

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

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DE
UM APALPADOR PARA MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL

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

CARLOS ALBERTO FLESCH

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 1982.

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DE UM APALPADOR
PARA MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL

CARLOS ALBERTO FLESCH

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

ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO - SISTEMAS DE CIRCUITOS
É APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Hermann Lücke
PROF. HERMANN ADOLF HARRY LÜCKE, DR. ING.
ORIENTADOR

Bruciapaglia
PROF. AUGUSTO HUMBERTO BRUCIAPAGLIA, DR. ING.
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

PROF. HERMANN ADOLF HARRY LÜCKE, DR. ING. *Hermann Lücke*

PROF. CARLOS INÁCIO ZANCHIN, M.Sc. *Carlos Zanchin*

PROF. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, DR. ING. *Schneider*

PROF. POLIDORO ERNANI DE SÃO TIAGO FILHO, M.Sc. *Polidoro de São Tiago*

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Hermann Adolf Harry Lücke pela dedicação na orientação deste trabalho.
- Ao Prof. Carlos Inácio Zanchin pela coorientação.
- Ao Prof. Ivo Barbi pela orientação acadêmica.
- Ao Prof. Carlos Alberto Schneider pelo prestimoso auxílio e valiosos ensinamentos, que tornaram possível a realização deste trabalho.
- Ao Prof. Polidoro Ernani de São Tiago Filho pelas sugestões apresentadas.
- Ao acadêmico Ilmar Borchardt pela participação na parte experimental deste trabalho.
- Ao LABMETRO por ter colocado à disposição sua vultosa instrumentação.
- A todo o pessoal do LABMETRO pelo apoio logístico.
- À UFSC, à FINEP e ao FIPEC pelo apoio financeiro.

A MEUS PAIS
À MINHA ESPOSA

RESUMO

É uma constante, nos dias atuais, a medição através da avaliação de coordenadas, tanto em máquinas de medição tridimensional como em máquinas-ferramenta com comando numérico (MFCN). Nestas últimas, através de medições intercaladas ao processo de fabricação, fica estabelecida uma racionalização do processo de controle dimensional na fabricação.

O elemento que toca a peça e informa ao sistema de medição em que instante devem ser tomadas as coordenadas é o apalpador. De acordo com a estratégia de medição adotada, método absoluto ou diferencial, o apalpador pode ser ligador ou medidor.

Um modelo mecânico desenvolvido em paralelo foi equipado eletronicamente de forma a operar dentro de qualquer das duas estratégias de medição.

Dentre os diversos princípios físicos de transdução conhecidos que podem ser utilizados na implementação de apalpadores, dois foram escolhidos, em função das exigências de precisão, robustez, velocidade e versatilidade necessárias para aplicações em MFCN. Para a construção do apalpador ligador foi desenvolvido um sistema baseado em chaves palheta ("reed switch") e para o medidor foi adotado um sistema disponível que é baseado nas correntes de Foucault. Cada um dos dois sistemas foi testado, e a partir dos resultados foram estabelecidas limitações quanto às condições de velocidade e temperatura de operação dentro das quais se pode atingir precisão espacial melhor que $\pm 1\mu\text{m}$.

ABSTRACT

Nowadays it is a current practice the evaluation of coordinates by means of three-dimensional measuring equipment as well as in numerically controlled machine tools (MFCN). In these, by intermittent measurements during the manufacturing process, a rationalization of dimensional control process is achieved.

The element that touches the object to be measured and informs the measuring system the instant to proceed with coordinate evaluation is the probe. Depending on the principle of measuring selected, absolute or differential system, the probe may be an electric "make contact" type or a kind of a position transducer type.

A mechanical model concurrently developed was equipped with electronic instrumentation in order to operate in either measuring principle.

Among the different known physical transducing principles, which can be used in implementation of probes two were chosen due to the strict requirements of accuracy, sturdiness, speed and versatility that are a must in MFCN application. For the construction of an electric "make contact" type sensor, was devised a system based on dry reed switches while for the position transducer type sensor was selected and existing system which is based on Foucault currents. The equipment was submitted to tests using both measuring principles to evaluate the performance of the electronic instrumentation system. From the test data obtained operational limits regarding speed and temperature were established within which it is possible to achieve measuring accuracy better than $\pm 1 \mu\text{m}$.

ÍNDICE

	<u>PÁG</u>
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Importância da Medição Tridimensional.....	1
1.2 - Medições Tridimensionais em Máquinas-Ferramenta.	8
1.3 - Escopo do Trabalho.....	12
2. IMPLEMENTAÇÃO DOS APALPADORES LIGADOR E MEDIDOR.....	15
2.1 - Análise dos Princípios Físicos de Transdução Passíveis de Utilização na Construção de um Apalpador.....	12
2.2 - Desenvolvimento de um Apalpador Ligador.....	24
2.2.1 - Elemento básico do apalpador ligador...	24
2.2.1.1- Caracterização da chave palheta .	24
2.2.1.2- Caracterização do ímã permanente .	26
2.2.2 - Banco de ensaios para estudo de posicio namentos entre ímã e chave palheta.....	31
2.2.2.1 - Montagem mecânica do banco de ensaios.....	31
2.2.2.2 - Instrumentação empregada no banco de ensaios.....	33

2.2.3 - Estudos para obtenção da configuração ótima do campo magnético em relação à chave palheta	33
2.2.3.1 - Configuração simples utilizando um ímã e uma chave palheta	34
2.2.3.2 - Utilização de dois ímãs e uma chave palheta	35
2.2.3.3 - Utilização de conformadores de fluxo magnético	37
2.2.3.4 - Utilização de um ímã e duas chaves palheta (configuração final adotada)	38
2.3 - Desenvolvimento de um Apalpador Medidor	42
2.3.1 - Elementos básicos do apalpador medidor	42
2.3.2 - Características do sistema de medição de deslocamentos baseado nas correntes de Foucault	44
2.3.3 - Características de um sistema disponível que opera pelo princípio de correntes de Foucault	50
2.3.4 - Alteração do nível de tensão do sistema de medição de deslocamentos disponível	51
2.3.4.1 - Fonte de tensão de referência	52
2.3.4.2 - Amplificador somador	53

2.3.4.3 - Amplificador não inversor	53
2.3.4.4 - Análise da influência do circuito eletrônico para alteração do nível de tensão	53
3. ENSAIO DE DESEMPENHO DO INSTRUMENTAL ELETROELETRÔNICO DOS APALPADORES	55
3.1 - Construção de um Banco de Testes	
- Elementos Padrões	55
3.2 - Evolução dos Ensaaios e Análise dos Dados.....	59
3.2.1 - Verificação da estabilidade do padrão de deslocamentos com temperatura	60
3.2.2 - Ensaio de um dos módulos do apalpador ligador	61
3.2.3 - Ensaio do sistema de medição de deslocamentos baseado nas correntes de Foucault	65
4. CONCLUSÃO	72
5. BIBLIOGRAFIA.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

	<u>PÁG.</u>
FIG.1 - Máquina de medir coordenadas.....	2
FIG.2 - Determinação de parâmetros geométricos a partir coordenadas medidas (no plano).....	2
FIG.3 - Medição de coordenadas - exemplos.....	3
FIG.4 - Localizadores rígidos e óticos.....	5
FIG.5 - Apalpador tridimensional ligador.....	6
FIG.6 - Apalpador tridimensional medidor.....	6
FIG.7 - Medição de peças em máquina-ferramenta com coman- do numérico.....	7
FIG.8 - Estrutura mecânica do apalpador.....	14
FIG.9 - A chave palheta.....	25
FIG.10- Desmagnetização permanente de ímãs.....	28
FIG.11- Permeabilidade magnética em função da temperatura para uma liga de aço e níquel.....	29
FIG.12- Desmagnetização após repetidos choques mecânicos.	30
FIG.13- Banco de ensaios.....	32
FIG.14- Esquema básico do instrumental utilizado.....	32
FIG.15- Configuração utilizando uma chave palheta e um ímã permanente.....	34
FIG.16- Configuração com dois ímãs permanentes e uma cha- ve palheta.....	35
FIG.17- Configuração utilizando conformador de fluxo magnético.....	37

FIG.18 - Configuração final adotada.....	38
FIG.19 - Configuração final utilizando duas chaves palheta.	39
FIG.20 - Configuração final aplicada a um dos módulos do apalpador.....	41
FIG.21 - Bloco externo ao apalpador para utilização de sistemas de medição de deslocamento sem contato.....	43
FIG.22 - Esquema geral de um sistema de medição de deslocamento baseado nas correntes de Foucault.....	44
FIG.23 - Densidade de fluxo magnético no eixo de uma espira	45
FIG.24 - Densidade do fluxo nas extremidades do eixo de um solenóide.....	46
FIG.25 - Perdas numa chapa condutora próxima de um solenóide.....	48
FIG.26 - Tensão de saída do sistema de uma medição de deslocamentos em função da posição relativa transdutor/peça.....	51
FIG.27 - Circuito para alteração e amplificação do nível de tensão.....	52
FIG.28 - Característica de amplitude máxima x frequência para o registrador analógico.....	57
FIG.29 - Banco de testes.....	58
FIG.30 - Sistema de aquisição de sinais.....	57
FIG.31 - Módulo ensaiado do apalpador ligador.....	61
FIG.32 - Circuito para fornecimento do sinal de disparo (trigger) para o voltímetro.....	62
FIG.33 - Posição de fechamento dos contatos em relação à velocidade de deslocamento da haste do apalpador.	63

- FIG.34 - Erro na medição com o apalpador ligado, em função da velocidade de medição..... 64
- FIG.35 - Faixa máxima de operação do apalpador medidor em função da máxima variação da temperatura, para erro de 1 μm (sem compensação)..... 68
- FIG.36 - Histerese em função da distância do transdutor em relação a uma placa metálica..... 69
- FIG.37 - Tempo de acomodação do sistema de medição de deslocamentos ao receber um degrau de deslocamento.. 71

ÍNDICE DE QUADROS

	<u>PÁG.</u>
QUADRO 1 - Princípios físicos de transdução.....	17
QUADRO 2 - Critérios de escolha dos princípios físicos de transdução para implementação dos apalpadores.....	23
QUADRO 3 - Características de chaves palhetas (Modelo MSRR2 da HAMLIN).....	25
QUADRO 4 - Temperaturas que podem ser atingidas por materiais magnéticos, sem ocorrência de mudanças estruturais.....	27
QUADRO 5 - Repetibilidade de posição de fechamento e histerese para uma chave palheta colocada entre dois ímãs.....	36
QUADRO 6 - Repetibilidade de posição de fechamento ao longo do tempo para a configuração definitiva.	40
QUADRO 7 - Variação da resistividade de materiais condutores com relação à temperatura.....	50
QUADRO 8 - Deriva térmica do circuito eletrônico para alteração do nível de tensão.....	54

QUADRO 9 - Deslocamento medido pelo sistema de medição padrão em função da temperatura.....	60
QUADRO 10- Deriva térmica do ponto "zero".....	66
QUADRO 11- Deriva térmica da sensibilidade.....	67
QUADRO 12- Resultados obtidos.....	73

1. INTRODUÇÃO

1.1. IMPORTÂNCIA DA MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL

Com o desenvolvimento dos computadores, caracterizado por linguagens de alto nível que permitem um acesso mais fácil às potencialidades aritméticas, lógicas e de comando do computador, bem como a miniaturização, aumento da resistência ao meio ambiente, e significativa redução de preço dos mesmos, foi gerada a ferramenta que aumentou as possibilidades de utilização da medição por coordenadas. Esta técnica de medição, já universal, veio suprir uma lacuna tecnológica no processo de fabricação e seu controle de qualidade^[1].

Através de uma máquina de medir coordenadas (fig.1) determinam-se, de forma universal, as coordenadas de certos pontos sobre a peça a controlar, as quais, processadas convenientemente pelo computador associado, dão lugar aos parâmetros geométricos da peça.

Assim, para determinar o comprimento de um bloco prismático é suficiente conhecer as coordenadas de pontos convenientemente localizados sobre as faces extremas. O cálculo do comprimento é bastante simples se o bloco está posicionado paralelamente a um dos eixos coordenados, tornando-se mais trabalhosa a obtenção do resultado se a posição do bloco for desalinhada em relação aos eixos (fig.2). Para determinar o diâmetro de um círculo, basta conhecer as coordenadas de três pontos deste círculo. A operação de cálculo, quando relativa a uma posição espacial qualquer do círculo, é bem mais complexa que aquela necessária no caso em que o círculo está contido em um plano paralelo a um dos planos coordenados. Em todos os exemplos, uma solução rápida, precisa e confiável só é possível com o emprego de um computador, usualmente micro ou mini, para efetuar o processamento^[1].

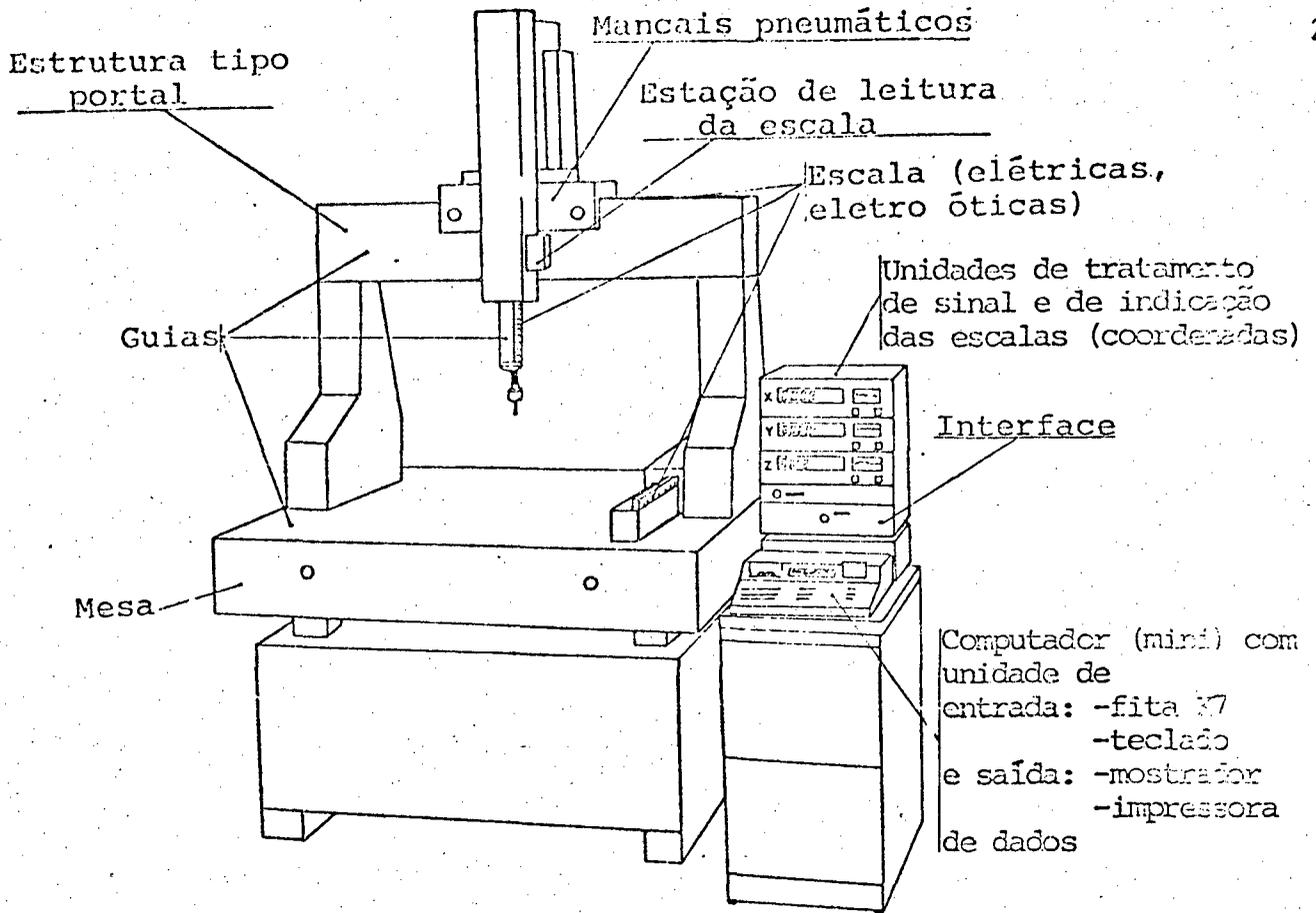


FIGURA 1 - Máquina de medir coordenadas

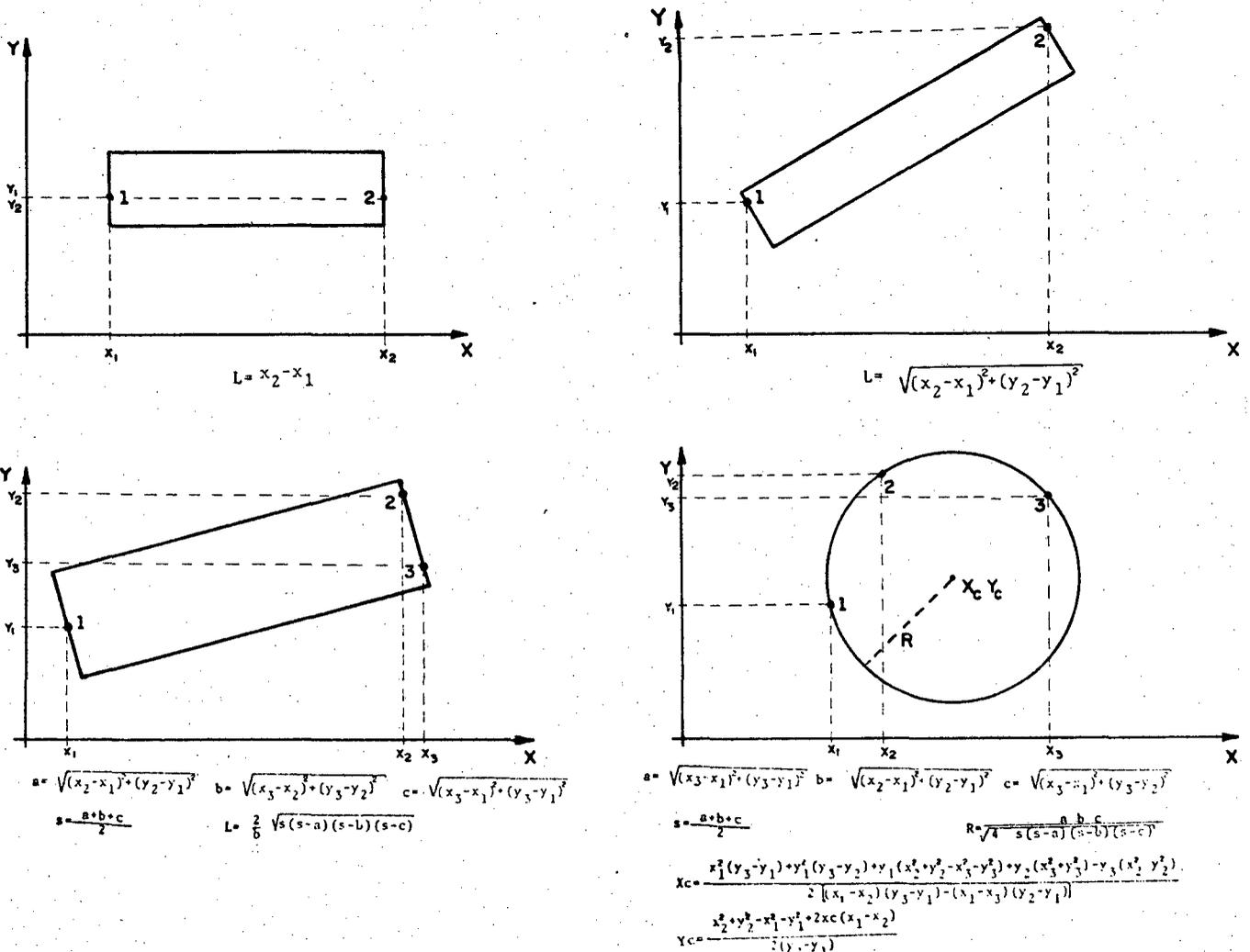


FIGURA 2 - Determinação de parâmetros geométricos a partir de coordenadas medidas (no plano).

Na prática, o cálculo de comprimentos, distância entre eixos, diâmetros, ângulos, desvios da planicidade e todos os outros parâmetros geométricos é feito a partir das coordenadas de pontos medidos em relação a um sistema definido pelas máquinas de medir (fig.3). Estas máquinas podem ser de uma coordenada ou de multicoordenadas; poderão ainda ser de coordenadas lineares (X, Y, Z) e/ou angulares (α, β, γ) ^[2]. Para constituir uma máquina universal de medir é suficiente capacitá-la a operar em três coordenadas lineares ortogonais, sendo a eficiência aumentada grandemente, no entanto, se há à disposição o recurso do movimento angular em um dos planos coordenados, especialmente tratando-se de peças com formas geométricas repetidas, como no caso de engrenagens e discos de cames ^[1] (fig.3).

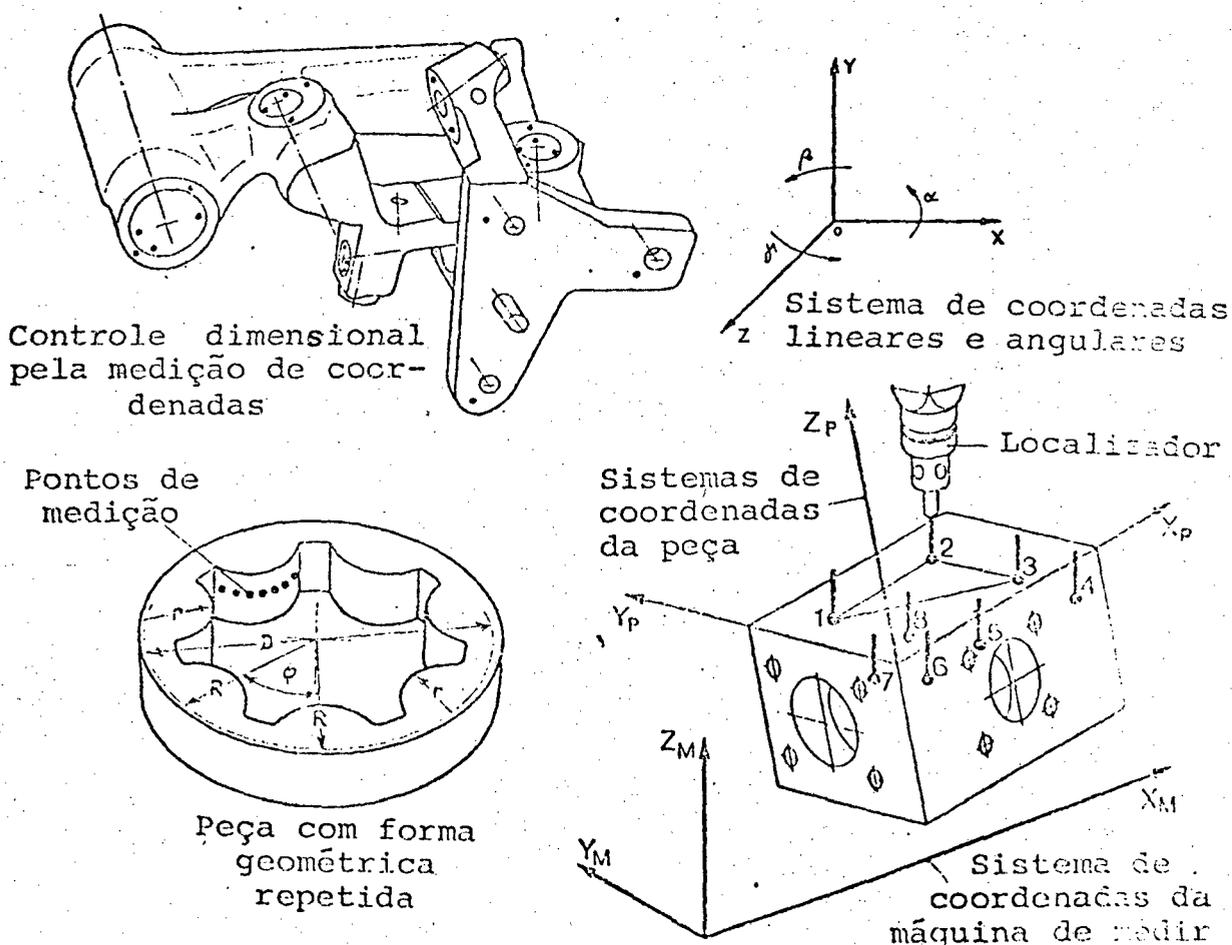


FIGURA 3 - Medição de coordenadas - exemplos

Os pontos, cujas coordenadas devam ser medidas, são localizados por um elemento denominado "localizador". Isto se faz pela medição do movimento do localizador relativamente ao sistema de coordenadas da máquina na qual a peça está colocada (fig.1).

A qualidade dos resultados de uma máquina de medição de coordenadas MMC é função, em primeiro plano, da precisão de medição das coordenadas ^{|3|}. Para garantir bons resultados há necessidade, portanto, de se obter, na máquina, movimentos relativos geometricamente bem definidos, com mínimos erros de retili-neidade, ortogonalidade, planidade, etc. ^{|4|}. Isto implica uma es-trutura bastante rígida, estável e de precisão. Os movimentos coordenados devem, igualmente, ser medidos com mínimos erros e com boa resolução, basicamente com o emprego de escalas. Para elevar o grau de automatização, é fundamental o uso de um siste-ma de medição de deslocamento que permita uma transferência dire-ta dos valores de posição ao computador, o que implica o uso de um sistema eletroeletrônico, eletroótico, ou outro semelhante, do tipo digital incremental ^{|1|}.

De vital importância na medição de coordenadas do pon-to é, também, o localizador, que pode operar com ou sem contato com a peça a medir (fig.4). Os sem contato são posicionados ma-nualmente e identificam o ponto com base num sistema ótico de projetor de perfil ou microscópio com cruz reticulada, não sendo próprios para aplicações universais e automatizadas ^{|1|}. O locali-zador com contato pode ser rígido, apresentando diferentes confi-gurações do sensor em função da característica do ponto a ser lo-calizado na peça, ou pode ser articulado, sendo a localização do ponto de medida relacionada à geração de um sinal elétrico. Basi-camente, há dois tipos de localizadores articulados: o apalpador ligador e o apalpador medidor ^{|5|}.

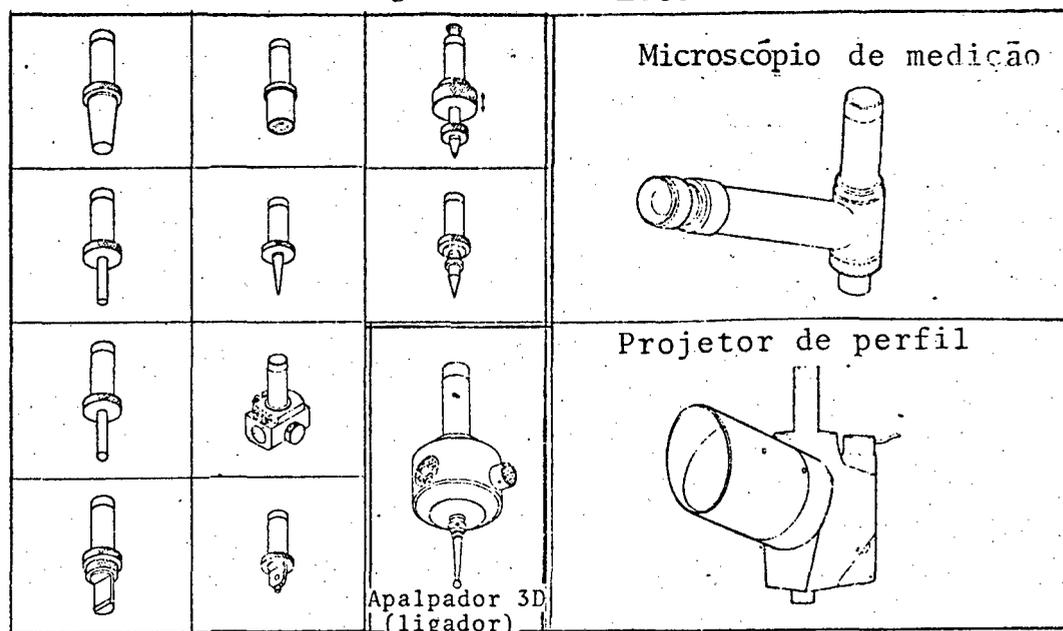


FIGURA 4 - Localizadores rígidos e óticos

No apalpador ligador, cujo exemplo é mostrado na fig.5, quando o sensor entra em contato com a peça vindo de qualquer direção, deflete uma haste que, por sua vez, aciona um sistema gerador de um sinal elétrico que dá início imediato à leitura simultânea das coordenadas do ponto de contato^{|6|}. Através de uma calibração inicial do apalpador dotado de um determinado sensor, obtêm-se informações que permitem compensar os valores medidos (coordenadas), de forma que os mesmos equivalham às coordenadas efetivas do ponto contatado em relação ao sistema de referência da máquina^{|7|}.

O apalpador medidor^{|8|}, cujo exemplo está mostrado na fig.6, gera um sinal proporcional ao deslocamento sofrido pelo sensor, quando em contato com a peça. Este sinal pode ser usado para o acionamento da leitura de coordenadas ou para obter o valor do deslocamento, que, adicionado aos valores medidos nas escalas, dá as coordenadas do ponto de medição.

Para garantir uma racionalização é necessário, e comum, que o computador execute a leitura automática das coordenadas após a bandeirada dada pelo apalpador, faça o cálculo dos parâmetros geométricos e imprima um relatório de medição (fig.1). Com os mini computadores modernos, estas funções são exequíveis e bastante facilitadas na operação, através de uma comunicação em diálogo com o operador, e garantidas por uma programação universal.

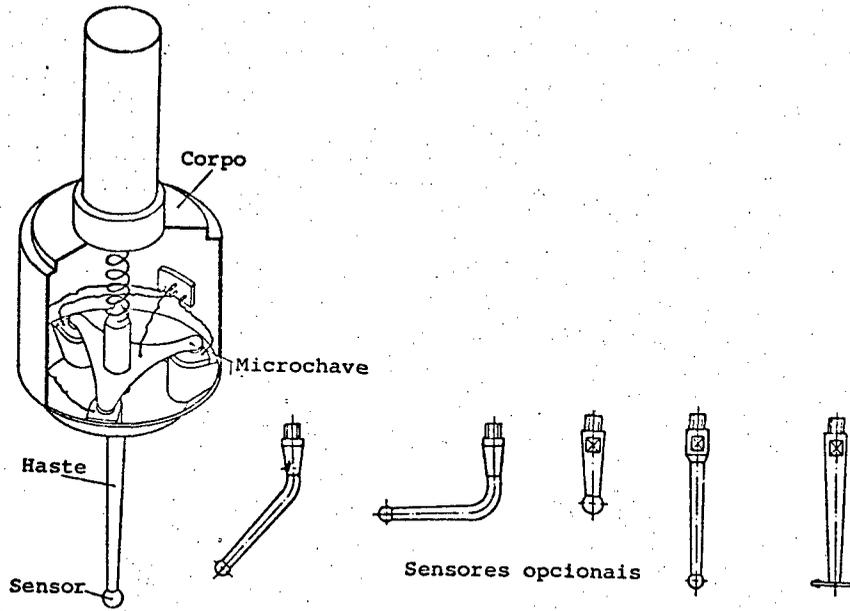


FIGURA 5 - Apalpador tridimensional ligador

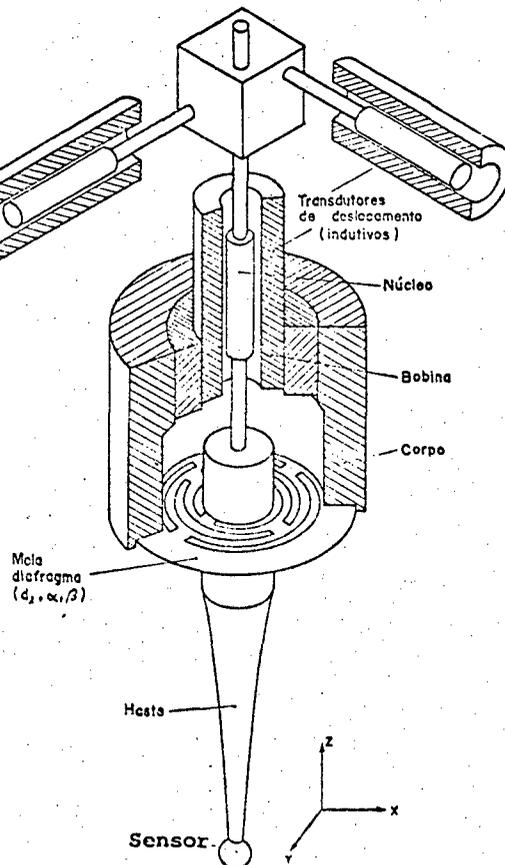


FIGURA 6 - Apalpador tridimensional medidor

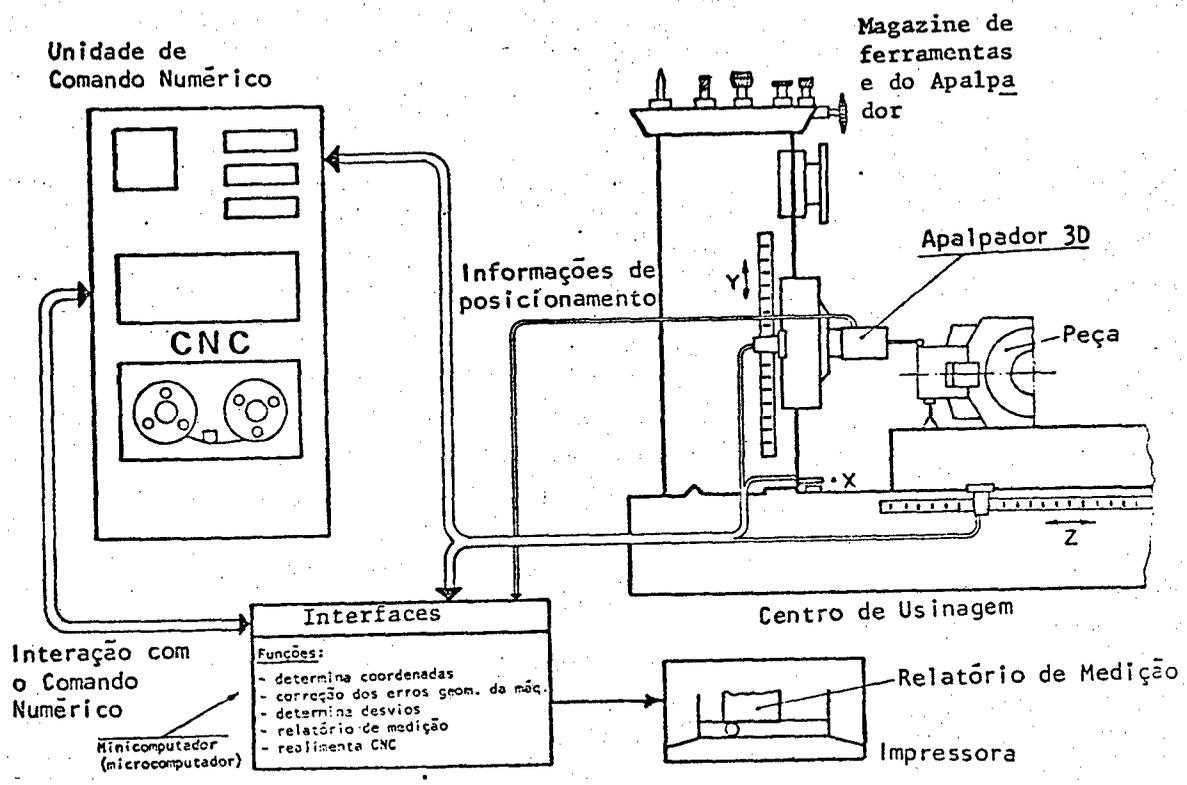


FIGURA 7 - Medio de peças em máquina-ferramenta com comando numérico

1.2 MEDIÇÕES TRIDIMENSIONAIS EM MÁQUINAS-FERRAMENTA

Considerando semelhanças construtivas e operacionais entre MMC e máquinas-ferramenta, fica evidenciada a possibilidade de usar a própria máquina-ferramenta como sistema de medição e controle. Esta capacitação da máquina-ferramenta é ainda mais evidente quando se trata de uma máquina com comando numérico^[9]. Nestas já são disponíveis sistemas automatizados de medição de coordenadas, cujas informações são transferíveis a um processador (fig.7).

No lugar da ferramenta de corte há necessidade, no instante da medição, de utilizar-se um elemento localizador dos pontos de medição sobre a peça, ou seja, um apalpador^[11]. Ao tocar a peça sob determinada condição de deslocamento relativo ou força de medição, o apalpador fornece ao processador um comando que aciona uma rotina de medição das coordenadas. Dispondo das coordenadas espaciais de diversos pontos de interesse, o processador, como na máquina de medir, poderá determinar as características geométricas da peça, como, por exemplo: comprimentos, diâmetros, inclinações, distância entre eixos, retilineidade, e outras^[12].

Conhecendo a posição espacial da peça no campo de trabalho e/ou as grandezas geométricas, inúmeras aplicações de racionalização e melhora da qualidade podem ser alcançadas, tais como:

Identificação da posição da peça bruta no espaço de trabalho

A fixação da peça bruta passa a ser menos rigorosa, simplificando o trabalho e dispensando complexos dispositivos de fixação (pela medição estabelece-se o novo sistema de coordenadas para a usinagem da peça)^[5].

Planejamento das operações de desbaste

Determinada a sobremedida efetiva de material, planejam-se racionalmente os passes de desbaste, evitando sobrecarga e tempos a vazio.

Medição da peça após a usinagem

Detectam-se erros provenientes de desgaste e regulagem da ferramenta, forças do processo, e outros.

A medição durante o processo de fabricação vem ao encontro de uma das condições de racionalização e redução de perdas, ou seja, a identificação do erro durante o próprio processo, possibilitando o acionamento imediato de mecanismos para correção ^[10].

Medição de coordenadas de peças

Pode-se utilizar a máquina-ferramenta como máquina de medição tridimensional, o que é de especial interesse no caso de peças complexas e de grande porte, pelo fato de o controle com instrumentação convencional ser moroso, caro, impreciso e, por vezes, inviável.

A medição em máquinas-ferramenta pode dar-se segundo duas estratégias distintas ^[7]:

a) Medição de Coordenadas em Máquinas-Ferramenta pelo Método Diferencial

Neste sistema é aplicado, basicamente, o apalpador medidor. A máquina-ferramenta de comando numérico, neste caso, opera segundo um programa de medição preestabelecido; o apalpador irá apenas registrar as variações das dimensões das peças. Desta forma, pode-se fazer o controle dimensional de peças usinadas, ou seja, registrar pequenas variações nas dimensões das peças, geradas em função de erros da própria máquina-ferramenta, de desgaste da ferramenta, de influências térmicas e de forças de usinagem sobre os movimentos relativos peças-ferramenta. Essas diferenças são, então, passadas para um computador, onde, uma vez processadas, darão lugar a relatórios sobre a situação dimensional da peça usinada. Através de uma realimentação do sistema com comando numérico, quando houver possibilidade, pode-se fazer uma usinagem

complementar, deixando as dimensões da peça dentro do seu campo de tolerância^{|10|}. A comunicação máquina-ferramenta-computador e computador-comando numérico poderá ser feita, por exemplo, através de uma interface construída com base em um microprocessador. Uma interface deste tipo está sendo desenvolvida pelo LABMETRO - Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC^{|11|}. Desta forma, todos os procedimentos de leitura das coordenadas são feitos por programação, não sendo necessário, para tal, interferir no circuito eletrônico da máquina.

Através de um sistema desta natureza poder-se-á controlar diretamente as peças produzidas na Máquina Ferramenta com Comando Numérico. São de interesse primordial os trabalhos em máquinas de médio e grande porte, podendo-se alcançar, através desta técnica, uma racionalização do processo de fabricação e um aumento da produtividade, em consequência de uma redução do tempo de operação de controle dimensional, evitando, quando se faz necessária uma usinagem corretiva, tempos de reassentamento da peça na máquina^{|11|}.

Por outro lado, através de uma técnica deste tipo, pode-se alcançar compensação de certos erros da máquina, e, com isto, atingir níveis de qualidade superiores aos normais^{|7|}.

b) Medição de Coordenadas em Máquinas-Ferramenta pelo Método Absoluto.

Dentro deste método, o elemento fundamental é um apalpador ligador. Com o uso do apalpador ligador, é possível fazer a medição direta das coordenadas de pontos da peça na própria máquina-ferramenta. A adaptação deste sistema exige, adicionalmente, uma interface que possibilite fazer a leitura imediata das coordenadas da máquina ao receber um sinal do apalpador ligador. Esta operação de aquisição dos dados torna-se complexa pelo fato de o processo realizar-se dinamicamente, ou seja, sob movimento relativo entre peça e apalpador. Estas coordenadas, lidas inicialmente, passam para o computador, e ali poderão ser aproveitadas,

através de processamentos apropriados, para inúmeras tarefas, desde tarefas simples, que possibilitam uma grande racionalização do processo de usinagem, até aquelas que permitem utilizar a máquina-ferramenta como máquina de medir ^[7]. Exemplificando: no primeiro caso, o apalpador ligador poderá ser utilizado para fazer o alinhamento da peça em relação ao sistema de coordenadas da máquina-ferramenta, o que possibilita simplificar e, eventualmente, eliminar dispositivos especiais de fixação da peça. Uma outra operação que leva a racionalizar é a determinação de sobremedidas de material, o que acontece frequentemente em peças fundidas e forjadas ^[5]. Em função dos valores destas sobremedidas, determinadas pelo sistema de medição de coordenadas proposto, podem ser programados os diversos passes de usinagem, possibilitando um aproveitamento racional da capacidade da máquina e evitando quebras de ferramentas.

Com o apalpador ligador poder-se-á também fazer a tarefa proposta ao apalpador medidor, na verificação de peças na própria máquina-ferramenta. Uma aplicação mais sofisticada é a medição de uma forma universal e completa de uma peça na própria máquina-ferramenta, na qual o sistema opera semelhantemente a uma máquina de medição tridimensional. Esta aplicação tem um interesse particular em máquinas de grande porte, onde, muitas vezes, não se dispõe de recursos tradicionais para o controle dimensional ^[7].

Basicamente, os dois modelos proporcionam uma racionalização do sistema de produção e um aumento da qualidade do produto ^[1].

1.3. ESCOPO DO TRABALHO

No LABMETRO está sendo desenvolvido um projeto de pesquisa que tem por objetivo desenvolver um apalpador tridimensional para operar em máquinas-ferramenta com comando numérico.

Neste projeto visa-se obter um sistema:

- a) que tenha uma estrutura mecânica modular de forma a poder operar como apalpador de uma, duas ou três coordenadas;
- b) que, em função de apenas pequenas modificações mecânicas, possa receber estruturas eletroeletrônicas distintas, de forma a operar como ligador ou como medidor;
- c) que seja apropriado para operar em máquina-ferramenta, onde os requisitos específicos são:
 - c.1) resistência ao meio (temperatura e umidade variáveis, vibrações, poeira, etc.);
 - c.2) estabilidade no tempo;
 - c.3) velocidade de operação razoável;
 - c.4) desacoplamento do sinal sem interferência do operador (troca automática - por exemplo: do magazine para a árvore);
 - c.5) precisão espacial melhor que $\pm 2 \mu\text{m}$ para controle dimensional de peças com tolerância de até $\pm 0,01 \text{ mm}$.

Os apalpadores existentes no mercado internacional, já que no Brasil ainda não se fabrica nada semelhante, apresentam muitas das citadas características [6, 14]. No entanto, não oferecem as condições de versatilidade de aplicação referentes às características a e b, às quais dá-se grande importância, em função do objetivo, que é a aplicação em máquinas-ferramenta, onde, dependendo da máquina e das operações que se deseja realizar, não é

possível definir de antemão o sistema - ligador ou medidor - ideal. |5| .

Os objetivos principais e específicos deste trabalho são:

- a) - analisar diferentes soluções eletroeletrônicas para a realização de um apalpador ligador e um medidor, com base numa mesma estrutura mecânica (fig.8).
- b) - equipar um protótipo mecânico, ou partes dele, com sistemas ligadores e medidores, observando as limitações impostas pelo sistema mecânico paralelamente desenvolvido, tais como: volume disponível limitado e máximo deslocamento permissível para a haste do apalpador igual a 10 mm, além de satisfazer as exigências de robustez, estabilidade, velocidade e de precisão anteriormente citadas, para operar em máquinas-ferramenta com comando numérico.
- c) - determinar o desempenho metrológico dos apalpadores desenvolvidos, basicamente no que se refere aos sistemas eletroeletrônicos acoplados.

Resumindo os itens 1.1 e 1.2, são as seguintes as condições a serem atingidas pelos apalpadores, complementando as características já citadas em c.1 a c.5:

- a) - máximo erro $\pm 2 \mu\text{m}$.
- b) - atuação nas velocidades de trabalho das máquinas-ferramenta.
- c) - operação em meios adversos (óleo, água, fluido refrigerante).
- d) - operação de acordo com a estratégia adotada, como medidor ou como ligador.

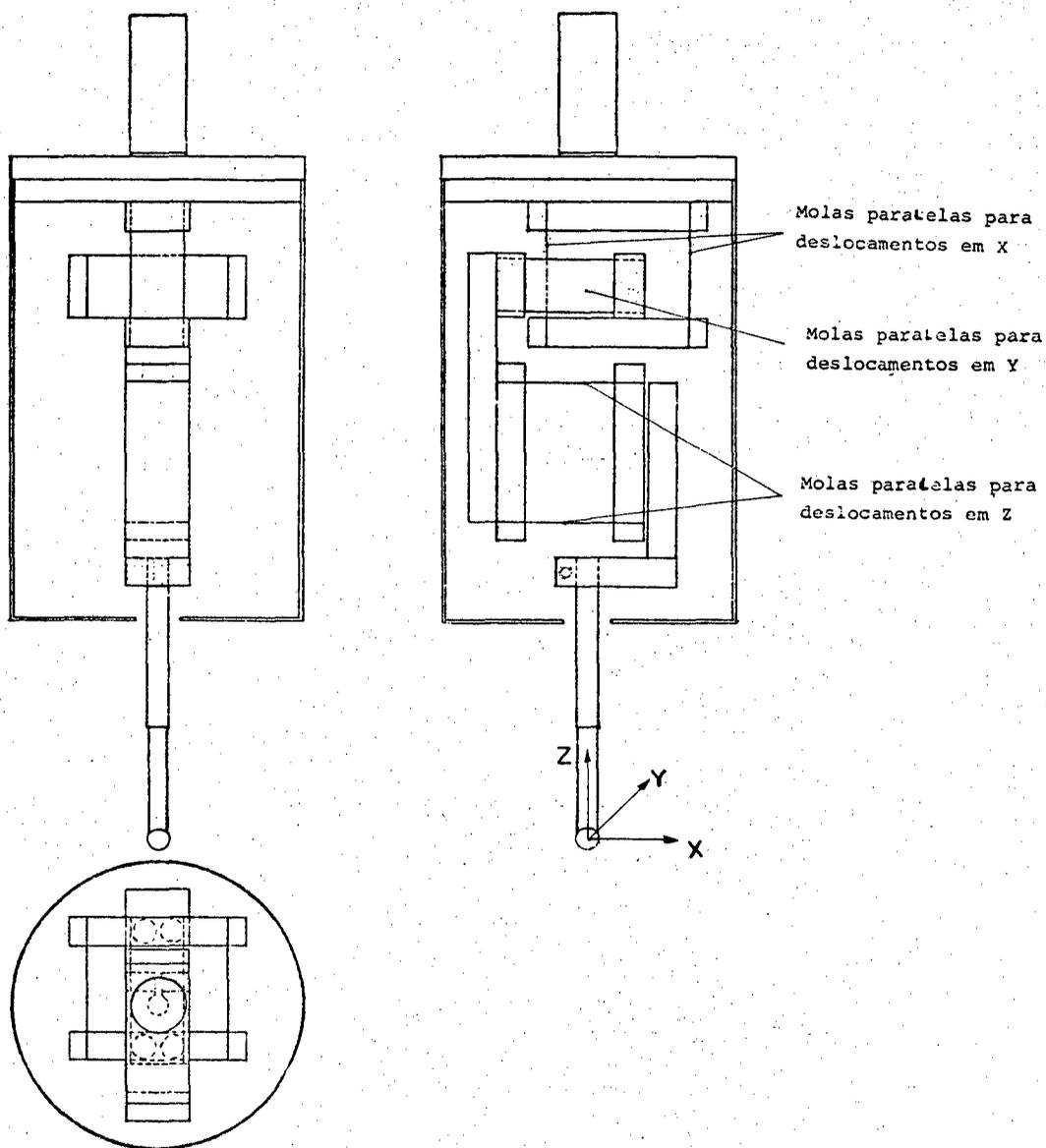


FIGURA 8 - Estrutura mecânica do apalpador

2. IMPLEMENTAÇÃO DOS APALPADORES LIGADOR E MEDIDOR

Para a elaboração do presente trabalho, considerar-se-á como fixa a montagem mecânica básica dos apalpadores, conforme mostrado na fig.8. Essa montagem mecânica consiste basicamente de três conjuntos de molas paralelas que permitem imprimir deslocamentos da ponta do apalpador dentro de um sistema de coordenadas cartesianas x,y,z . Esse conjunto mecânico será instrumentado com transdutores adequados que permitem determinar um deslocamento pré fixado (apalpador ligador) ou medir um deslocamento (apalpador medidor).

2.1. ANÁLISE DOS PRINCÍPIOS FÍSICOS DE TRANSDUÇÃO PASSÍVEIS DE UTILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO DE UM APALPADOR.

Tanto para a construção de um apalpador ligador quanto de um medidor existem diversos princípios fundamentais de operação ou de transdução conhecidos que podem ser empregados.

A escolha deve ser fundamentada basicamente nas características funcionais, construtivas, operacionais e econômicas dos diversos elementos.

Na utilização de um apalpador ligador existe basicamente a exigência única de que este seja capaz de fornecer um sinal sob determinadas condições de força de contato ou de deslocamento relativo^[17]. Em princípio, qualquer elemento que simule uma chave operando sob uma das condições anteriores pode ser empregado na construção de um apalpador deste tipo.

Na utilização de um apalpador medidor aparece a exigência de se medir um deslocamento contínuo dentro de uma pequena faixa de operação. O transdutor a ser empregado na construção de um apalpador medidor deve satisfazer esta exigência. Em princípio, qualquer apalpador medidor, com pequenas adaptações de ordem eletrônica, usando comparadores de nível de tensão, pode operar como ligador.

O quadro 1 mostra as várias possibilidades de transdução para aplicação em apalpadores, e as suas características principais. Esta tabela foi montada com base nos sistemas conhecidos mais empregados para a medição de força ou de deslocamentos^[15].

Na elaboração do quadro 1, os transdutores foram divi didos, segundo o seu princípio físico, em:

- 1 - Transdutores resistivos
- 2 - Transdutores capacitivos
- 3 - Transdutores indutivos com variação da indutância própria.
- 4 - Transdutores indutivos com variação da indutância mútua.
- 5 - Transdutores piezelétricos
- 6 - Transdutores fotoelétricos

Dentro desta classificação foram estabelecidas divi sões de acordo com a forma de variação da grandeza física correspondente e subdivisões desta última em função de diferentes formas construtivas.

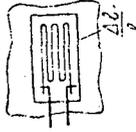
Pela necessidade de que todo o sistema opere de forma automatizada, com o uso de computadores, os transdutores utiliza dos devem ser elétricos.

De acordo com os critérios do quadro 2, foram escolhi dos: para a execução de um apalpador ligador, um sistema baseado em uma chave palheta ("reed switch"), e, para um medidor, um sistema baseado nas correntes de Foucault.

A escolha da chave palheta deve-se principalmente à facilidade de tratamento do sinal. Os demais critérios favoráveis considerados estão mostrados no quadro 2. Foi feita a escolha de um sistema com esta chave, ao invés da utilização direta de conta tos mecânicos, devido à dificuldade de obtenção de contatos bem definidos, o que requer trabalhos de mecânica fina, e pelo fato de esses contatos estarem sujeitos ao meio ambiente. A chave palheta é um elemento encontrado pronto e encapsulado. Sua utilização já é bastante grande na determinação de valores limites sem que, no entanto, se conheça a máxima precisão atingível no seu uso.

O sistema de transdução baseado nas correntes de Foucault foi escolhido para implementação do apalpador medidor, principalmente pela facilidade de adaptação, já que dispensa conta tos elétricos nas partes móveis.

QUADRO 1 - Princípios físicos de transdução

1- Transdutores resistivos:						
Característica geral: Passivos						
1.1- Mudança de resistência através de cursor ou contatos móveis						
Princípio: - Variação da posição de um elemento mecânico						
Vantagens: - Tensão proporcional de medição alta						
- Facilidade de tratamento do sinal						
Desvantagem: - Incerteza dos contatos						
Tipo	Esquema Simbólico	Equação	Faixa de Frequência	Vantagens principais	Desvantagens principais	Observações
1.1.1- Potenciômetro		$R_s = \frac{d}{d_0} R_0$	0 a 5 Hz	Pequeno erro de linearidade	Desgaste do contato do cursor	Muito usado
1.1.2- Contatos discretos			0 a 10 ³ Hz	Facilidade de tratamento do sinal. Baixo custo	Descontinuidade.	Muito usado na indicação de limites
1.2- Mudança de resistência através de deformações mecânicas.						
Princípio: - Mudança das dimensões e da resistência específica						
Vantagens: - Sem desgastes						
- Sem incerteza de contatos						
- Boa resolução						
Desvantagens: - Mudança muito pequena da resistência						
Tipo	Esquema Simbólico	Equação	Faixa de frequência	Vantagens principais	Desvantagens principais	Observações
1.2.1- Extensômetro		$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{l}$	0 a 10 ⁶ Hz	Erros pequenos. Alta freq. limite	pequena sensibilidade	Usado na construção de diversos transdutores

QUADRO 1 - Continuação

Tipo	Esquema simbólico	Equação	Faixa de frequência	Vantagens principais	Desvantagens principais	Observações
2.1- Variação da distância entre placas		$C = \frac{1}{1 + \frac{\Delta d}{d}}$	0 a 10 ⁵ Hz	Extremamente sensível Alta freq. limite	Comportamento não linear	Usado em transdutores de pressão diferencial e de deslocamento

2- Transdutores capacitivos:
 Característica geral: Passivos
 Vantagens: - Força de medição pequena
 - Altas temperaturas de operação
 - Não influência de campos magnéticos

Desvantagens: - Mudança do dielétrico em função do ambiente (água, óleo)
 - Grande influência dos cabos de ligação
 - Resistência interna alta
 - Influência de campos elétricos

3- Transdutores indutivos com variação da indutância própria.

Característica geral: Passivos.

Vantagens: -Grande sensibilidade

-Robustez

-Pequena influência dos cabos

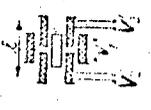
-Não influência da variação da constante dielétrica do meio

-Ausência de desgastes.

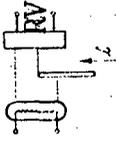
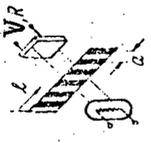
Desvantagens: -Altos componentes resistivos e capacitivos presentes

-Perturbações por campos magnéticos externos

Tipos	Esquema simbólico	Equação	Faixa de frequência	Vantagem principal	Desvantagem principal	Observações
3.1- Indutivo de núcleo móvel			0 a 10^4 Hz	Grande faixa de operação	Não linear	Muito usado como transdutor diferencial
3.2- Indutivo de correntes de Foucault			0 a 10^4 Hz	Medição de deslocamento de objetivos não magnetizáveis	Não linear	Medição de espessuras profundidade de trincas - características dinâmicas

<p>4- Transdutores indutivos com variação da indutância mútua: Característica geral: Passivos Vantagens: - Grande sensibilidade - Robustez - Pequena influência dos cabos - Não influência da constante dielétrica do meio - Ausência de desgastes Desvantagem: - Perturbações por campos magnéticos externos</p>						
<p>4.1- Obtenção do sinal através de mudança da posição relativa de bobinas. Vantagem: - Sistemas com incerteza extremamente baixa.</p>						
Tipo	Esquema simbólico	Equação	Faixa de frequência	Vantagem principal	Desvantagem principal	Observações
4.1.1- Resolver		$\begin{aligned} V_2 &= V_1 C \sin \alpha \\ V_3 &= V_1 C \cos \alpha \end{aligned}$	0 a 20 Hz	Pequenos erros		Muito usado em máquina ferramenta
<p>4.2- Obtenção do sinal através da mudança de posição do núcleo Vantagens: - Ausência de contato elétrico na parte móvel - Ausência de desgaste - Confiabilidade Desvantagens: - Faixa de operação pequena</p>						
Tipo	Esquema simbólico	Equação	Faixa de frequência	Vantagem principal	Desvantagem principal	Observações
4.2.1-Transformador diferencial		$\frac{V_2 - V_3}{V_1} = CI$	0 a 10^4 Hz			Muito usado para medição de deslocamentos.

Tipo	Esquema simbólico	Equação	Faixa de frequência	Vantagens principais	Desvantagens principais	Observações
<p>5- Transdutores piezelétricos</p> <p>Características gerais: - Ativos - Necessidade de uma força deforme um corpo - Uso para medição de grandezas relacionadas com a força (pressão, aceleração, etc)</p> <p>Vantagens:- Alta sensibilidade - Frequência limite alta</p> <p>Desvantagens:- Resistência interna alta - Sensibilidade a campos elétricos - Frequência limite inferior maior do que zero - Influência da capacitância dos cabos</p>		$V = cP$	10^{-3} a 10^5 Hz	Linearidade muito boa Faixa de temperatura alta Deformações pequenas Faixa de operação grande	Necessidade de alta resistência de isolamento	

Tipo	Esquema simbólico	Equação	Faixa de frequência	Vantagens principais	Desvantagens principais	Observações
<p>6.1- Fotoelétrico analógico</p>		$R \cdot V = I(\nu)$	<p>0 a 10^5 Hz</p>	<p>Pequena massa da peça móvel</p>	<p>Instabilidade da fonte de luz</p>	<p>Muito usado em chaves limite</p>
<p>6.2- Digital incremental</p>		$V_R \approx C \cdot \left(\frac{d^2 \theta}{dt^2} + 1 \right)$	<p>0 a 10^3 Hz</p>	<p>Grande faixa de operação</p>		<p>Muito usado em máquinas-ferramenta</p>

6 - Transdutores fotoelétricos

Característica geral: - Passivos

Vantagens: - Muita versatilidade

- Força de medição pequena

- Dispensa de contatos mecânicos deslizantes

QUADRO 2 - Critérios de escolha dos princípios físicos de transdução para implementação dos apalpadores.

TIPO	APALPADOR	
	LIGADOR	MEDIDOR
Princípio físico escolhido para o transdutor	Resistivo (contatos discretos)	Indutivo sem contato
Tipo específico	Chave palheta ("reed")	Correntes de "Foucault"
Critérios considerados na escolha do princípio físico de transdução	<p>Tratamento do sinal extremamente fácil</p> <p>Baixo custo</p> <p>Alta confiabilidade</p> <p>Excelente desempenho em outras aplicações conhecidas</p> <p>Alta resistência a choques e vibrações</p> <p>Contatos hermeticamente fechados</p> <p>Grande durabilidade</p>	<p>Robustez</p> <p>Medição sem contato</p> <p>Pequena influência dos cabos de ligação</p> <p>Não influência da atmosfera de trabalho (água, óleo, fluídos, refrigerantes)</p> <p>Sem desgastes</p> <p>Grande sensibilidade</p> <p>Excelentes características metrológicas fornecidas pelo fabricante de um modelo disponível¹⁴.</p>

Suas características são reconhecidamente não lineares e pouco estáveis. Em função das características indicadas pelo fabricante de tal medidor de deslocamentos ^[16], que apresenta seu sistema como compensado em temperatura e linearizável por circuito ou por programa, optou-se pela escolha de tal sistema.

2.2. DESENVOLVIMENTO DE UM APALPADOR LIGADOR

2.2.1. ELEMENTO BÁSICO DO APALPADOR LIGADOR

O elemento básico constituidor do sistema ligador é a chave palheta.

2.2.1.1. CARACTERIZAÇÃO DA CHAVE PALHETA

A chave palheta é constituída por duas lâminas magnetizáveis colocadas dentro de uma ampola de vidro hermeticamente selada, que contém gás inerte.

Embora seja bastante conhecida a aplicação das chaves palheta nas mais diversas áreas, é ignorada qualquer aplicação semelhante à que se apresenta aqui. Não se tem conhecimento de informações sobre a repetibilidade de posição de operação destas chaves dentro da faixa exigida. Algumas das características conhecidas podem ser vistas no quadro 3 ^[17]. Estas características correspondem a uma chave de fabricação Hamlin.

QUADRO 3- Características de chaves palhetas
(modelo MSRR2 da HAMLIN).

Tensão máxima de chaveamento	200 V
Corrente máxima de chaveamento	500 m A
Resistência máxima com contato fechado	100 m Ω
Resistência mínima com contato aberto	10^{10} Ω
Material de contato	Rádio
Tempo de atuação	0,5 ms
Campo magnético p/acionamento	18 a 52 Ampère-espira

O princípio de operação da chave palheta implica o fato de que, quando um fluxo magnético " ϕ " é gerado no espaço entre as lâminas, ficam estabelecidos nas mesmas pólos magnéticos opostos, (fig.9), fazendo aparecer uma força magnética entre elas.

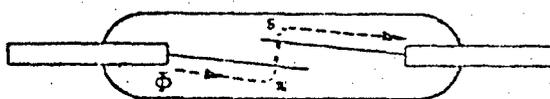


FIGURA 9 - A chave palheta

Tem-se estabelecida a condição de fechamento do contato quando:

$$F \text{ magnética} > F \text{ elástica das lâminas} \quad (1)$$

A força magnética é proporcional ao fluxo magnético, que, por sua vez, depende de uma série de fatores, os quais serão discutidos no decorrer do presente trabalho.

Para proporcionar o fluxo magnético necessário, podem ser utilizados eletroímãs ou ímãs permanentes. Para evitar a utilização de alimentação externa para o eletroímã, o que, no caso do apalpador, se traduz na necessidade de um dispositivo de desacoplamento, deu-se preferência à utilização de ímãs permanentes.

Admite-se que as condições que atuam diretamente sobre as chaves palheta, influenciando em sua posição de operação, são a pré-magnetização e a variação de permeabilidade magnética dos seus terminais em relação à temperatura. Este fator-temperatura será abordado juntamente com as influências externas e magnetização de ímãs permanentes. A pré-magnetização das palhetas e das hastes terminais da chave será tratada juntamente com a obtenção da configuração ótima do campo magnético em relação à chave palheta (item 2.2.3).

2.2.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO ÍMÃ PERMANENTE

Um ímã permanente é obtido pela magnetização de um material ferromagnético ^{|19|}. O sucesso na utilização de um sistema baseado em um ímã permanente dependerá da estabilidade do fluxo magnético estabelecido por este ímã.

Basicamente, seis são os fatores que agem de forma a reduzir o fluxo do ímã, atuando, portanto, como influências desmagnetizantes ^{|18|}:

- a) Estabilidade estrutural do material
- b) Efeitos de campos magnéticos
- c) Efeitos de temperatura
- d) Fadiga mecânica
- e) Efeitos da viscosidade e relaxação e da radiação.

a) Estabilidade estrutural do material

O quadro 4 mostra as temperaturas que alguns dos materiais utilizados em ímãs permanentes podem atingir sem que ocorram mudanças estruturais por longos períodos de tempo (vários anos).

QUADRO 4 - Temperaturas que podem ser atingidas por materiais magnéticos, sem ocorrência de mudanças estruturais.

MATERIAL	TEMPERATURA [°C]	TEMPERATURA CURIE [°C] ± 10 K
Anilco 1	450	780
Anilco 2	450	815
Anilco 3	450	760
Anilco 4	450	800
Anilco 5	550	890
Anilco 6	550	875
Anilco 7	550	850
Anilco 8	550	860
Remalloy	500	900
Cunico	500	860
Cunife	400	450
Vicalloy	500	855
Platinum Cobalt	400	490
Barium Ferrite	400	450

Attingindo a temperatura "Curie", o elemento perde totalmente a sua magnetização. As temperaturas em questão são altas o bastante para ser desconsiderado tal efeito.

b) Efeitos de campos magnéticos

É óbvia a influência de campos magnéticos estranhos; estes podem ser externos ou provocados pela mudança da relutância do próprio circuito magnético. A variação da relutância pode ocorrer por dilatação térmica de elementos envolvidos, por choques mecânicos e por vibrações.

Não deverão ter influência significativa estes efeitos, principalmente se se considerar que a capa externa do apalpador, de aço, atua como blindagem física e magnética.

c) Efeitos de temperatura

A temperatura tem influência desmagnetizante sobre os ímãs de duas formas distintas:

- Redução permanente da magnetização
- Redução reversível da magnetização.

A figura 10 mostra a curva de desmagnetização relativa permanente, derivada da teoria de Langevin - Weiss modificada. Todos os materiais magnéticos apresentam razoável conformidade com esta curva ¹⁸.

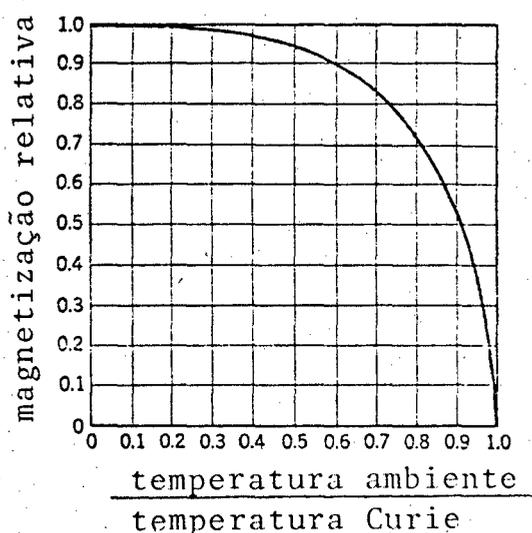


FIGURA 10 - Desmagnetização permanente de ímãs

Note-se que, para a temperatura de trabalho do apalpador, tal característica é desprezível.

A redução reversível da magnetização irá ocorrer em qualquer temperatura, estando em torno de 0,01 e 0,02%/K para o Alnico [18]. Quando necessária a compensação, métodos que utilizam conformadores de campo, com permeabilidade magnética dependente da temperatura, podem ser utilizados. É comum a utilização de ligas de aço e níquel para tal compensação [18].

A característica de uma dessas ligas aparece na figura 11.

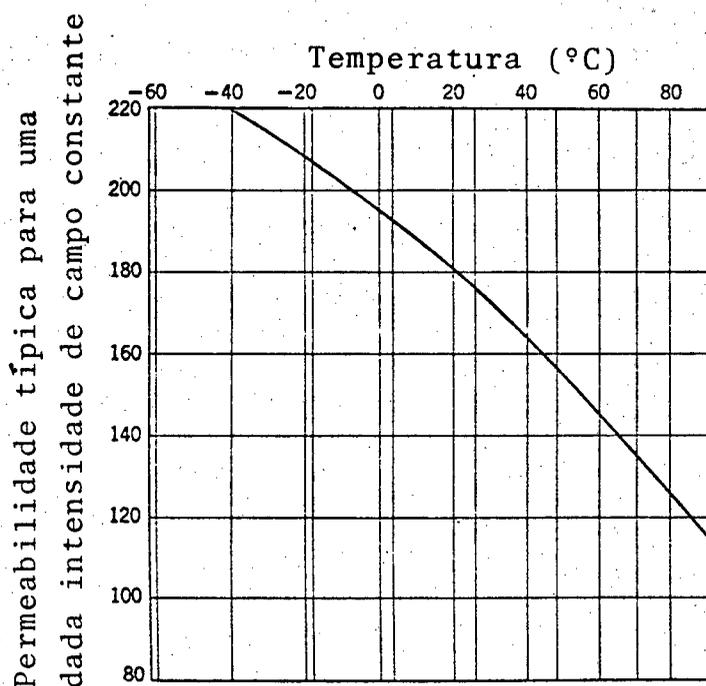


FIGURA 11 - Permeabilidade magnética em função da temperatura para uma liga de aço e níquel.

O efeito da variação da permeabilidade magnética dos materiais relativamente à temperatura irá alterar também as características de operação da chave palheta, que, normalmente, tem os seus terminais de aço. Tal influência foi levantada de forma experimental, juntamente com as demais influências da temperatura.

d) Fadiga mecânica

É sabido que uma barra de aço magnetizada pode ser desmagnetizada por vibrações e choques mecânicos. Ímãs permanentes também são afetados, porém em menor escala.

A fig.12 mostra que a mudança de magnetização aproxima-se de um limite após certo número de choques.

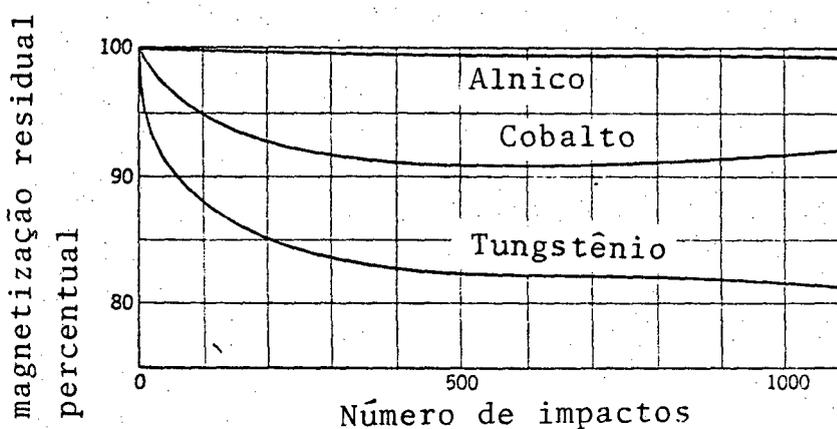


FIGURA 12 - Desmagnetização após repetidos choques mecânicos.

Quanto à vibração, seu efeito é tão pequeno que não precisa ser levado em consideração nas condições normais de trabalho do apalpador ^[18].

e) Efeitos da viscosidade e relaxação e da radiação

Uma troca abrupta na magnetização de um ímã permanente será seguida por uma lenta aproximação da condição de equilíbrio. Este efeito é conhecido por viscosidade ou fenômeno de relaxação, e é normalmente muito pequeno ^[18], podendo ser negligenciado.

Os efeitos da radiação são, comprovadamente, também muito pequenos ^[18].

Os efeitos desmagnetizantes poderão ser compensados, na presente aplicação, através de uma operação de zeragem inicial do sistema de medição do qual o apalpador faz parte. Tal pode ser feito por uma medição inicial de referência que irá preceder os ciclos de medição de uma peça.

A influência da desmagnetização reversível em função da temperatura, sobre o desempenho do sistema constituído, talvez a mais crítica na presente aplicação, será determinada experimentalmente.

É de se esperar, no entanto, que, durante um ciclo de medição, entre uma zeragem e outra, não haja significativa variação da temperatura ambiente.

2.2.2 BANCO DE ENSAIOS PARA ESTUDO DE POSICIONAMENTOS ENTRE ÍMÃ E CHAVE PALHETA

Com o objetivo de escolher a posição relativa ímã/chave palheta que melhor satisfaça as exigências metroológicas estabelecidas, principalmente quanto à repetibilidade de posição de operação, foram feitos diversos ensaios.

2.2.2.1. MONTAGEM MECÂNICA DO BANCO DE ENSAIOS

Para possibilitar um amplo estudo do desempenho das várias configurações possíveis, foi projetado e construído um banco de ensaios com grande flexibilidade de movimentos em relação aos três eixos coordenados. Foram utilizadas seis mesas especiais dotadas de parafusos micrométricos (fig.13).

Existe, em tal banco de testes, a possibilidade de se situar em qualquer posição, dentro de uma região espacial delimitada, o ímã e a chave palheta. Qualquer movimento relativo pode também ser imprimido aos dois elementos.

Especiais cuidados foram dedicados à rigidez mecânica da montagem e à minimização das influências da variação da temperatura sobre os elementos da bancada. Procurou-se sempre obedecer ao princípio de "Abbe" na colocação dos transdutores de deslocamento ¹²⁰. Para minimizar a influência das peças do banco de

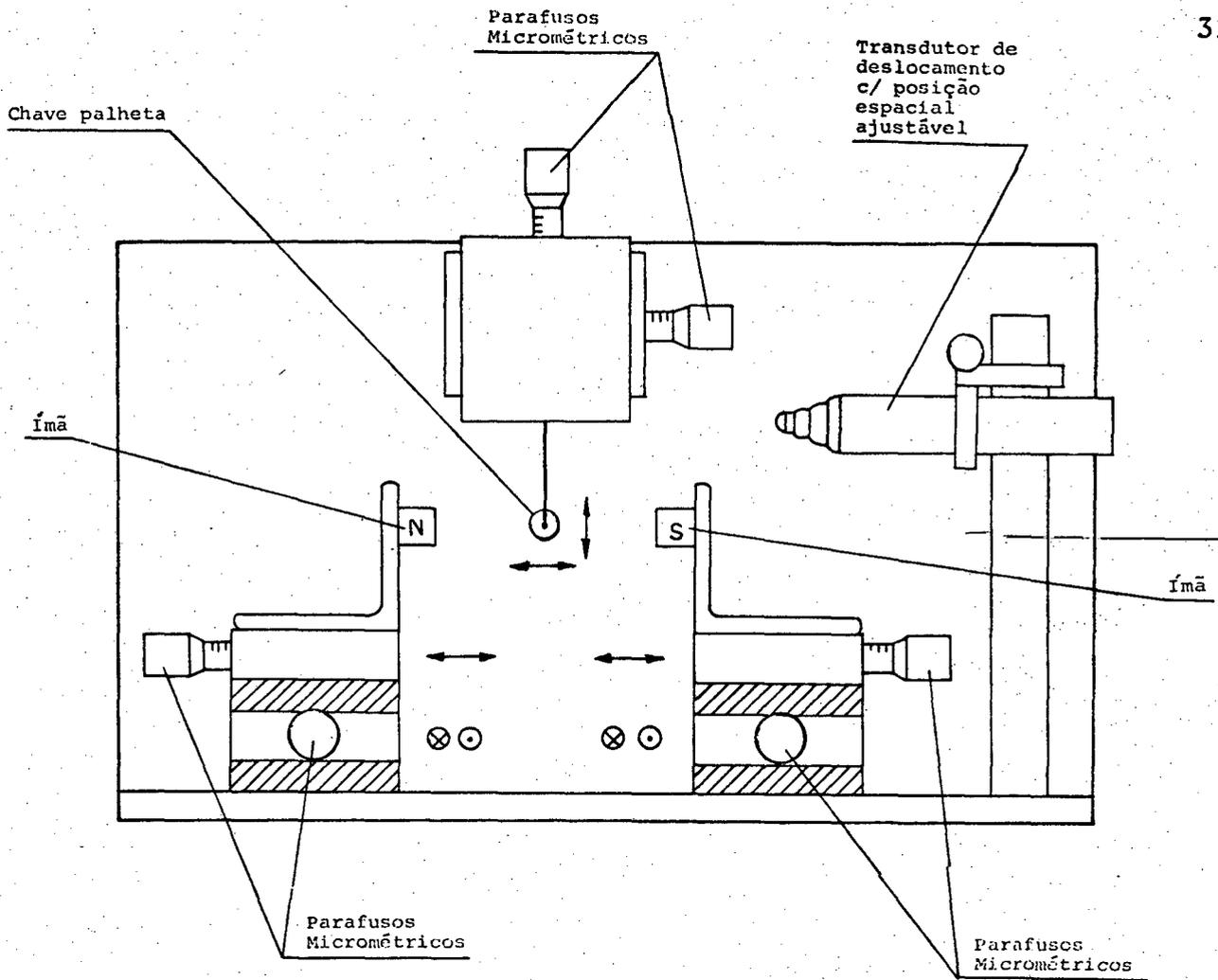


FIGURA 13 - Banco de ensaios

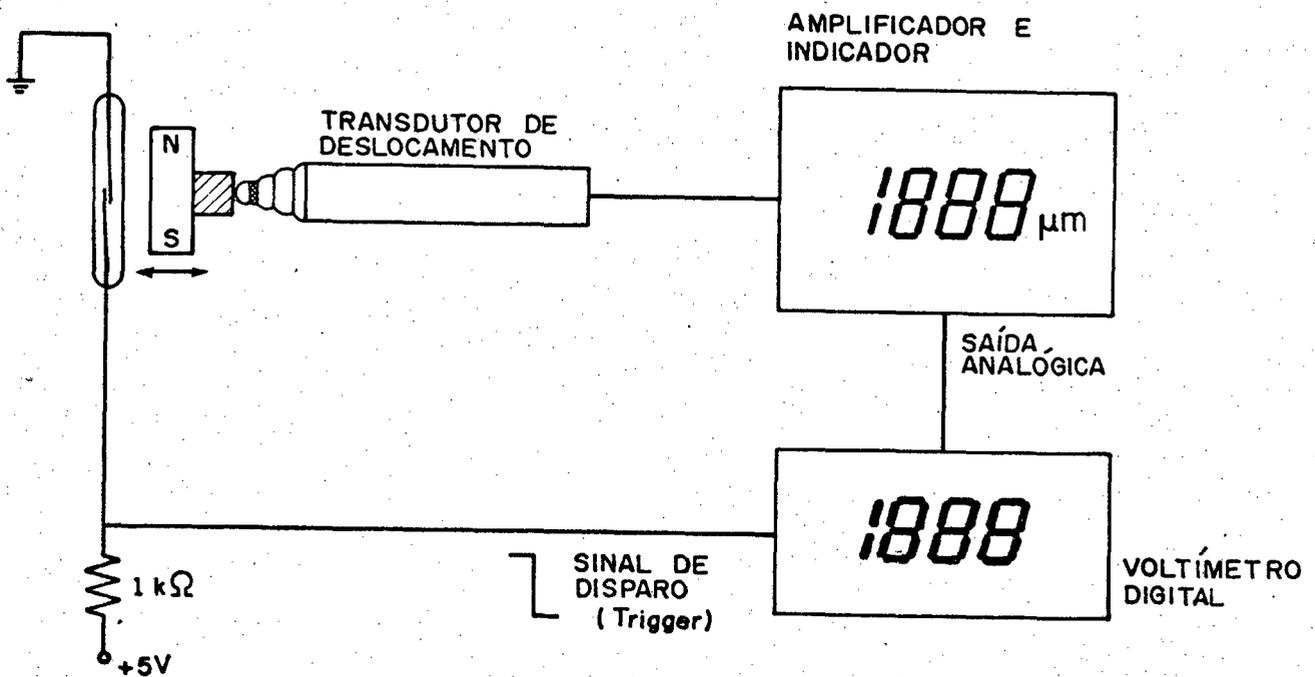


FIGURA 14 - Esquema básico do instrumental utilizado.

testes sobre o sistema magnético ímã/chave palheta, foram empregadas bases e dispositivos de fixação em alumínio.

2.2.2.2. INSTRUMENTAÇÃO EMPREGADA NO BANCO DE ENSAIOS

Em um ensaio de repetibilidade de posição de operação no qual se pretende estabelecer medições dentro da faixa de μm , especial atenção deve ser dedicada à determinação segura do instante da operação, reduzindo ao máximo o atraso no tempo de resposta do sistema de medição.

A solução adotada, com os equipamentos disponíveis, foi a utilização de um sinal proveniente da operação da chave palheta para "disparar" um voltímetro que permite a realização de 5700 medições por segundo ^[23]. Este voltímetro, ao receber o sinal de disparo, faz a leitura da tensão de saída de um sistema indutivo de medição de deslocamentos (fig.14).

O sistema indutivo de medição de deslocamentos tem resolução de $0,1 \mu\text{m}$ e repetibilidade menor que $0,5 \mu\text{m}$ ^[2].

O atraso no sistema eletrônico para implementação do sinal de disparo ^[35], no próprio voltímetro ^[23] e no sistema de medição ^[21] é desprezível frente à máxima velocidade que se consegue imprimir ao deslocamento de uma das mesas utilizadas, através de seu parafuso micrométrico.

2.2.3. ESTUDOS PARA OBTENÇÃO DA CONFIGURAÇÃO ÓTIMA DO CAMPO MAGNÉTICO EM RELAÇÃO À CHAVE PALHETA.

A seguir são mostradas várias configurações de posicionamento relativo ímã/chave palheta que foram estudadas com objetivo de:

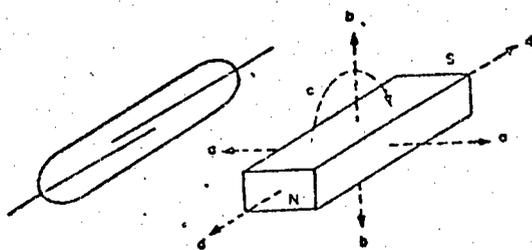
- Obter-se a máxima repetibilidade de posição de operação da chave palheta.
- Minimizar-se o efeito de pré-magnetização da chave palheta.

- Conseguir-se histerese de posição de operação da chave palheta menor que 1 mm e curso de deslocamento relativo superior a 10 mm (limitações impostas pelo sistema mecânico do apalpador).
- Otimizar-se a utilização dos ímãs e das chaves palheta para se obter o máximo de informações com o mínimo de componentes.

2.2.3.1. CONFIGURAÇÕES SIMPLES UTILIZANDO UM ÍMÃ E UMA CHAVE PALHETA.

Pela utilização de apenas uma chave palheta e um ímã trapezoidal formando um conjunto (fig.15), foi constatado que qualquer forma de deslocamento relativo entre eles implica histereses maiores que 1 mm e incerteza de posição de fechamento inferior a $\pm 5 \mu\text{m}$, dentro de um curto espaço de tempo.

Na tentativa de se simplificar ao máximo a execução mecânica nesta etapa dos trabalhos, não foram adotados os conformadores de fluxo magnético ("shuts"), com os quais se poderia impor regiões de alto gradiente de fluxo magnético.



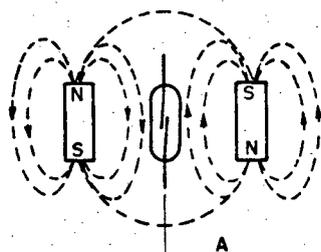
Movimentos do ímã em relação à chave palheta:
 a, b) perpendicular
 c) de rotação
 d) paralelo

FIGURA 15 - Configuração utilizando uma chave palheta e um ímã permanente.

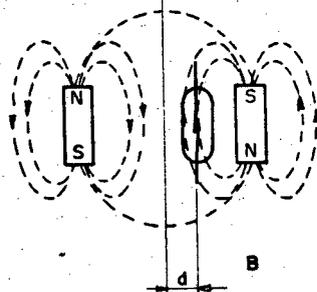
Esta configuração, embora de fácil implementação, não satisfaz as condições preestabelecidas.

2.2.3.2 UTILIZAÇÃO DE DOIS ÍMÃS E UMA CHAVE PALHETA

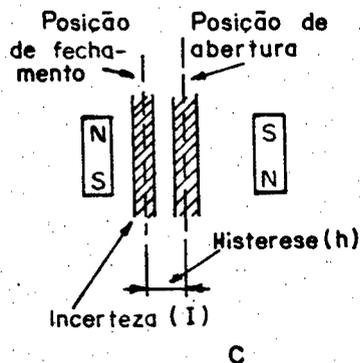
É de se esperar que haja pequena histerese e grande repetibilidade de posição de operação em uma região espacial que apresente um grande gradiente de fluxo magnético. Consegu-se um grande gradiente de fluxo magnético, por exemplo, utilizando-se uma configuração com dois ímãs em paralelo, como polarização inversa, conforme a fig.16.



(A) - Chave palheta com o contato aberto



(B) - Chave palheta com o contato fechado



(C) - Identificação dos pontos de acionamento.

FIGURA 16- Configuração com dois ímãs permanentes e uma chave palheta.

Considere-se o movimento relativo entre os ímãs e a chave palheta ao longo da direção perpendicular ao eixo longitudinal da chave. Quando a chave palheta está na posição central, o fluxo magnético que a envolve é aproximadamente zero. O estado da chave nesta condição é de contato aberto. Ao se aproximar a chave palheta de qualquer dos dois ímãs, ocorre o fechamento do contato.

Através desta montagem foi possível comprovar experimentalmente a redução da histerese e o aumento da repetibilidade de posição de operação da chave palheta com o aumento do gradiente do fluxo magnético, conseguido pela aproximação dos dois ímãs. Os resultados experimentais estão mostrados no quadro 5.

QUADRO 5 - Repetibilidade de posição de fechamento e histerese para uma chave palheta colocada entre dois ímãs. (Ver fig.16c).

AFASTAMENTO ENTRE ÍMÃS "a" (mm)	REPETIBILIDADE DE POSIÇÃO(95%) (μ m)	HISTERESE "h" (mm)
15	$\pm 2,0$	0,7
10	$\pm 1,5$	0,5
7	$\pm 1,2$	0,3

Limitada pelo mínimo deslocamento relativo admitido, a distância entre os dois ímãs não pode ser inferior a 10mm. Nesta configuração apareceram influências consideráveis de pré-magnetização, causada pela aproximação da chave palheta de um dos ímãs, na posição de fechamento próximo ao outro ímã. Para tempos pré-magnetizantes de poucos segundos, observaram-se mudanças superiores a 12 μ m na posição de fechamento da chave palheta.

A repetição do experimento por quatro vezes, com ciclos de dez medições, deu confiabilidade necessária aos dados obtidos, podendo-se afirmar a existência de grande influência da pré-magnetização das palhetas na posição de chaveamento.

2.2.3.3. UTILIZAÇÃO DE CONFORMADORES DE FLUXO MAGNÉTICO

Com o objetivo de se conseguir uma região de operação com grande gradiente de fluxo magnético e de se reduzir a influência da magnetização da chave palheta, foi montada uma configuração utilizando um conformador de fluxo magnético de aço, de forma retangular (fig.17).

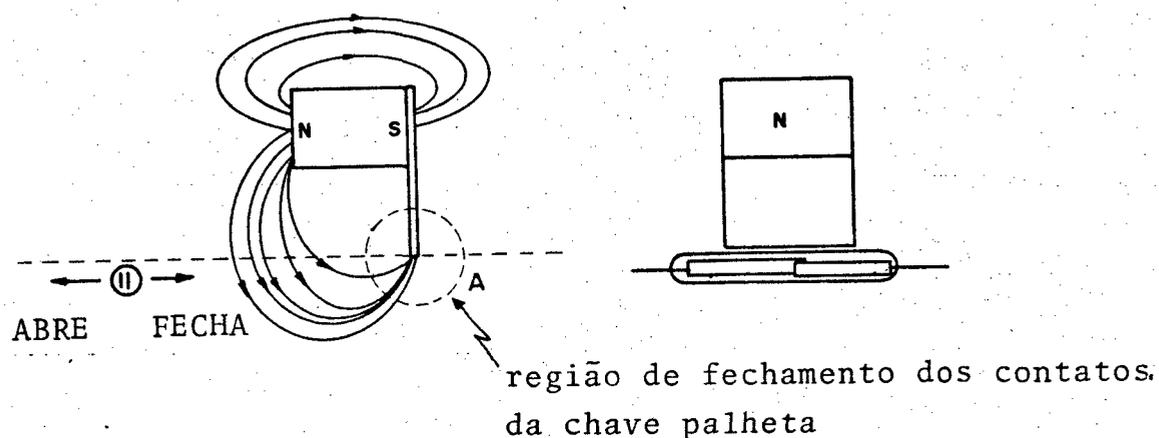


FIGURA 17 - Configuração utilizando conformador de fluxo magnético.

Somente quando a chave palheta se aproxima da região "A" ocorre o fechamento do contato. Observa-se uma redução bastante acentuada na histerese de operação quando a abertura ocorre com deslocamento da chave no sentido do pólo norte, conforme indicado na fig.17. Se a abertura é feita em sentido contrário, obtém-se histerese superior a 8mm.

Melhoras significativas puderam ser conseguidas em relação às situações anteriores. Conseguiu-se uma histerese menor que 0,2 mm e uma incerteza, na posição de fechamento, de 1,2 μ m para curtos intervalos de tempo (segundos).

O estudo de diversas situações derivadas da anterior, tentando-se reduzir a incerteza na posição de fechamento, e obter o máximo de informações, ou seja, o máximo de estados da chave palheta por sistema constituído, e ainda minimizar o efeito da

pré-magnetização das palhetas, não levou a resultados significativos. O efeito da pré-magnetização introduziu alto grau de incerteza na posição de operação das chaves.

2.2.3.4 UTILIZAÇÃO DE UM ÍMÃ E DUAS CHAVES PALHETA (Configuração final adotada)

O resultado de todos os ensaios anteriores conduziram à configuração mostrada na fig.18.

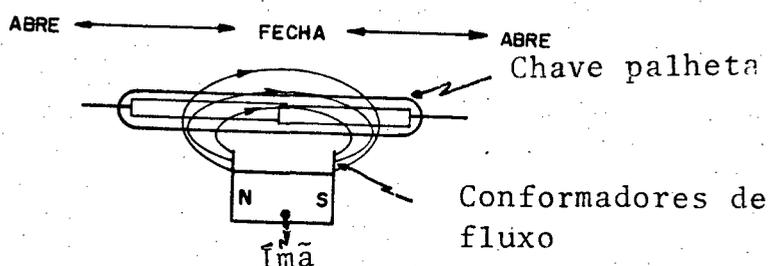


FIGURA 18 - Configuração final adotada.

Nesta configuração, os terminais da chave estão afastados do ímã e as placas de contato estão sempre magnetizadas no mesmo sentido, reduzindo os efeitos da pré-magnetização.

Os testes iniciais mostraram resultados surpreendentes de incerteza de posição de fechamento: menores que $\pm 2,5 \mu\text{m}$ para permanência do ímã em diversas posições em relação à chave palheta, por tempos superiores a 5 minutos.

Com esta configuração, foram conseguidos os melhores resultados em termos de histerese ($< 0,1\text{mm}$) e de repetibilidade de posição de fechamento, em relação aos outros ensaios realizados em condições idênticas.

Foram excelentes os resultados nos ensaios em que se simulou a operação do sistema ímã/chave palheta da forma que poderá ser estabelecida na utilização do apalpador, ou seja, com permanência de segundos na posição contrária de fechamento ou vindo de uma posição de repouso com o contato aberto. Conseguiu-se incerteza de posição de fechamento menor que $\pm 1 \mu\text{m}$ para ciclos de 15 (quinze) chaveamentos consecutivos, e de $\pm 0,5 \mu\text{m}$ entre os valores

médios de 7 (sete) ciclos realizados em uma hora, mantendo-se a temperatura ambiente com uma variação de ± 1 K.

Com o correto posicionamento de duas chaves palheta em relação a um ímã, pôde-se obter sinais de fechamento em dois sentidos sobre uma direção de movimento, otimizando a utilização dos ímãs (fig. 19).

Os resultados dos ensaios desenvolvidos ao longo de 116 horas, com a realização de 6 ciclos de 12 medições, estão mostrados no quadro 6.

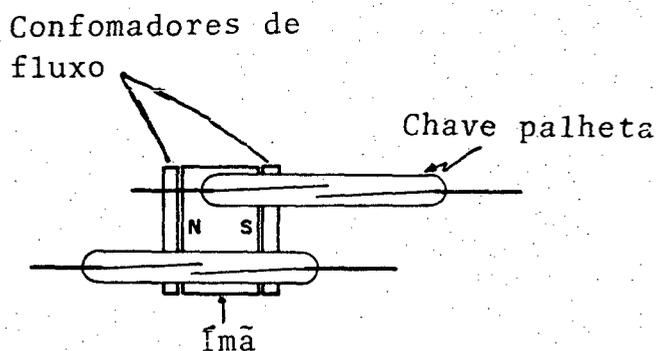


FIGURA 19 - Configuração final utilizando duas chaves palheta.

QUADRO 6 - Repetibilidade de posição de fechamento ao longo do tempo para a configuração definitiva.

CRONOMETRAGEM	TEMPERATURA (°C)	POSIÇÃO DE FECHAMENTO (μm) - MÉDIA DE 12 LEITURAS	INCERTEZA (2σ) (μm)
1º dia hora zero	23,4	0,0	0,4
1º dia 2ª hora	24,0	0,1	0,5
2º dia 21ª hora	23,2	-0,2	0,3
2º dia 26ª hora	22,6	0,0	0,3
3º dia 44ª hora	23,2	0,2	0,3
6º dia 116ª hora	24,1	1,9	0,4

Resultados do ensaio:

Duração do ensaio: 116 horas
 Variação da temperatura: ±0,7 K
 Variação da posição de fechamento: ±1,0 μm
 Incerteza da posição de fechamento: ±0,5 μm

Os excelentes resultados alcançados em relação às outras configurações e a sua simplicidade construtiva levaram à adoção desta configuração para implementar o apalpador ligador. Testes mais completos de desempenho serão abordados no capítulo 3 do presente trabalho. Na figura 20 mostra-se a configuração de um dos módulos do apalpador.

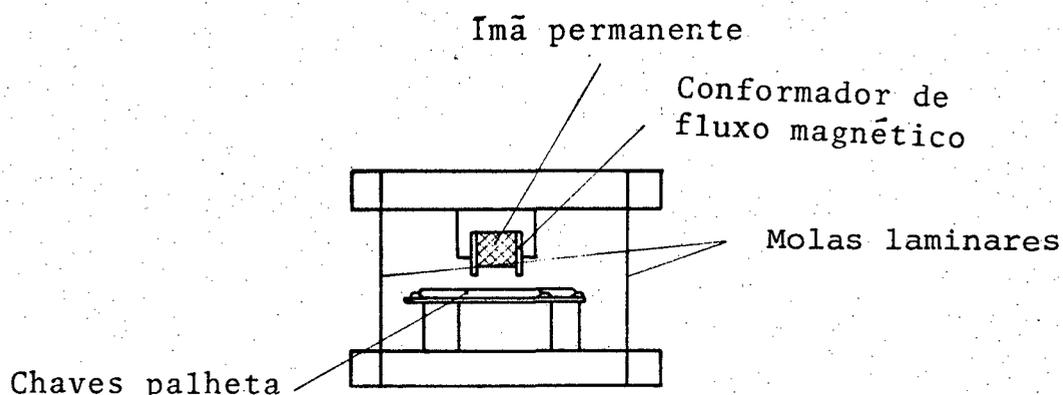


FIGURA 20 - Configuração final aplicada a um dos módulos do apalpador

Pela utilização de um conjunto formado por um ímã e duas chaves palheta para cada um dos três módulos mecânicos elementares do apalpador, pôde-se obter sinais diferentes nos seis sentidos distintos de movimento. Para aplicações normais em máquinas-ferramenta não há grandes vantagens. Existe, no entanto, a possibilidade de mapeamento espacial de uma peça e de aplicações em linhas de montagem que utilizem elementos robotizados, quando, então, podem ser determinados a direção e o sentido de aproximação.

Para diferenciar os sentidos, foram utilizados comparadores de nível de tensão que permitem, a partir de um circuito divisor de tensão resistivo, determinar em qual das chaves palheta ocorreu o fechamento. Desse modo, é preciso fazer o desacoplamento de apenas um sinal do apalpador.

Foram estudadas diversas formas de desacoplamento dos sinais, obtendo-se sucesso nos ensaios de sistemas indutivos e capacitivos. A forma definitiva a ser utilizada foge dos objetivos do presente trabalho.

Em função do preciso posicionamento do apalpador na máquina-ferramenta, optou-se, no presente estágio, por uma ligação através de um conector bipolar comum, utilizado em áudio. A adaptação final, no entanto, deve ser cuidadosamente estudada.

2.3. DESENVOLVIMENTO DE UM APALPADOR MEDIDOR.

2.3.1 ELEMENTOS BÁSICOS DO APALPADOR MEDIDOR

O mesmo sistema mecânico do apalpador ligador foi empregado para transmitir os movimentos do sensor para um cubo de aço colocado nas proximidades de um elemento fixo da máquina-ferramenta. Os movimentos do cubo são medidos nas três direções coordenadas, utilizando transdutores de deslocamento sem contato, que estão fixos à máquina-ferramenta; desaparece, assim, a necessidade de desacoplamento de sinais^[22]. (fig.21)

Não se desenvolveu um sistema de medição de deslocamento próprio por haver já um sistema pronto, o qual foi inicialmente testado^[16]. Suas características são dadas no item 2.3.3.

Não são conhecidas aplicações similares àquela que se propõe para estes sistemas. Por esta razão, foram realizados ensaios com o sistema disponível, para determinar o seu grau de aplicabilidade na implementação de apalpadores do tipo medidor.

Através da construção de um modelo simples de transdutor, para utilização com um sistema de medição semelhante, ficou provada a relativa facilidade de implementação futura de um sistema de medição próprio.

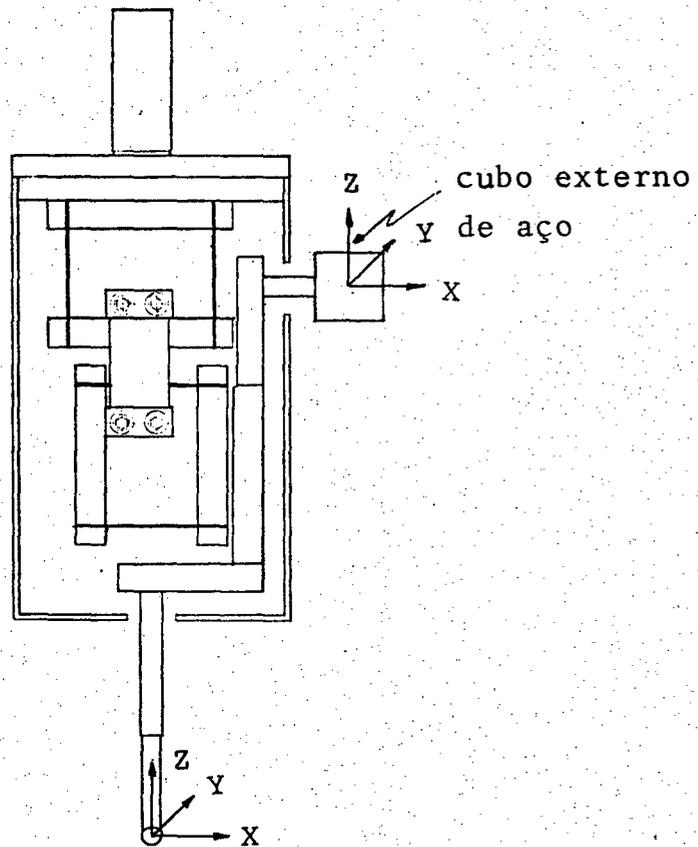


FIGURA 21 - Bloco externo ao apalpador para utilização de sistemas de medição de deslocamento sem contato.

2.3.2. - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS BASEADO NAS CORRENTES DE FOUCAULT.

Os transdutores de deslocamento sem contato, baseados neste princípio, sentem a variação das perdas por correntes de Foucault, que acontecem em uma superfície metálica quando esta se aproxima do campo magnético de uma bobina excitada com um sinal de radiofrequência (> 1 MHz). Estas perdas, embora proporcionais, não variam linearmente com a distância da peça à bobina, podendo, no entanto, ser linearizado o sinal proporcional obtido^[24].

A fig.22 mostra o esquema geral de um sistema de medição deste tipo. A excitação da bobina do transdutor é feita normalmente por um oscilador em uma configuração COLPITTS^[24].

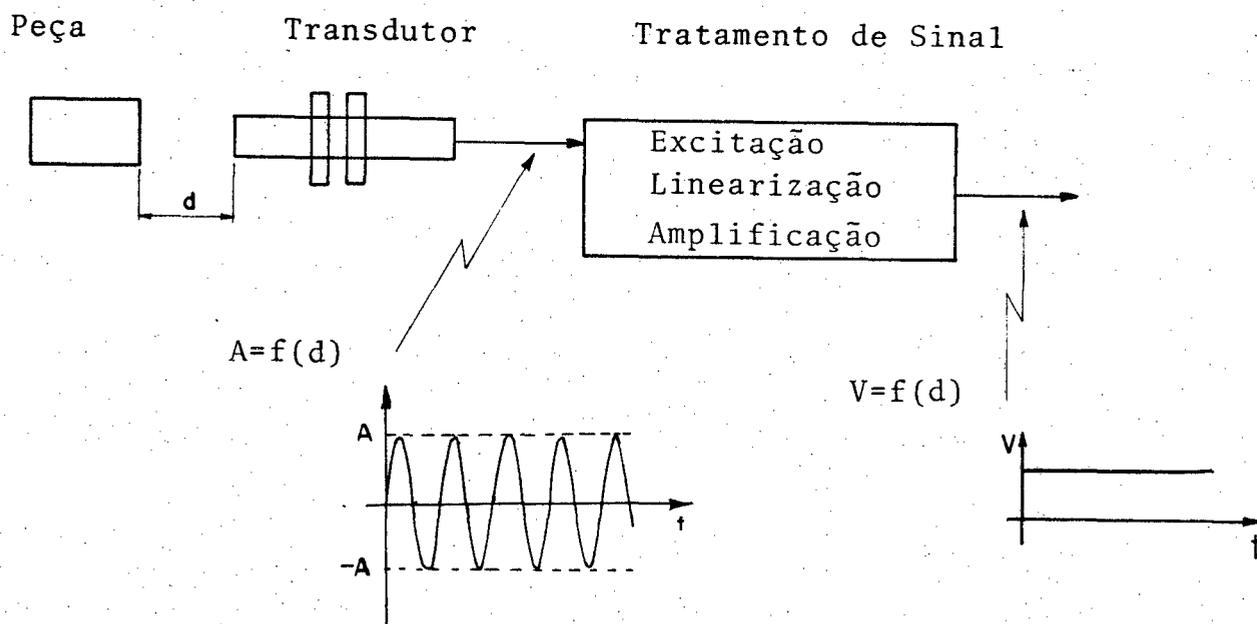


FIGURA 22 - Esquema geral de um sistema de medição de deslocamento baseado nas correntes de Foucault.

Sendo \vec{dB} o vetor densidade de fluxo magnético devido ao elemento infinitesimal $d\ell$ da espira, pela lei de Bio-Savat ^{|25|},

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\ell \sin \theta_1}{r^2} \quad (2)$$

no eixo da espira:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 i}{4\pi r^2} d\ell \quad (3)$$

e o componente longitudinal da densidade de fluxo magnético é:

$$B_z = \frac{\mu_0 i b^2}{2r^3} \quad (4)$$

b) Cálculo da densidade de fluxo nas extremidades do eixo de um solenóide (fig. 24).

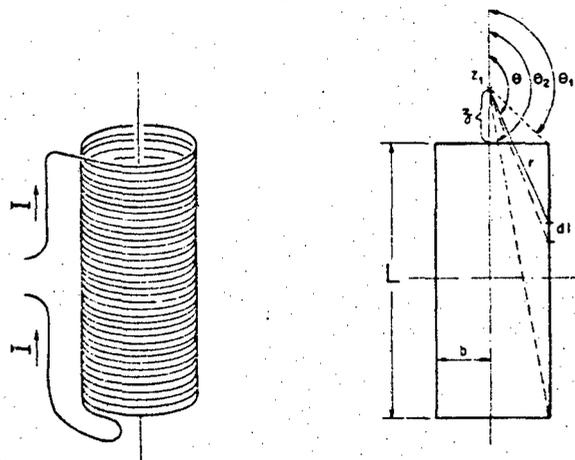


FIGURA 24 - Densidade do fluxo nas extremidades do eixo de um solenóide

$$d\ell = \frac{r d\theta}{\text{sen } \theta} \quad (5)$$

a corrente no anel de largura $d\ell$ é:

$$I n d\ell = \frac{I n r d\theta}{\text{sen } \theta} \quad (6)$$

a densidade de fluxo $d B_z$ devida à corrente do anel de largura $d\ell$ é:

$$d B_z = \frac{\mu_0}{2} n I (\text{sen } \theta) d\theta \quad (7)$$

de onde sai, assumindo-se o comprimento "L" do solenóide e seu raio "b" muito maiores do que a distância "Z" entre este e o ponto considerado:

$$B_z = \frac{\mu_0 n I}{2} \left(\frac{L}{(L^2 + b^2)^{1/2}} - \frac{Z}{b} \right) \quad (8)$$

Note-se que a equação 8 vale, em função do que foi assumido anteriormente, para pontos sobre o eixo do solenóide e próximos deste.

c) Cálculo das perdas numa chapa condutora próxima ao solenóide (Fig. 25)

Admite-se que:

- c1 - A região que contribui para as perdas é o círculo de raio igual ao do solenóide, tendo como centro o seu ponto de intersecção com o eixo do solenóide.
- c2 - A densidade de fluxo cortando o plano da chapa é uniforme e igual à densidade de fluxo B_z calculada para um ponto central do círculo considerado.

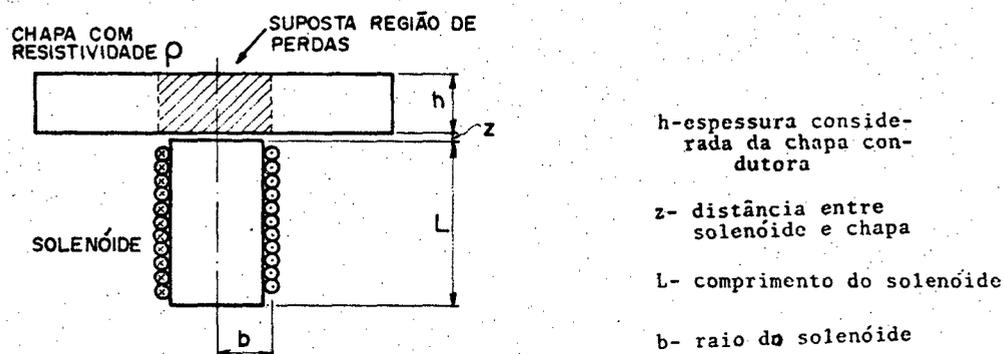


FIGURA 25 - Perdas numa chapa condutora próxima de um solenóide.

O campo elétrico E_y sobre uma circunferência de raio y é dado por ^[25]:

$$E_y = \frac{1}{2\pi y} \frac{d\phi}{dt} \quad (9)$$

onde ϕ é o fluxo magnético que atravessa a circunferência considerada.

Então:

$$E_y = \frac{y}{2} \frac{dB_z}{dt} \quad (10)$$

A densidade de corrente ao longo da circunferência de raio y é dada por ^[25]:

$$J_y = \frac{E_y}{\rho} \quad (11)$$

onde ρ é a resistividade do material da chapa condutora.

A potência dissipada na região afetada pelas correntes de Foucault ^[25] é:

$$P = \int_V J_y E_y dV \quad (12)$$

Integrando-se sobre o volume "v" considerado da chapa condutora,

$$P = \frac{\pi h b^4}{8\rho} \left(\left(\frac{L}{\sqrt{L^2 + b^2}} - \frac{z}{b} \right) \frac{\mu_0 N}{2L} \right)^2 - I_0^2 \omega^2 \cos \omega^2 t \quad (13)$$

Definindo-se \underline{m} e \underline{a} como:

$$m = \frac{\mu_0 N}{2} (L^2 + b^2)^{1/2} \quad (14)$$

$$a = \frac{\mu_0 N}{2L b} \quad (15)$$

tem-se a potência média como:

$$P_{\text{média}} = \frac{\pi h b^4 I_0^2 \omega^2}{16\rho} (m^2 - 2a m z + a^2 z^2) \quad (16)$$

Da equação 16 podem ser tiradas conclusões em relação à potência dissipada, tais como:

- a) Ela decresce parabolicamente com a distância da chapa à extremidade da bobina (z).
- b) É diretamente proporcional ao quadrado da frequência (ω).
- c) É inversamente proporcional à resistividade do material (ρ).
- d) É diretamente proporcional à quarta potência do raio da bobina (b).

É de se esperar que a potência dependa da temperatura, principalmente pela variação da resistividade do material.

No quadro 7 podem ser vistas as variações da resistividade com a relação à temperatura, para vários materiais [26]. Por outro lado, pode-se observar que não há influência da constituição do meio onde o sistema está colocado. Isto é uma vantagem para a utilização em máquinas-ferramenta, nas quais existem constantes variações do meio.

QUADRO 7 - Variação da resistividade de materiais condutores com relação à temperatura.

	Resistividade (a 20°C) ohm·m	Coefficiente de Temperatura da Resistividade*, α , (K ⁻¹)
Alumínio	$2,8 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Cobre	$1,7 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Carbono (amorfo)	$3,5 \times 10^{-5}$	-5×10^{-4}
Ferro	$1,0 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-3}$
Manganina	$4,4 \times 10^{-7}$	1×10^{-5}
Níquel	$6,8 \times 10^{-8}$	6×10^{-3}
Prata	$1,6 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-3}$
Aço	$1,8 \times 10^{-7}$	3×10^{-3}
Tungstênio	$5,6 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-3}$

* Esta grandeza, definida por

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

corresponde à variação relativa da resistividade ($d\rho/\rho$) dividida pelo acréscimo correspondente de temperatura (dT). Ela é uma função da temperatura, sendo os valores da tabela acima referentes à temperatura de 20°C.

2.3.3 - CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA DISPONÍVEL QUE OPERA PELO PRINCÍPIO DE CORRENTES DE FOUCAULT.

Conforme citado no item 2.3.1, foi escolhido para implementação do apalpador medidor um sistema de medição de deslocamentos já disponível. Este sistema, segundo o seu fabricante [14], é compensado eletronicamente em temperatura, e é linearizado também eletronicamente.

São dados complementares constantes do manual do equipamento:

- Faixa linear de utilização: 2 mm
- Região central de linearidade: 1,2 a 1,5 mm da superfície do transdutor.
- Diâmetro da bobina: 5 mm
- Sensibilidade média: $-8 \text{ mV}/\mu\text{m}$
- Tensão de alimentação: $-16,5$ a -26 V
- Tensão de saída: $-1,5$ a -20 V
- Frequência de oscilação: 1 MHz
- Frequência de utilização: 0 a 10 kHz

2.3.4 - ALTERAÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS DISPONÍVEL.

O sistema de medição de deslocamentos empregado na construção do apalpador medidor apresenta uma característica de tensão de saída em função da posição relativa entre o transdutor e a peça da qual se vai medir o deslocamento, dada pela curva da figura 26.

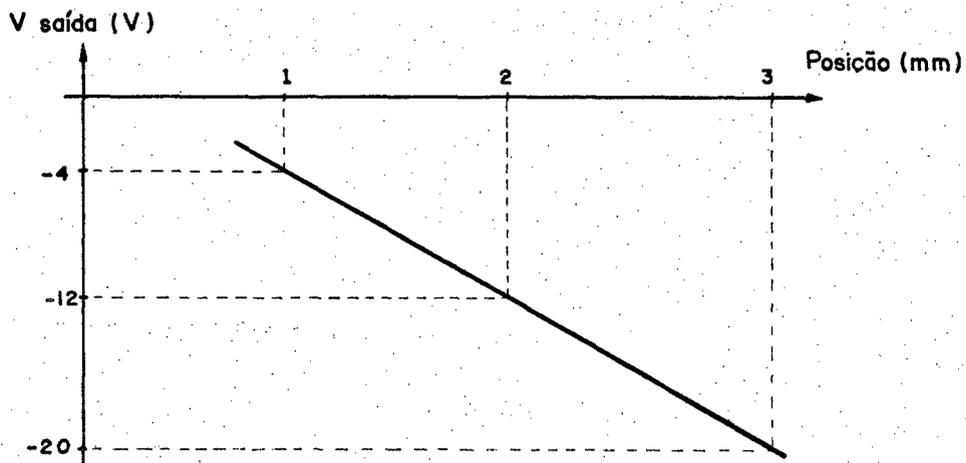


FIGURA 26 - Tensão de saída do sistema de medição de deslocamentos em função da posição relativa transdutor/peça

Para deslocar esta curva para uma faixa de tensões mais operacional, foi projetado e implementado um circuito eletrônico que permite a obtenção de tensões de saída entre + 10 Volts e - 10 Volts para qualquer faixa de operação escolhida em torno da região central da curva característica da fig.26.

Os erros introduzidos por este circuito eletrônico no sistema de medição, em função da variação da temperatura, foram determinados experimentalmente. O sistema de medição de deslocamentos, em sua forma original, apresenta uma deriva térmica da tensão de saída de 40mV/K, valor este determinado também experimentalmente, já que não consta dos manuais de equipamento.

A fig.27 mostra o esquema básico do circuito necessário para a alteração do nível e para a conveniente amplificação de um sistema de tensão. Tal circuito é constituído de uma fonte de tensão de referência, de um amplificador somador com um filtro passa-baixos incorporado e um amplificador não inversor^[27].

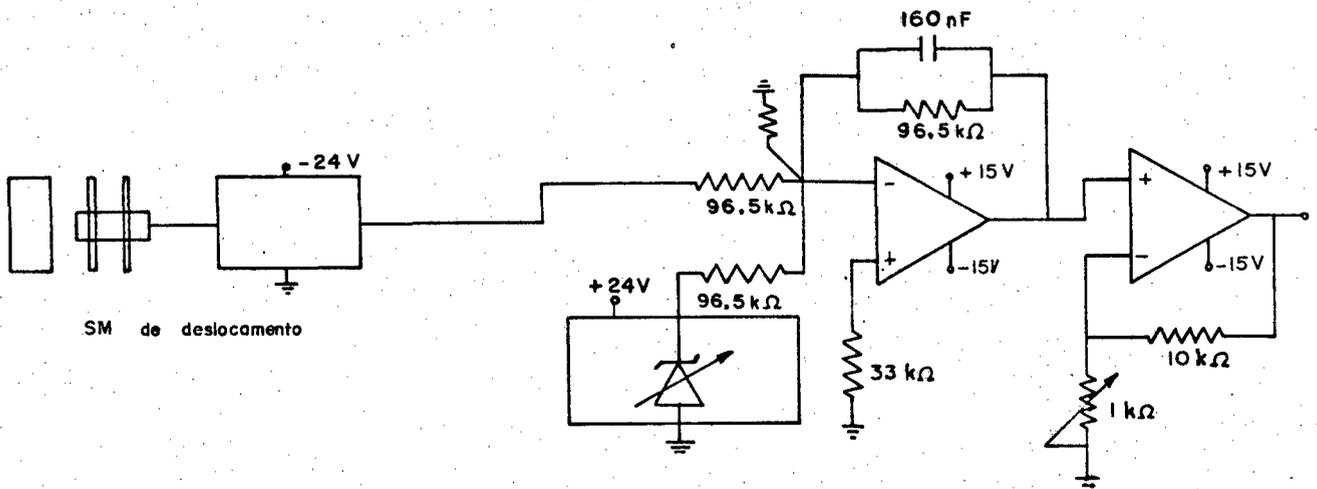


FIGURA 27 - Circuito para alteração e amplificação do nível de tensão.

2.3.4.1 FONTE DE TENSÃO DE REFERÊNCIA

Para possibilitar o deslocamento da região central da curva característica da fig.26 para zero Volts, a fonte de tensão de referência deve ser ajustável em torno dos 12 Volts. Adotou-se um ajuste mínimo entre 8 e 16 Volts.

Foi construída uma fonte a partir de um regulador integrado "723", que apresenta uma deriva térmica nominal máxima de 150 ppm/K ^{|29|}, que, para 16 V, correspondem a 2,4mV/K. Resultados experimentais forneceram 60 ppm/K, que, para 16V, correspondem a 1mV/K. ^{|31|}

2.3.4.2 AMPLIFICADOR SOMADOR

Na implementação do amplificador somador foi utilizado o amplificador operacional 741, por dispor de características satisfatórias ^{|30|} e por ser facilmente encontrável. A sua deriva térmica, obtida experimentalmente, foi de 0,4 mV/K, isto é, 100 vezes menor que a do sistema de medição de deslocamentos ^{|31|}.

2.3.4.3 AMPLIFICADOR NÃO INVERSOR.

Pelas razões colocadas no item anterior, foi novamente utilizado um amplificador operacional 741. O erro relativo na tensão de saída devido à razão de rejeição de modo comum do amplificador operacional não ser infinita, valendo para o 741 mais de 70 dB, é menor que 0,03 ppm ^{|30|}. Tal pode ser totalmente considerado na presente aplicação. Da mesma forma, a deriva térmica medida foi extremamente pequena, correspondendo a 36 μ V/K, referido à entrada ^{|31|}, sendo 1000 vezes menor que a correspondente deriva térmica do sistema de medição de deslocamentos na sua forma original.

2.3.4.4. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO CIRCUITO ELETRÔNICO PARA ALTERAÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO.

O quadro 8 apresenta um resumo dos resultados.

QUADRO 8 - Deriva térmica do circuito eletrônico para alteração do nível de tensão.

Deriva Térmica (mV/K)				
Sistema de Medição de Deslocamento	Sistema Eletrônico Construído			
	Fonte de Tensão de Referência	Amplificador Somador	Amplificador Não Inversor	Somatório das Influências do Circuito Eletrônico
40	0,4	1	0,04	<1,5

Pelos cálculos e pelos ensaios realizados, ficou constatado ser desprezível a soma dos erros introduzidos pelo sistema eletrônico em relação àqueles do próprio sistema de medição de deslocamentos.

Com o esquema adotado, o sistema fica com limitações dinâmicas acentuadas. Devido à máxima taxa de variação da tensão de saída ("slow rate") do amplificador operacional 741, que é de 0,5 V/ μ s, para a medição de deslocamentos ao longo de toda a faixa de operação com velocidade de 1500 mm/min, seria feito um erro de 1 μ m. Isto, sem ser considerado o tempo de recuperação da condição de saturação, se for o caso. Para a utilização em medições dinâmicas, deveria ser utilizado um amplificador operacional mais "rápido", como, por exemplo, o 118, com a adoção de circuitos que evitem a entrada do elemento na condição de saturação.

No projeto do filtro incorporado ao amplificador somador também devem ser consideradas as frequências limites envolvidas em cada utilização particular.

3. ENSAIO DE DESEMPENHO DO INSTRUMENTAL ELETROELETRÔNICO DOS APALPADORES

Foge dos objetivos do presente trabalho o ensaio do sistema mecânico dos apalpadores; por exemplo: flexão das molas de lâminas paralelas, força de medição, etc.. É do seu contexto, no entanto, a verificação das características metrológicas dos apalpadores devidas aos sistemas de transdução utilizados. Levando-se em conta a necessidade de elementos fixadores para o ímã e a chave palheta, de modo a possibilitar a realização dos deslocamentos relativos que irão ocorrer nas condições reais de utilização do apalpador, optou-se pelo teste de um de seus módulos. Para a realização dos testes foi montado um banco de ensaios, que permite estabelecer as condições seguintes, correspondentes aos fatores mais críticos na operação do apalpador:

- deslocamentos com velocidade ajustável;
- variações de temperatura.

Foram ensaiados, com relação às variações acima:

- o desempenho do sistema padrão utilizado, em especial do sistema de medição de deslocamentos;
- a repetibilidade de posição de operação de um módulo do apalpador ligador construído com utilização de duas chaves palheta e um ímã permanente;
- a sensibilidade do sistema de medição de deslocamentos proposto para utilização no apalpador medidor;
- a estabilidade do ponto "zero" do mesmo sistema.

3.1. CONSTRUÇÃO DE UM BANCO DE TESTES - ELEMENTOS PADRÕES

Como padrão de deslocamentos foi utilizado um sistema de medição indutivo com contato, com resolução de 0,1 μm e repetibilidade de 0,5 μm ^[21]. Para realizar os deslocamentos foi utilizado um excêntrico acoplado ao eixo de um motor. Através da rota

ção do excêntrico obteve-se um sinal senoidal de deslocamento em função do tempo. Para posicionamento angular do excêntrico foi utilizado um sistema de medição de deslocamento angular, digital incremental, com resolução de 0,036 graus ^{|32|}. Este último sistema foi utilizado devido ao fato de a posição angular não sofrer mudança com a temperatura, permitindo, portanto, repetir posições angulares idênticas sobre o excêntrico, independente dos efeitos da dilatação térmica; isto possibilita, inclusive, a determinação das características do sistema indutivo de medição de deslocamentos utilizado como padrão, sob condições diversas de temperatura.

Para a medição de tempo, a partir do qual foi determinada a velocidade de deslocamento, utilizou-se um registrador com pensador analógico ^{|33|}, cuja característica dinâmica é mostrada na fig. 28. Neste foi registrada a senóide correspondente ao deslocamento apresentado pelo sistema de medição indutivo tomado como padrão, em função do tempo. O registrador analógico pôde ser utilizado porque a máxima frequência empregada foi sempre inferior a 1,5 Hz, e a amplitude sempre inferior a 30mm. O ajuste da velocidade de deslocamento foi feito através do ajuste da velocidade angular do eixo de um motor universal, ao qual estava acoplado o excêntrico. O comando da velocidade angular do motor foi feito pela tensão aplicada sobre ele, utilizando-se um reostato (fig. 29).

Para controle da temperatura foram utilizados três termorresistores com ligação a quatro fios. A variação da temperatura foi simulada em uma estufa, considerando-se sempre um tempo de estabilização de 30 minutos.

Um sistema de aquisição de sinais ^{|34|} (fig.30) foi utilizado na aquisição e no tratamento matemático de todos os dados dos ensaios, bem como no controle da temperatura da estufa. O elemento central do sistema de aquisição de sinais (SAS) é um computador. Além do processamento matemático e estatístico, o computador, em diálogo com o operador, define os rumos do ensaio, controlando os demais elementos do SAS através de um barramento digital, que, para o sistema empregado, é um I-488.

Amplitude
máxima (mm)

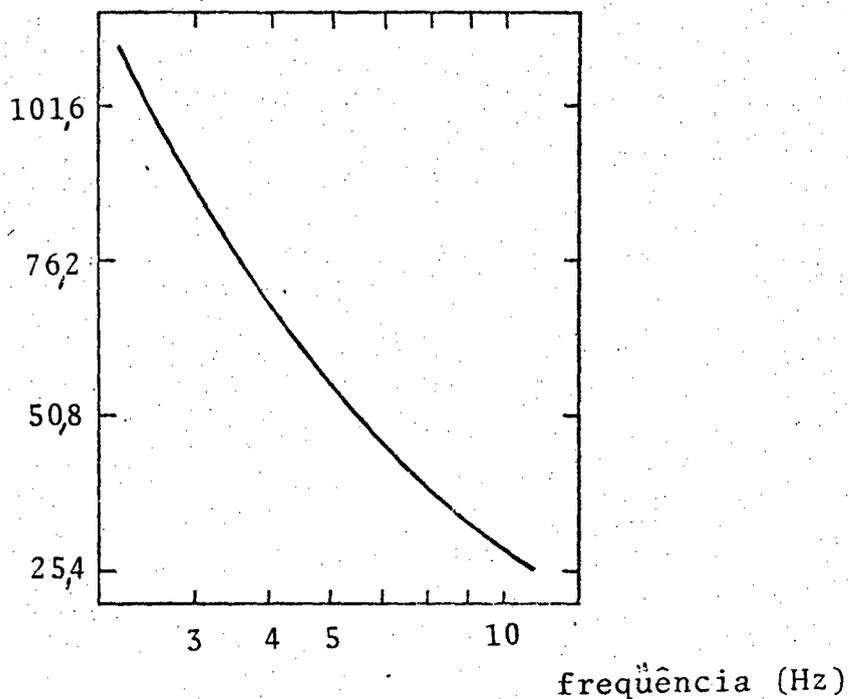


FIGURA 28 - Característica de amplitude máxima x frequência para o registrador analógico.

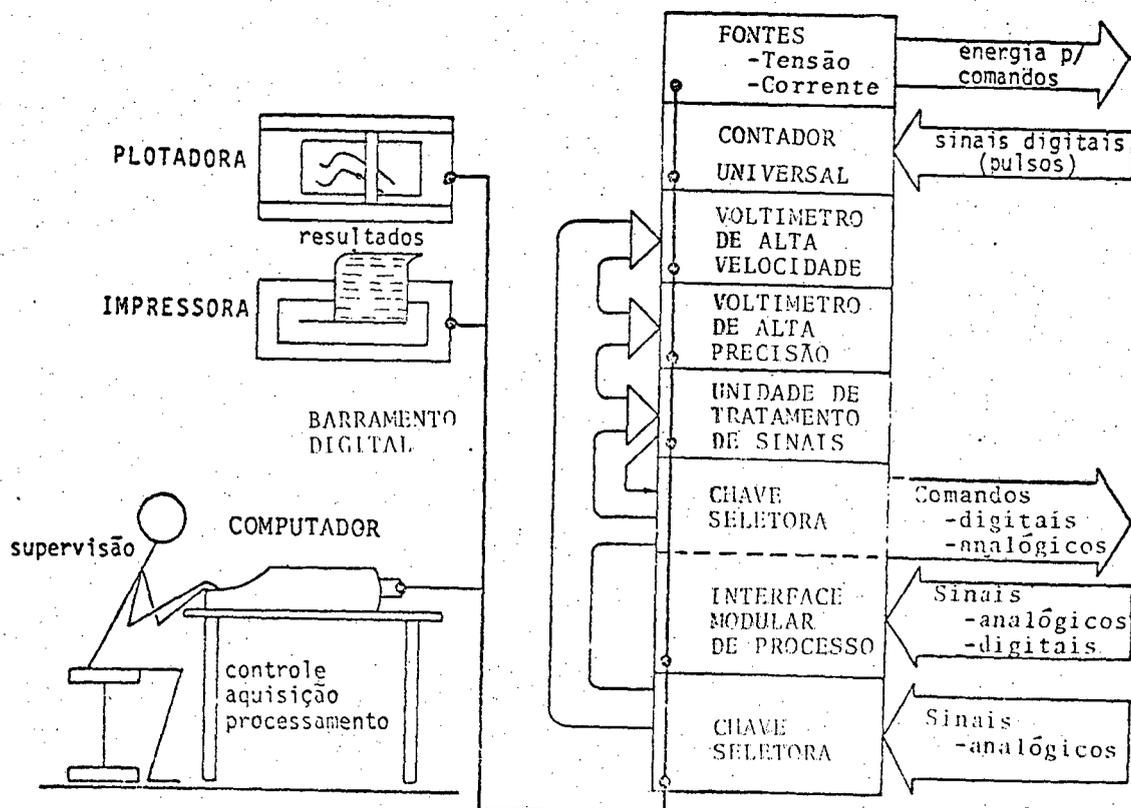


FIGURA 30 - Sistema de aquisição de sinais.

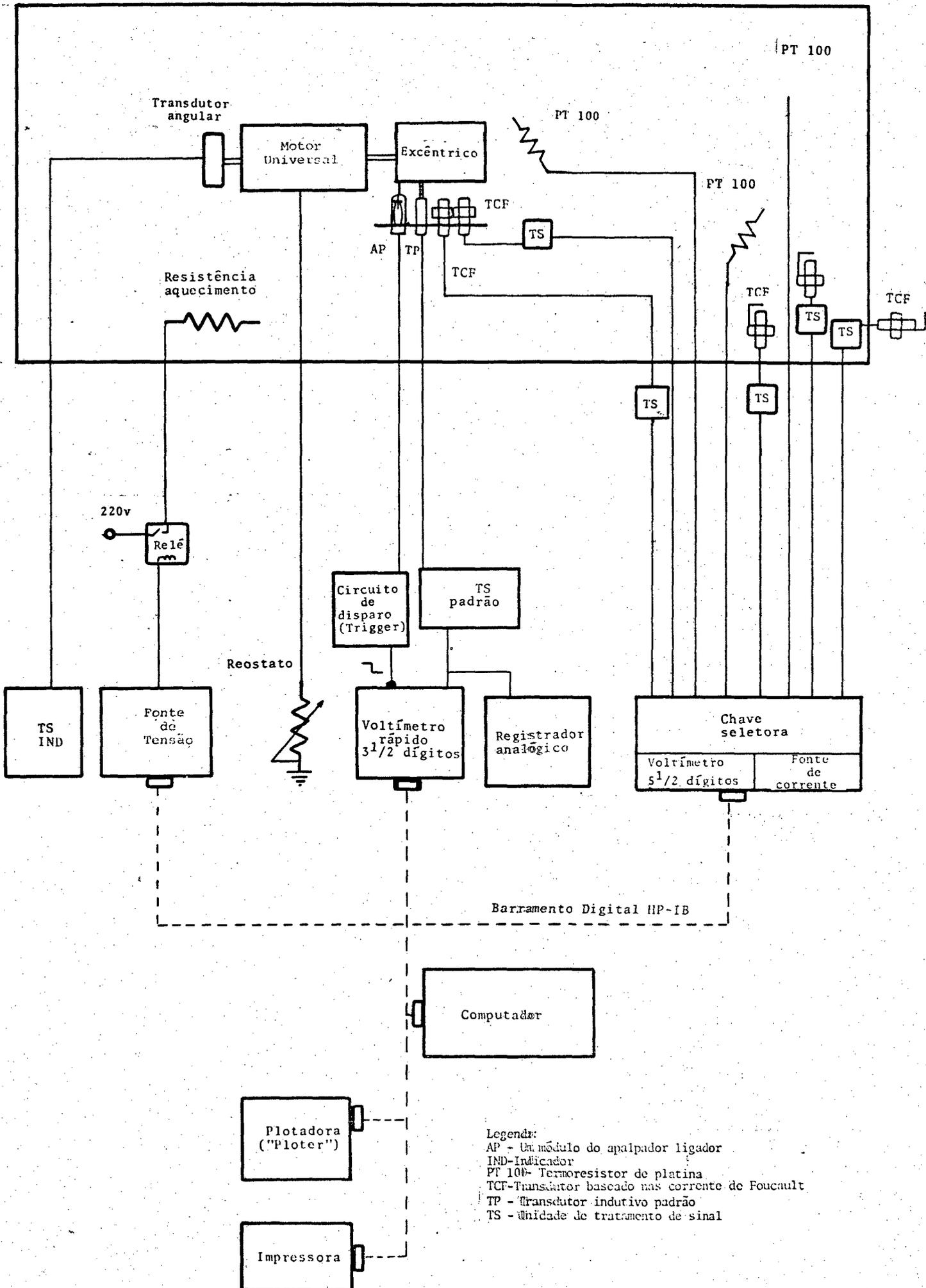


FIGURA 29 - Banco de testes.

Conversores analógico/digital e digital/analógico são utilizados para permitir, respectivamente, a aquisição de dados do processo e a atuação sobre este. No ensaio em questão eles foram utilizados na leitura da tensão proporcional às grandezas medidas pelos vários sistemas de medição empregados e no controle da temperatura da estufa, através da atuação sobre a sua resistência de aquecimento.

Para que um único conversor possa atender a diversos pontos de medição ou de atuação, é empregada uma unidade de multiplexação (chave seletora), que, dependendo da aplicação, é constituída de relés ou chaves semicondutoras ^{|37|}. No ensaio ora descrito foram utilizados, no total, 8 (oito) relés com baixa resistência de contato e baixa tensão termelétrica ^{|34|}.

Através da utilização de elementos como a plotadora ("plotter") e a impressora, obtiveram-se os dados do ensaio em sua forma definitiva, para a composição dos relatórios. São exemplos as figuras 33 e 35.

Por evitar a introdução de erros na transcrição de dados, na confecção de gráficos e mesmo na leitura de instrumentos de medição, a utilização do SAS aumenta a confiabilidade dos resultados e introduz grandes facilidades no tratamento dos dados e no controle das condições de ensaio.

3.2. EVOLUÇÃO DOS ENSAIOS E ANÁLISE DOS DADOS

Os ensaios dos sistemas sob teste foram simultâneos, de forma a se garantir as mesmas condições impostas a eles. Para facilitar a análise, no entanto, eles serão aqui tratados separadamente.

3.2.1. VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO PADRÃO DE DESLOCAMENTOS COM TEMPERATURA

Para determinação da estabilidade, com relação à temperatura, do sistema indutivo de medição de deslocamento, foram levantados os dados em função da temperatura para duas posições, de fachadas de 180 graus sobre o excêntrico, correspondentes ao seu máximo e mínimo deslocamento. Nessas situações, para excentricidade de, aproximadamente, 1 mm, a incerteza produzida no deslocamento, devida à resolução do sistema de posicionamento angular, foi calculada, e é menor que $2 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$. Este valor é facilmente determinado através do cálculo da variação da amplitude de uma senóide em 90° e 270° , ao se somar ou subtrair $0,036^\circ$, que corresponde à resolução do sistema de medição angular.

Os resultados dos ensaios, em função da temperatura, estão no quadro 9 |38|.

QUADRO 9 - Deslocamento medido pelo sistema de medição padrão em função da temperatura.

TEMPERATURA °C	DESLOCAMENTO MEDIDO (μm)
22,4	917
30,1	918
40,4	918
50,1	918

Faixa operação: 2000 μm
Resolução: 1 μm

Estes resultados levam a admitir que não existe influência significativa da temperatura sobre o sistema.

3.2.2. ENSAIOS DE UM DOS MÓDULOS DO APALPADOR LIGADOR

Foram feitos dois tipos de ensaios que complementam aqueles descritos no item 2.2.3. (Estudos para obtenção da configuração ótima do campo magnético em relação à chave palheta):

- verificação da influência da velocidade de deslocamento na posição de fechamento da chave palheta;
- verificação da influência da temperatura na posição de fechamento .

O módulo ensaiado aparece na fig. 31.

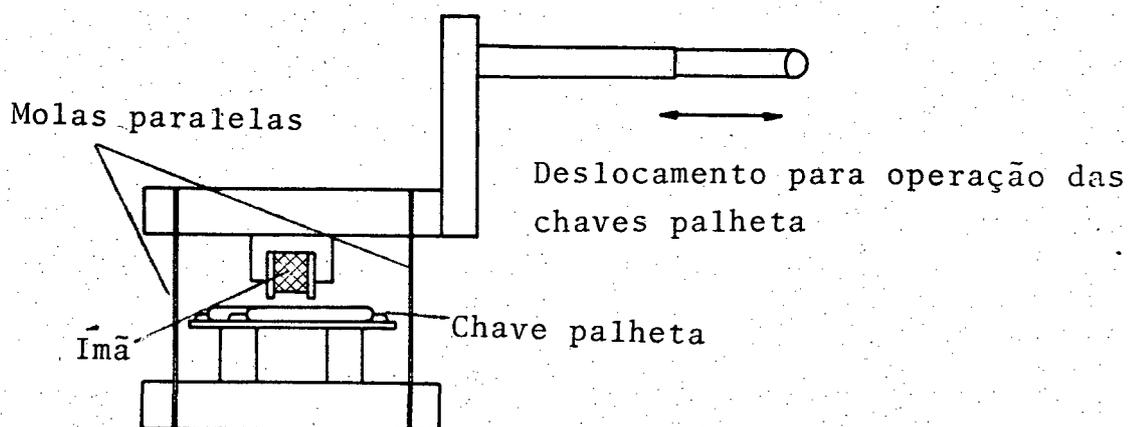


FIGURA 31 - Módulo ensaiado do apalpador ligador.

- a) - Influência da velocidade de deslocamento na posição de fechamento da chave palheta.

Para especificar a posição do excêntrico, através da qual pode ser determinada a velocidade no instante do fechamento, foi, inicialmente, feita a leitura da tensão do sistema indutivo de medição de deslocamentos por um voltímetro que permite a realização de 5700 medições por segundo ^{|23|}. Este voltímetro, no instante do fechamento da chave palheta, recebe um sinal de

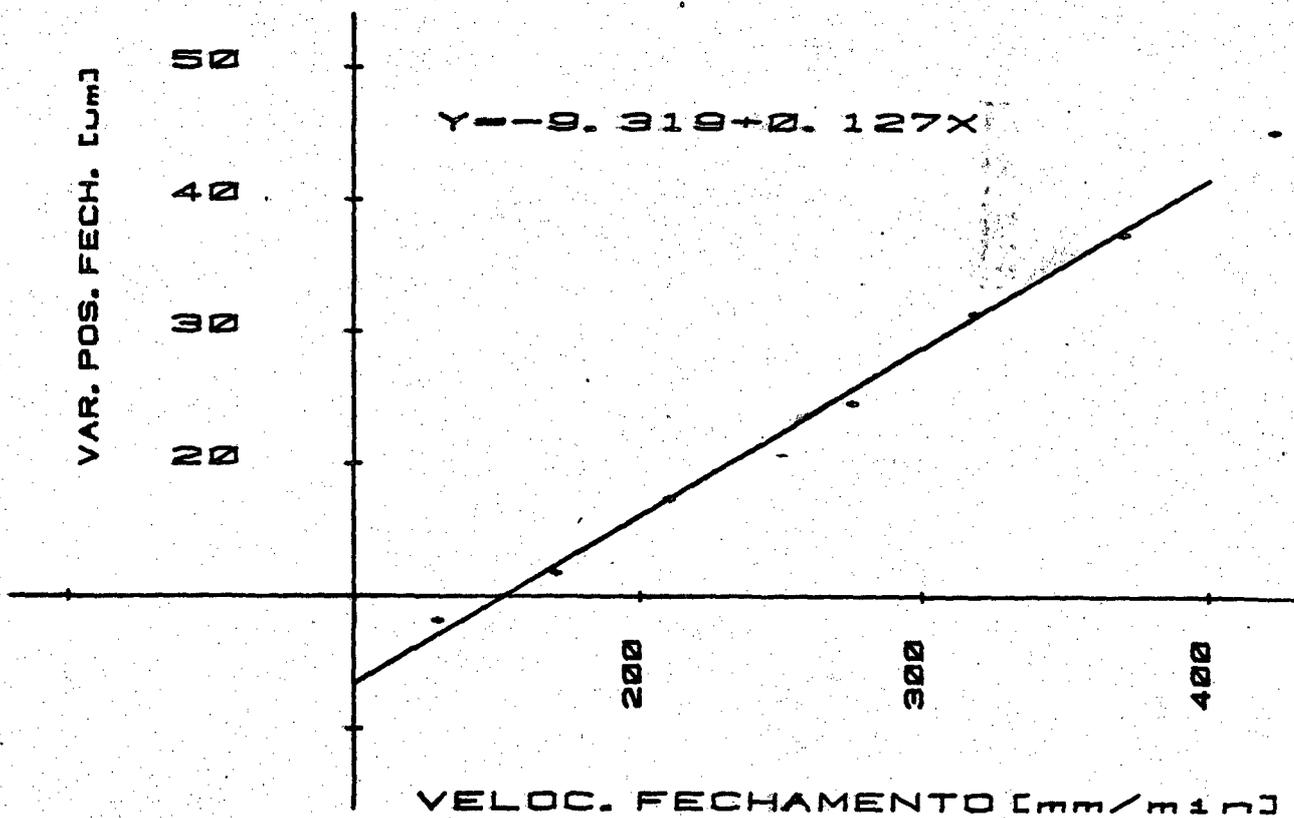
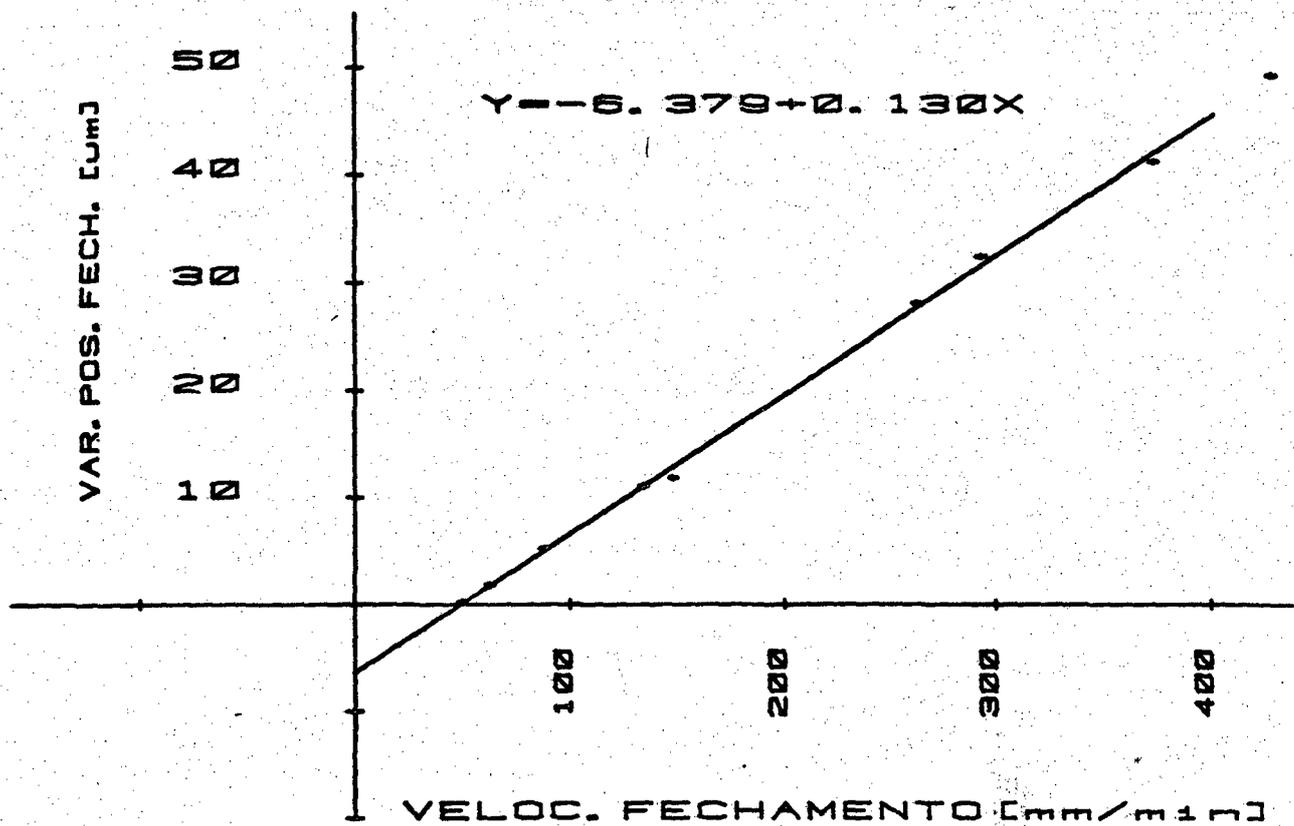


FIGURA 33 - Posição de fechamento dos contatos em relação à velocidade de deslocamento da haste do apalpador

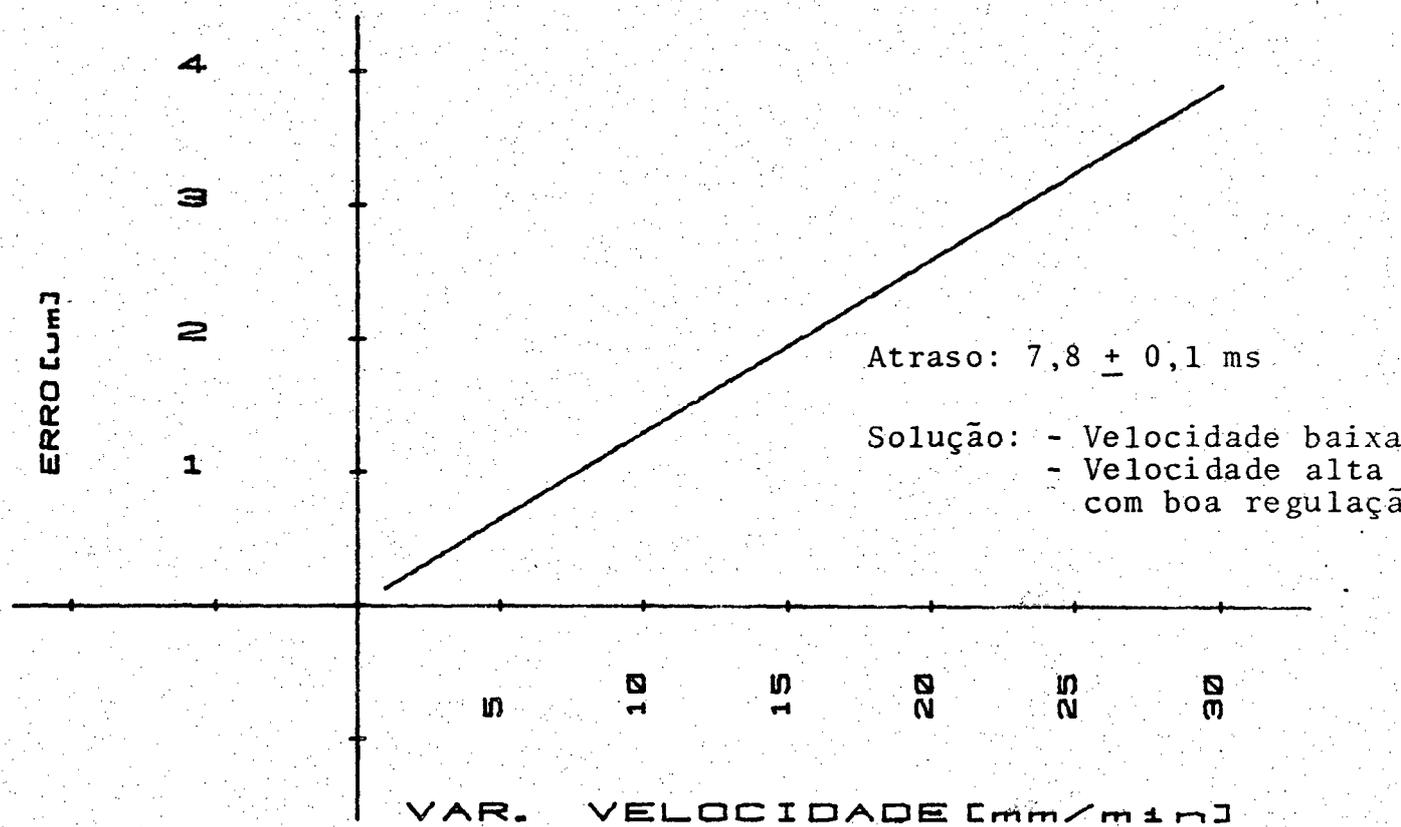


FIGURA 34 - Erro na medição com o apalpador ligador, em função da velocidade de medição.

A partir das curvas levantadas, pode-se observar um atraso de 7,8 ms no fechamento da chave palheta. Propõe-se a partir do que se apresenta aqui, em futuras pesquisas, um ensaio com variação do fluxo magnético para verificar a possibilidade de redução de tal atraso.

Para se utilizar o apalpador com precisão espacial de $\pm 2 \mu\text{m}$, é necessário manter a variação da velocidade dentro da faixa de $\pm 15\text{mm/min}$. Normalmente, a faixa de variação da velocidade em máquina-ferramenta com comando numérico é bastante pequena, principalmente se se considerar que, no instante de utilização do apalpador, ela estará trabalhando a vazio, de forma que será relativamente fácil, manter-se dentro desses limites ^[36]. A fig.34 mostra a máxima variação admissível da velocidade de operação do sistema com erro prefixado na medição com o apalpador.

Duas são as possibilidades de se operar com erros pequenos:

- utilizar velocidade baixa;
- utilizar velocidade alta, porém com regulação suficiente.

Nesta última condição, o atraso vai aparecer como erro sistemático, eliminável na medição diferencial ou compensável através de uma medição inicial de referência.

b) - Influência da temperatura na posição de fechamento

Não foi observada qualquer variação na posição de fechamento ao se variar a temperatura de 20 a 50°C.

3.2.3. ENSAIO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS BASEADO NAS CORRENTES DE FOUCAULT.

Foram feitos, basicamente, dois tipos de ensaios em função da temperatura:

- a) Determinação da estabilidade do ponto "zero":
- a.1) Aquecendo todo o sistema;
 - a.2) Aquecendo somente o transdutor;
 - a.3) Aquecendo somente a unidade de tratamento de sinais.

- b) Determinação da variação da sensibilidade:
- b.1) Aquecendo todo o sistema;
 - b.2) Aquecendo somente o transdutor.

- a) Determinação da estabilidade do ponto "zero".

Os resultados obtidos se apresentam no Quadro 10^[38].

QUADRO 10 - Deriva térmica do ponto "zero".

FAIXA DE TEMPERATURA (°C)	DESVIO MÉDIO DA TENSÃO DO PONTO "ZERO" SOB CADA CONDIÇÃO (mV/K)		
	CONDIÇÃO a1	CONDIÇÃO a2	CONDIÇÃO a3
20 a 30	42 ± 1	16 ± 1	25 ± 2
30 a 40	41 ± 1	23 ± 1	18 ± 1
40 a 50	43 ± 1	28 ± 2	14 ± 1

Observe-se que, embora o transdutor e a unidade de tratamento de sinais apresentem derivas térmicas não lineares, a deriva de todo o sistema é linear e igual a 42 ± 1 mV/K, o que, para a sensibilidade de 8 mV/ μ m, corresponde a 5,4 μ m/K.

Estes resultados não são satisfatórios dentro da utilização proposta. Métodos de compensação deverão ser adotados.

b) Determinação da variação da sensibilidade

Os resultados dos ensaios estão evidenciados no Quadro 11. |38|

QUADRO 11 - Deriva térmica da sensibilidade.

FAIXA DE TEMPERATURA (°C)	MUDANÇA MÉDIA DA SENSIBILIDADE SOB A CONDIÇÃO (%/K)	
	CONDIÇÃO b.1	CONDIÇÃO b.2
20 a 30	0,39 ± 0,02	0,31 ± 0,01
30 a 40	0,50 ± 0,03	0,36 ± 0,02
40 a 50	0,47 ± 0,02	0,34 ± 0,01

Observe-se que, aqui, a situação é bastante distinta da anterior. Os melhores resultados são conseguidos mantendo-se a unidade de tratamento de sinais sob temperatura controlada. Para esta situação, o erro máximo é de 3,6 $\mu\text{m}/\text{mm.K}$, sem ser adotada qualquer forma de compensação. A figura 35 mostra a faixa máxima de operação para erro menor que $\pm 1 \mu\text{m}$ em relação à variação máxima da temperatura durante uma medição.

Os efeitos da temperatura sobre o sistema de medição de deslocamentos apareceram de forma sistemática, podendo ser compensados, basicamente, de três maneiras:

- a) medindo-se a temperatura ambiente e fazendo-se a correção por programa, aproveitando-se a presença do computador do sistema de comando numérico. Para tanto, bastaria somar mais um ou dois canais para a medição de temperaturas àqueles correspondentes à multiplexação dos sistemas de medição de deslocamentos dos três eixos coordenados;
- b) estabelecendo-se um circuito analógico compensador;
- c) utilizando-se a técnica da medição inicial de refe-

rência (zeragem) antes de cada medição e admitindo-se constante a temperatura durante uma medição.

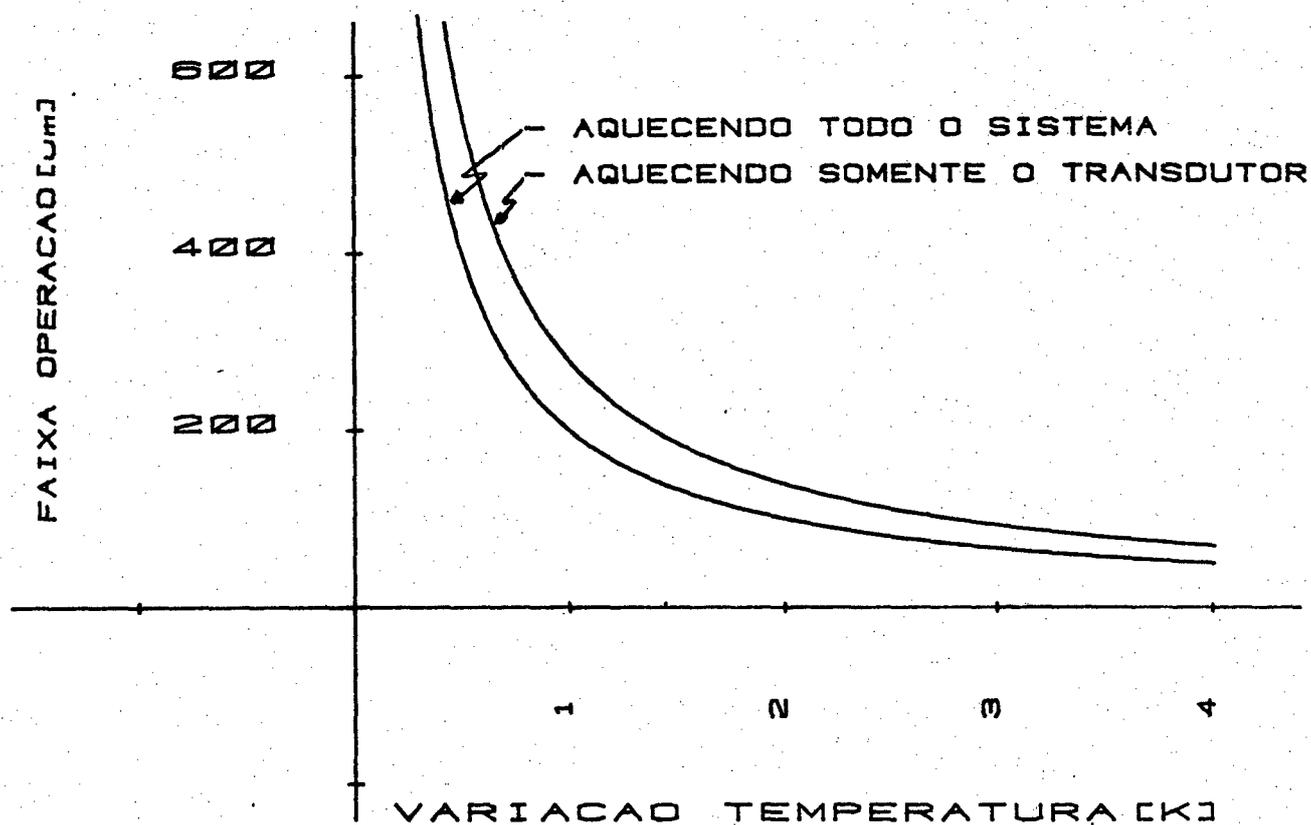


FIGURA 35 - Faixa máxima de operação do apalpador medidor em função da máxima variação da temperatura, para erro de $1 \mu\text{m}$ (sem compensação)

Outras características observadas:

a) Histerese

A fig.36 mostra a curva de histerese em função da distância do transdutor em relação a uma placa metálica, para as condições de medição no afastamento e na aproximação da placa^[38].

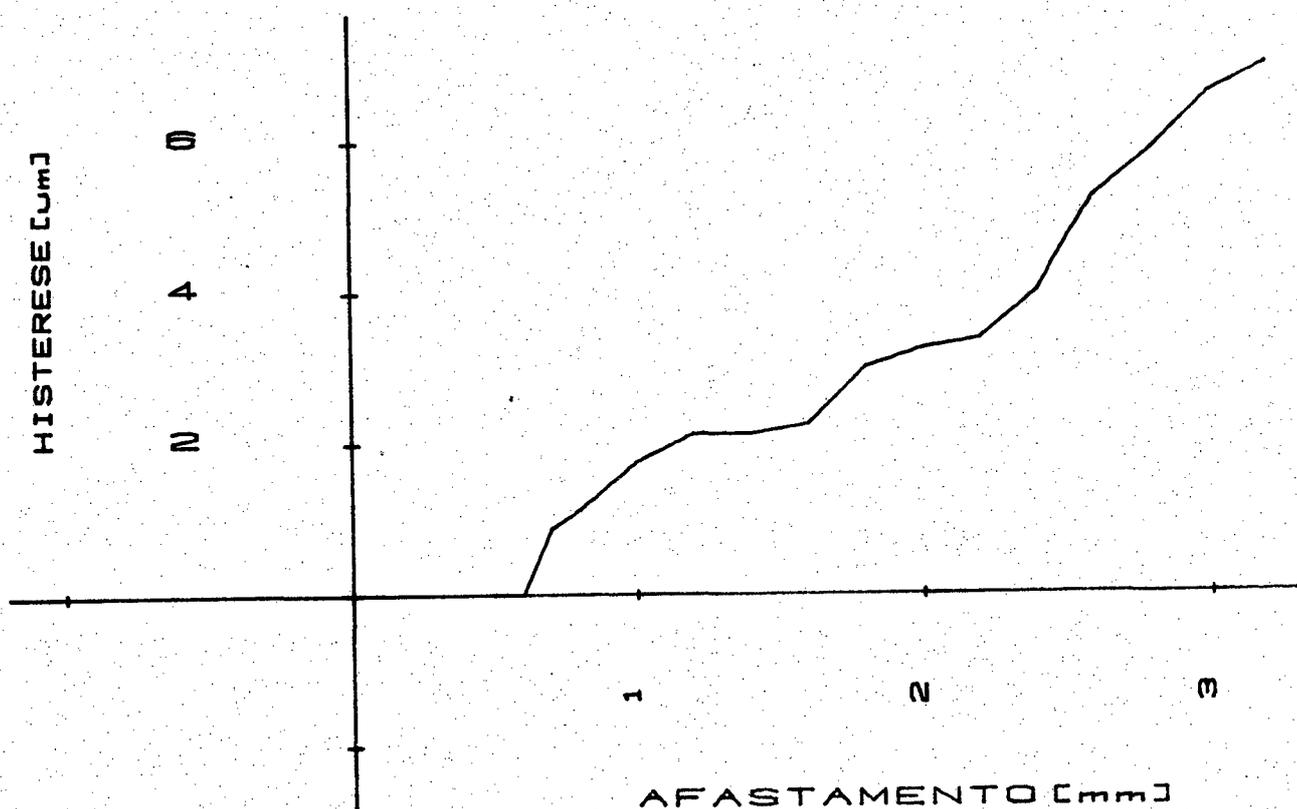
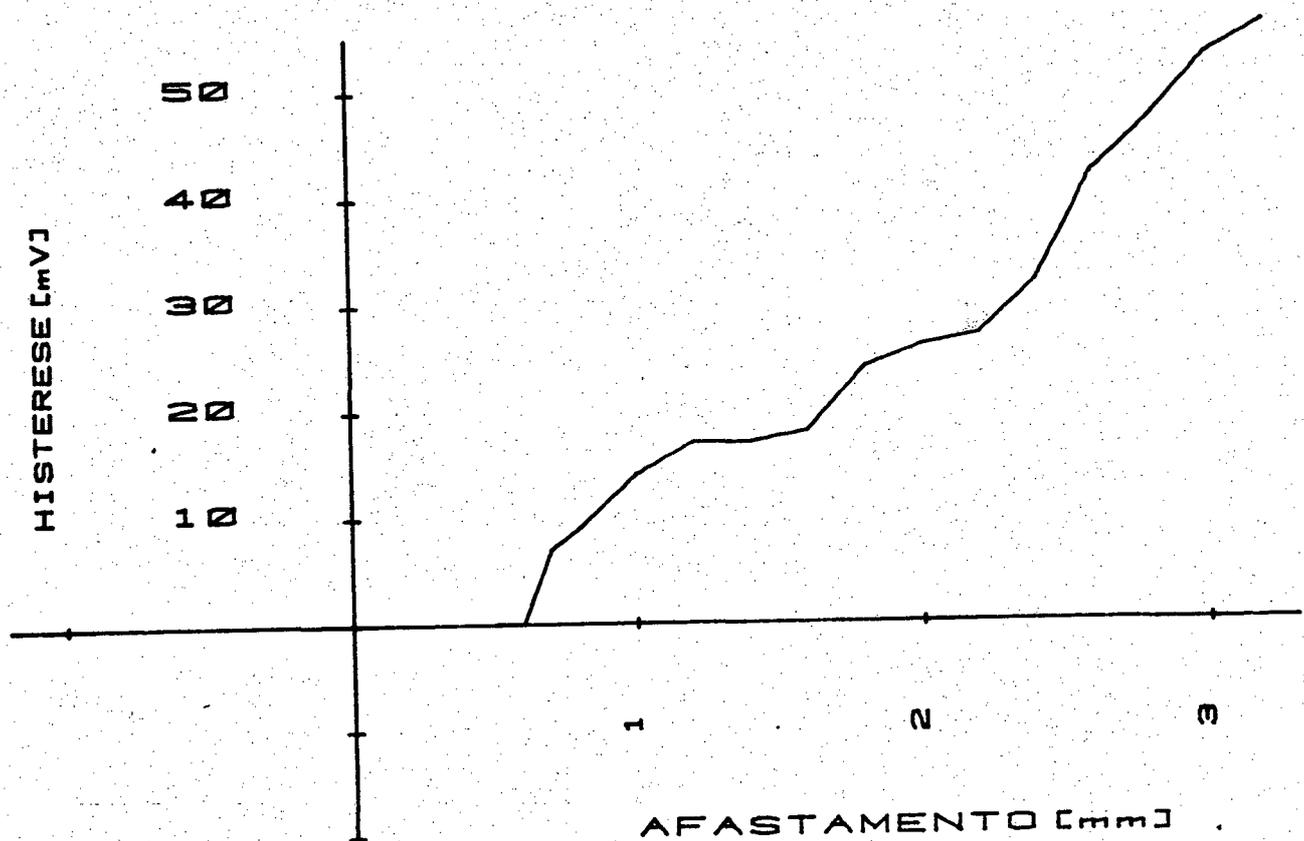


FIGURA 36 - Histerese em função da distância do transdutor em relação a uma placa metálica.

É necessário limitar a faixa de operação do apalpador em função do erro máximo admitido em cada aplicação, ou efetuar-se uma compensação. Para erro máximo, devido à histerese, de $1 \mu\text{m}$, a faixa de operação deve ser menor que $800 \mu\text{m}$. É uma relação, faixa de operação/erro máximo, razoavelmente boa, se comparada à dos sistemas de medição de deslocamentos normalmente utilizados no controle dimensional de peças usinadas.

b) Tempo de acomodação

Os gráficos da fig.37 mostram o tempo de acomodação do sistema de medição de deslocamentos ao se passar de uma posição distante $1900 \mu\text{m}$ de um bloco cúbico de 13mm de aresta, para outra, distante $1247 \mu\text{m}$ do mesmo bloco ^[38].

Observa-se que, inicialmente, ocorre uma ultrapassagem do valor indicado, correspondente a $2 \mu\text{m}$. A seguir, lentamente, processa-se uma acomodação do sistema. Esta característica parece explicável em função do aquecimento maior da peça pelo aumento das correntes de Foucault, com conseqüente aumento da resistividade, quando o transdutor se aproxima.

Aumentando o deslocamento efetuado, aumenta-se também a ultrapassagem, de forma proporcional. Esta característica limita a faixa de operação do apalpador a $300 \mu\text{m}$, quando se quer trabalhar com incerteza de $\pm 1 \mu\text{m}$.

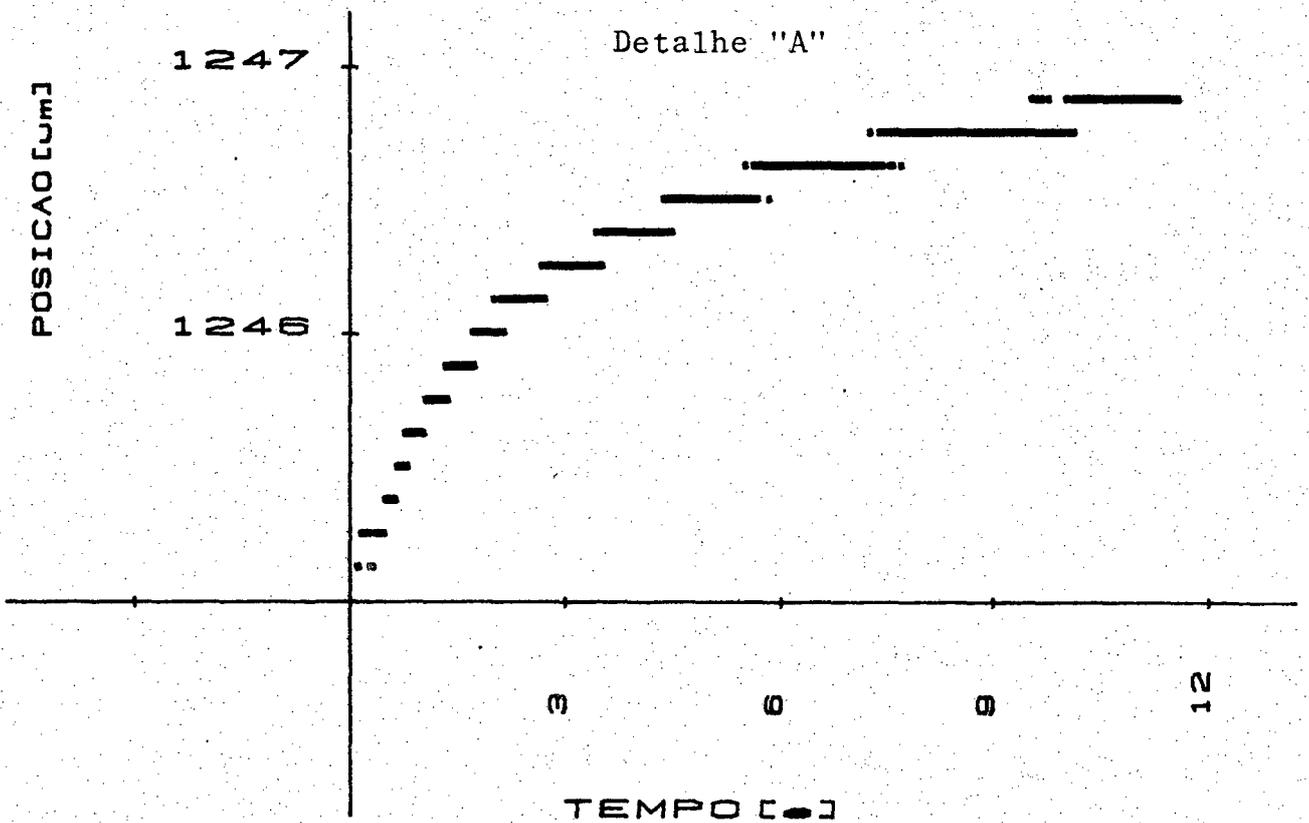
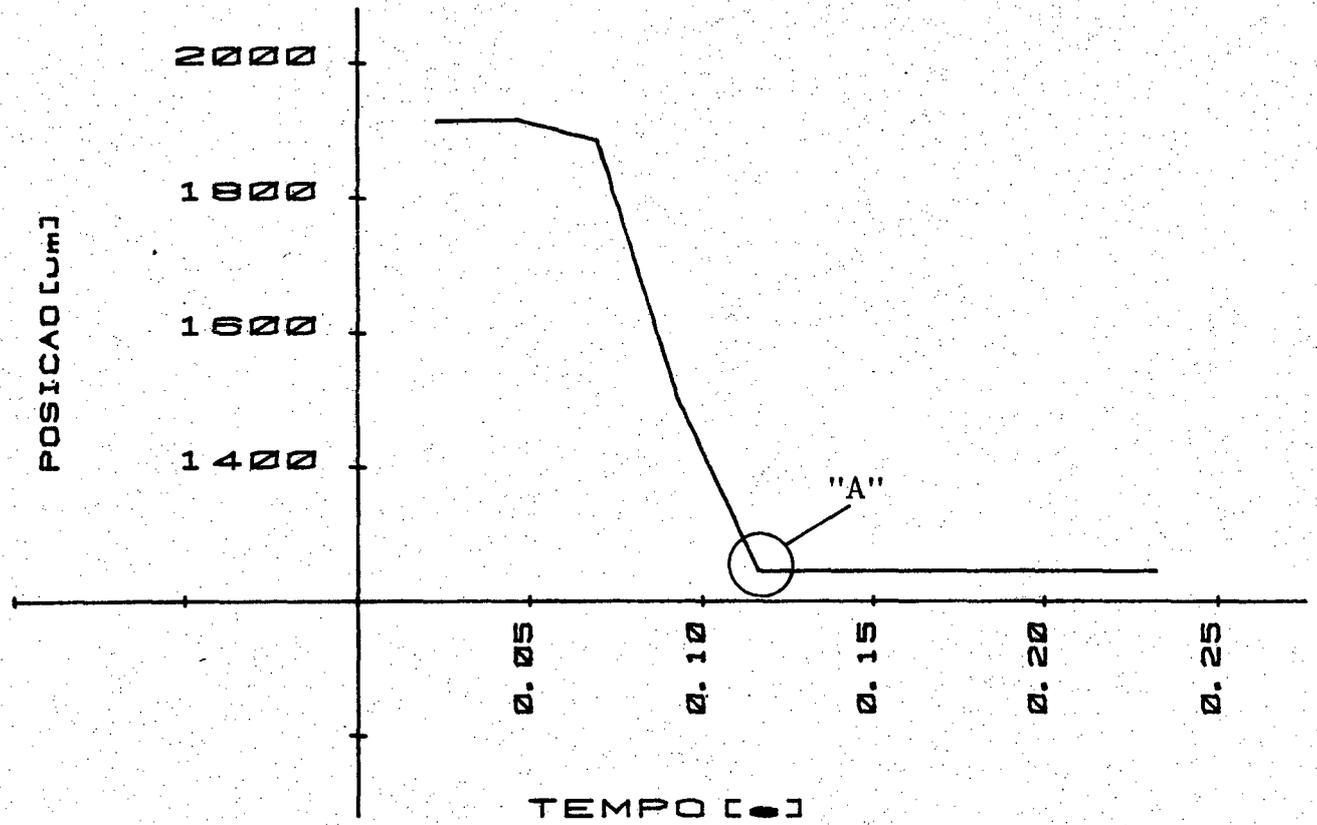


FIGURA 37 - Tempo de acomodação do sistema de medição de deslocamentos ao receber um degrau de deslocamento

4.

CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi instrumentar eletronicamente a estrutura mecânica de um apalpador para medição de coordenadas em máquinas-ferramenta com comando numérico. As condições básicas preestabelecidas foram:

- a) máximo erro $\pm 2 \mu\text{m}$;
- b) atuação nas velocidades de trabalho das máquinas-ferramenta;
- c) operação em meios adversos;
- d) operação de acordo com a estratégia de medição adotada, como ligador ou como medidor.

A partir de uma mesma estrutura mecânica foram desenvolvidos dois apalpadores: um ligador e um medidor. Para o primeiro, foi desenvolvido um sistema com chave palheta e ímã permanente; para o segundo, foi empregado um sistema de medição de deslocamentos que opera pelo princípio das correntes de Foucault.

Mostrou-se, experimentalmente, que ambos os apalpadores satisfizeram as condições preestabelecidas, uma vez observadas convenientemente as condições de uso.

O quadro 12 mostra as condições limitantes para os dois apalpadores, relacionadas aos objetivos estabelecidos.

QUADRO 12 - RESULTADOS OBTIDOS

OBJETIVO	APALPADOR	
	MEDIDOR	LIGADOR
Precisão espacial $\pm 2\mu\text{m}$	é possível com limitações (1)	é possível menor que $\pm 1\mu\text{m}$, com limitações (2)
Velocidade alta de medição	apresenta erro na faixa de μm , devido ao tempo de acomodação	é possível com boa regulação (2)
Temperatura de operação	deve ser controlada ou compensada	não sofre influência
Não influência da constituição do meio (água, óleo, fluidos refrigerantes)	satisfaz plenamente	satisfaz plenamente
Adaptação à estrutura mecânica disponível	Não há restrições	necessita do desacoplamento de um sinal

1) Conforme foi visto no capítulo 3, a precisão depende fundamentalmente das faixas de operação e da temperatura de utilização.

2) A fig.33 estabelece as condições de regulação da velocidade da MFCN para um erro pré-determinado.

Os resultados alcançados com o sistema baseado nas chaves palheta estão próximos dos limites máximos atingíveis, em função do tempo de atuação, dos modelos disponíveis atualmente. Acredita-se que novas pesquisas utilizando as chaves palheta conhecidas, não levarão a aperfeiçoamentos altamente significativos, devido a esta limitação.

No caso do sistema baseado nas correntes de Foucault , acredita-se que melhoras substanciais, possam ser conseguidas , com redução das limitações aqui apresentadas. Propõe-se o estudo dos métodos de compensação da temperatura citados no capítulo 3 e a utilização de um bloco condutor externo ao apalpador, de manganina, por exemplo, ao invés de aço. De acordo com o quadro 7, existe a possibilidade de que tal bloco venha a reduzir sensivelmente a influência da temperatura, uma vez que, pela equação 16, mostrou-se haver uma relação de proporcionalidade entre as perdas por correntes de Foucault e a resistividade do elemento condutor empregado. Observa-se que a variação da resistividade do aço com a temperatura, a 20°C, é 300 vezes maior do que a da manganina.

5.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SCHNEIDER, C.A.; "Técnicas de Medição na Fabricação Mecânica", In: Anais do ENATEM - Encontro Nacional de Atualização Tecnológica em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 1982.
- [2] ZEISS; "Zeiss Mehrkoordinatenmesstechnik Hardware - Software - Einsatzgebiete". In: Revista Zeiss Information, nº 91, 1980, pp.52-63.
- [3] HERZOG, K.; "Mess und Tastsysteme bei Mehrkoordinaten Messgeraeten", IPA - Stuttgart, 1977.
- [4] PFEIFER, T. & SCHNEIDER, C.A.; "Aplication of the Laser for the Quality Control and Calibration of Machine Tools". In: Anais do do IV COBEM. Florianópolis, 1977.
- [5] SCHNEIDER, C.A.; "Tecnologia da Medição de Coordenadas". In: Anais do 10º ERTI - Encontro Regional de Técnicos Industriais. Joinville, 1982.
- [6] RENISHAW; "Three Dimensional Touch Trigger Probes for Machining Centers". Catálogo de fabricante, 1977.
- [7] SCHNEIDER, C.A. & LÜCKE H.H.A.; "Medição Automática em Máquinas-Ferramenta com Comando Numérico". In: Anais do 4º CBA- Campinas, 1982.
- [8] PFEIFER, T. e outros; "Determination of the Measuring Error of 3-D-Probes". Artigo da revista Technisches Messen, heft 4, 1979, pp.161 a 169.

- |9| PFEIFER, T. &
FURST, A.; "Advantages and Conditions for a Direct Measurement of the Work-Piece-Geometry on NC - Machine Tools". Proceedings of IFAC - Tokyo, 1977.
- |10| PFEIFER, T.; "Apoio Computacional a Metrologia Industrial". In: Anais do ENATEM - Encontro Nac. de Atualização Tecnológica em Eng. Mecânica, Florianópolis, 1982.
- |11| MÁQUINAS E FERRAMENTAS; "DNC Funcionou pela Primeira Vez na Feira da Mecânica". Artigo da revista Máquinas e Ferramentas, maio/1982, pp.54.
- |12| LÜCKE, H.H.A. &
SOARES, J.S.I.; "Contribuição ao Projeto de Apalpadores de Medição de Comprimento, Suspensos em Guias de Molas em Forma de Lâminas". Anais do V COBEM - Campinas, 1979.
- |13| PFEIFER, T. &
FURST, A.; "Workpiece Measurement on NC (CNC) Machine Configurations, Application Examples", Proceedings of IFAC. Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Technology - Stuttgart, 1979.
- |14| DEA; "The Omnidirectional Deep Reach Electronic Measuring Probe". Catálogo de fabricante, 1978.
- |15| ROHRBACH, C.; "Handbuch fuer elektrisches Messen mechanischen Groessen". VDI-Verlag GmbH- Duesseldorf, 1967.
- |16| SCHENCK; "Vibro Control". Catálogo de fabricante, 1980.
- |17| HAMLIN; "Especificações de Reed Switches". Catálogo de fabricante, 1980.

- [18] PARKER, R.J. & STUDDERS, R.J.; "Permanent Magnets and Their Application". John Wiley and Sons, Inc. - New York, 1964.
- [19] SCHMIDT, W.; "Materiais elétricos isolantes e magnéticos". S.P., Editora Edgard Buechler Ltda., 1982.
- [20] LEINWEBER, P.; "Taschenbuch der Laengenmesstechnik, Berlin, Springer Verlag, 1954.
- [21] TESA; "Tesamodul". Especificações do fabricante.
- [22] LABMETRO; "Desenvolvimento da Tecnologia de Medição de Peças em Máquinas-Ferramenta com Comando Numérico". Relatório de projeto de pesquisa- Florianópolis, 1982.
- [23] HEWLETT PACKARD; "System Voltmeter". Manual de equipamento, 1977.
- [24] PAULA, R.A.N.; "Sistema de Monitoração de Máquinas de Grande Porte". Anais do 4º Seminário de Instrumentação. Rio de Janeiro, 1981.
- [25] HAYT Jr.; W.H.; "Eletromagnetismo". Livros Técnicos e Científicos Editora S/A. - Rio de Janeiro, 1978.
- [26] HALLIDAY, D. & RESNICK, R.; "Física II". Livros Técnicos e Científicos Editora S/A. - Rio de Janeiro, 1976.
- [27] ZANCHIN, C.I.; "Notas de Aula das Disciplinas Circuitos Integrados Analógicos I e II, do Programa de Pós-Graduação". UFSC - Florianópolis, 1982.

- |28| WAIT, J.V.; & Outros.; "Introduction to Operational Amplifier Theory and Applications". Editora McGraw Hill, Tokyo, 1975.
- |29| SIEMENS; "Analog Integrated Circuits". Catálogo de fabricante, 1982.
- |30| NATIONAL SEMICONDUCTOR; "Linear Databook". Catálogo de fabricante, 1980.
- |31| FLESCH, C.A.; "Alterações de Nível de Tensão de um Sistema de Medição de Deslocamentos". Notas do Seminário apresentado na Disciplina Circuitos Integrados Analógicos II, do Programa de Pós-Graduação da UFSC- Florianópolis- 1982.
- |32| JOHANNES HEIDENHAIN; "Incremental Angle Encoder". Instruções de Operação e Montagem, 1980.
- |33| HEWLETT PACKARD; "X-Y Recorder". Manual do equipamentos, 1982.
- |34| HEWLETT PACKARD; "3052 A. System Library". Manuais de equipamentos, 1978.
- |35| TEXAS INSTRUMENTS; "Digitale Integrierte Schaltungen". Catálogo de fabricante, 1979.
- |36| Ponderações com Professores do GRUCON- Grupo de Controle Numérico da UFSC - Florianópolis, outubro de 1982.
- |37| LÜCKE, H.H.A.; "Características e Aspectos Construtivos de Relés para Chaves Seletoras de Medição". 4º Seminário de Instrumentação - Salvador, 1982.
- |38| Relatórios de ensaios em poder do LABMETRO- UFSC- Telefone: (0482-339349) - Florianópolis, 1981 e 1982.