhaben, R. "Einsatz, Aufbau und Wirkungsweise eines Bohrungsmessgeraetes", Feingeraetetechnik, Berlin, Vol. 36, pag. 12-14, janeiro 1987.
- [6] Lotze, W. "Messeinrichtung für die Flanken-geometrie Geradflankiger Gewinde und Schnecken", Feingeraetetechnik, Vol. 27, Berlin, pag. 65-67, fevereiro 1978.
- [7] Würpel, H. Richter, Toefke, G. "Automatische Externe Prüfstation zur Werkstückgeometriekontrolle", Feingeraetetechnik, Berlin, Vol. 36, pag. 546-550, dezembro 1987.
- [8] Hofmann, D. Nothelle, U. Puppert, K. Hufe, A. "Rechnergestützte automatisierte Prüfung von Spiralbohrern", Feingeraetetechnik, Berlin, Vol. 33, pag. 399-401, setembro 1984.
- [9] Schraps, S. "Was ist ein Vorrichtungsbaukasten", Industrie Anzeiger, Vol. 99, 11, pag. 185-186, setembro, 1977.
- [10] Pfisteres, W. "Vorrichtungssystem für die rationelle Fertigung von kleinen und mittlerem Serien", ZWF, 72, pag. 371-373, agosto 1977.
- [11] Knorr, R. "Vorrichtungsbau als Voraussetzung zur Realisierung der situationsgerechten Fertigung". ZWF, 72, pag. 374-377, agosto, 1977.

- [12] Pfisterer, H. "Ausbaufähiges Vorrichtungssystem vereinfacht die Klein- und Mittelserienfertigung", Maschinenmarkt, vol. 82, outubro 1976.
- [13] Brandt, H.
Nicolai, M. "Rationalisierung durch Vorrichtungsbaukasten", Werkstatt und Betrieb, vol. 111, Carl Hanser Verlag, München, pag. 781-791, dezembro 1978.
- [14] Pfender, M.
Müller, H.
Findeisen, D. "Grundlagen, Beschreibung und Erfahrungen bei der Anwendung des Baukastensystems", Feinwerktechnik, Vol. 74, pag. 229-233, junho, 1970.
- [15] ROCH "Module Universels Roch VS-5000", France, 1978.
- [16] BLÜCO "Modular Rasterspannsystem", Blüco Technik, Alemanha, 1988.
- [17] EQUITEC "Sistema Modular de Fixação", Bluco-Equitec. S/A, São Paulo, 1987.
- [18] INDUSTÉCNICA "Sistema Modular de Fixação 7110-FIXO", Fixo-AMF, Indústria Equipamentos Industriais Ltda., São Paulo, 1987.
- [19] HAHN & KOLB "Optimiertes Modulares Spannsystem", Hahn & Kolb GmbH & Co., Alemanha, 1989.
- [20] AGIE "Sistema Integrado de Sujeción - ICS", AGIE, Suíça, 1988.
- [21] KIPP "KIPP Modular Flexible Fixturing System", KIPP, Alemanha, 1990.
- [22] MBS "Spannvorrichtungen", Maschinen - Bau-Schaefer MBS, Alemanha, 1990.
- [23] Beitz, W.
Pahl, G. "Baukastenkonstruktionen". Konstruktion, vol. 26, pag. 153-160, abril, 1974.
- [24] Brahnkamp, K.
Hermann, J. "Baukastensystematik - Grundlagen und Anwendung in Technik und Organisation", "Industrie Anzeiger", 91, pag. 29-33, abril 1969 e vol. 91, pag. 99-104, junho 1969.

- [25] Sproed, G. "Baukastenkonstruktionen mit hoher Wiederholteilverwendung konstruktiver Loesungen, Maschinenbautechnik, 26, pag. 100-105, março 1977.
- [26] ALFREDEEN "Kreative Technik", Alfreden Production AB, Suécia, 1979.
- [27] KS "UniversalMessbaukasten", VEB Feinmesszeugfabrik Suhl, Alemanha, 1977.
- [28] FEINPRÜF "Messnormteile - Mechanische Bauteile für Messvorrichtungen", Feinprüf-MAHR GmbH, Goettingen, Alemanha, 1989.
- [29] HOMMELWERKE "Mehrstellenmessung nach Mass", Hommelwerke GmbH, Alemanha, 1988.
- [30] TESA "Instruments and Systems for Quality Assurance", TESA, S.A., Suíça, 1986.
- [31] ERS "Messgeraete und Vorrichtungen für die Laengenmesstechnik, ERS Mikrowerkzeug AG, Alemanha, 1990.
- [32] C.E. JOHANSON "COMBICHECK - System of standard elements for the assembly of inspection fixtures", C.E. Johanson, Suécia, 1990.
- [33] A.T.I. Montagens de Controle "Systeme MULTIFLEX ATI - Aplicaciones Techniques Industrielles, França, 1990.
- [34] HELIOS "Helio-Norm", HELIOS-Messtechnik GmbH & CO, Alemanha, 1990.
- [35] RECTIFIL "Standards Control Fixtures", RECTIFIL, França, 1990.
- [36] VERNON "VERCANNO Modular Gauging System" VERNON Gauging Systems Limited, Inglaterra, 1990.
- [37] Koller, R.
Pieperhoff, H.J. "Rationalisierung und Automatisierung der Vorrichtungskonstruktion mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen". Konstruktion, vol. 30, pag. 319-325, agosto 1978.
- [38] Imhof, G.
Grah1, W. "Rationalisierung der Konstruktion vom Vorrichtungen mit Hilfe elektronischer Rechentechnik", Maschinenbautechnik, vol. 26 junho, 1977, pag. 246-248 e vol. 26, pag.

362-364, agosto, 1977.

- [39] Grabowsky, H.
Flegel, H. "Einsatz von CAD-Arbeitsplaetzen für das Konstruieren mit Baukasten. Zwf, vol. 73, pag. 311-319, junho, 1978.
- [40] Eversheim, W.
Buchholz, G.
Knauf, A.: "Rechnerunterstützte konstruktion vom Baukastenvorrichtungen", Industrieanzeiger, 10, pag. 13-15, fevereiro, 1985.
- [41] Dieckhoff, M.S. "Systematischer Erstellen Flexibler Spannvorrichtungen", Werkstatt und Betrieb, Vol. 120, pag. 199-203, Carl Hanser Verlag, München, março, 1977.
- [42] Draeger, H.J.
Gorske, J., "CAD-Einsatz beim Entwurf von Baukastenvorrichtungen", Werkstatt und Betrieb, Vol. 120, pag. 205-206, março, 1987.
- [43] Schindewolf, S.
Buchberger, D. "Rechnergestützte Planungshilfen für Baukasten-Vorrichtungen", Werkstatt und Betrieb, Vol. 121, pag. 41-45, Carl Hanser Verlag, München, janeiro, 1988.
- [44] Buchholz, T. "Einsatz modularer Vorrichtungssysteme auf flexiblen Fertigungseinrichtungen", Werkstatt und Betrieb, Vol. 122, Carl Hanser Verlag, München, pag. 567-570, julho, 1989.
- [45] Schlotter, H.
Thurat, H. "CAD mit Systemvorrichtungen", Werkstatt und Betrieb, Vol. 123, Carl Hanser Verlag, München, pag. 279-290, abril, 1990.
- [46] FRITZ ECKERT "CAD-Baukastenvorrichtungen", Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbauen, Fritz Eckert, Karl-Marx-Stadt, Alemanha, maio, 1989.
- [47] Eversheim, W.,
Neitzel, R. "Ein Expertensystem für die Vorrichtungskonstruktion", Konstruktion, vol. 40, pag. 97-101, 1988.
- [48] HECKLER & KOCH "Messbaukasten System" Heckler & Koch GmbH, Geschaeftsbereich Praezisionstechnik, Alemanha, 1990.

- [49] Mayer, F.X. "Messvorrichtungen kurzfristiger und kostengünstiger Erstellen", Werkstatt und Betrieb, Vol. 122, Carl Hanser Verlag, München, pag. 877-878, outubro, 1989.
- [50] Back, N. "Metodologia de Projeto de Produtos Industriais", Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1983.
- [51] Krause, W. "Geraetekonstruktion", 2^ª Edição, VEB Verlag Technik Berlin, 1986.
- [52] Pahl, G.
Beitz, W. "Konstruktionslehre", Handbuch für Studium und Praxis, Springer Verlag, Berlin, 1977.
- [53] Pereira, M.W.
Wondracek, U. "Projeto de Dispositivos de Medição para Controle Dimensional de Precisão", 2^º Simpósio Brasileiro de Mecânica de Precisão, São Paulo, março, 1990.
- [54] Pereira, M.W. "Untersuchungen zur Entwicklung eines Automatisierungsfähigen Messverfahrens zur Abstandsmessung in Bohrungen, dargestellt am Beispiel der Prüfung von Pneumatikventilen" diplomarbeit D-281, Technische Hochschule Ilmenau, Alemanha, maio, 1989.
- [55] Schoeler, N.
Schneider, C.A. "Qualificação de Instrumentos de Medição-Calibração-Aferição", Curso Labmetro, julho, 1986.
- [56] Hofmann, D. "Handbuchmesstechnik und Qualitätssicherung", 2^ª Edição, VEB Verlag Technik, Berlin, 1981.
- [57] Pereira, M.W.
Pfeiffer, G.
Zimmermann, A.C. "Construção de Transdutores Eletro-indutivos de Deslocamento aplicáveis ao Controle Dimensional de Precisão", Relatório Interno, Fundação CERTI, agosto, 1987.
- [58] Schneemann, P. "Untersuchungen über das Messkraft- und Anzeigeverhalten von Induktiven Feinzeigern unterschiedlicher Bauart", Tese de doutorado, Technischen Universität Hannover, 1975.
- [59] Pereira, M.W. "Desenvolvimento de dispositivos de medição para controle dimensional de bronzinas" DC-027/DC-028, Relatório Técnico Final, Fundação CERTI - Federal Mogul S.A, fevereiro, 1990.

- [60] Pereira, M.W. "Pesquisa de técnicas de medição para o controle dimensional de bronzinas" DC-034, Relatório Técnico final, Fundação CERTI-Federal Mogul S.A., fevereiro, 1988.
- [61] Emde, V. "Anwendung von Laengsführungen im Vorrichtungsbau", Der Zuliefermarkt, pag. ZM128-ZM 129, novembro, 1985.
- [62] Farago, F.T. "Handbook of Dimensional Measurement" Industrial Press Inc., New York, 1968.
- [63] Hildebrand, S. "Feinmechanische Bauelemente", 4ª Edição., Carl Hanser Verlag, München, 1983.
- [64] Krause, W. "Konstruktionselemente der Feinmechanik", 1ª Edição, VEB Verlag Technik, Berlin, 1989.
- [65] Noennig, R. "Entwurf und Berechnung von Federführungen durch aufbereitete Konstrukteurinformationen", Fein-geraetetechnik, Vol. 31, pag. 130-134, março, 1982.
- [66] Soares, J.S.I. "Contribuição ao projeto de apalpadores para medir comprimentos com suspensão em guias de molas laminadas", Dissertação de mestrado, Dept^o Eng^o Mecânica, UFSC, setembro, 1979.
- [67] Voemel, P.G. "Einsatz rationaler Methoden beim Konstruieren Elektro-mechanischer Geraete", Feinwerktechnik und Messtechnik, Vol. 84. pag. 269-274, agosto-setembro, 1976.
- [68] Hart, H. "Einführung in die Messtechnik", 5ª Edição, VEB Verlag Technik Berlin, 1989.
- [69] Trumpold, H. "Laengenprüftechnik - Eine Einführung", 2ª Edição, VEB Fachbuchverlag ,Leipzig, 1981.
- [70] Hart, H.
Lotze, W.
Woschni, E.G. "Messgenauigkeit", 2ª Edição, VEB Verlag Technik, Berlin, 1989.
- [71] Schöler, N. "Estabilidade da função transferência de sistemas de medição", Dissertação de mestrado, Dept^o Eng^o Mecânica, UFSC, março, 1986.

- [72] Kaiser, H. "Anwendungsbereich von Baukasten-
vorrichtungen" Fertigungstechni-
und Betrieb 28, Berlin, pag. 357-
360, junho 1978.
- [73] Paul, G. "Baureihenentwicklung" Konstruktion
26, Springer Verlag, pag. 71-
79/113-118, 1974.
- [74] Blümle, R. "Vorrichtungen aus dem Raster
Spannsystem-Baukasten", wt- Zeitsch-
rift für Industrielle Fertigung,
Springer Verlag, pag. 675-678, 71,
novembro 1981.
- [75] Pereira, M.W. "Sistema Modular para Composição de
Dispositivos de Medição",
Relatórios Técnicos, PC-054, 1989,
SINST/PADCT-CERTI, setembro 1989,
junho 1990 e outubro 1990.
- [76] Pereira, M.W. Manual do usuário da Biblioteca
de elementos modulares de disposi-
tivos de medição", PC-054, 1990,
T/PADCT-CERTI, outubro, 1990.