

Capítulo 3 Medição da Precisão Dimensional

No caso de se desejar medir a precisão de uma peça usinada, é preciso antes de mais nada selecionar adequadamente o instrumento de medição, em função do tamanho, da geometria, do material, do grau de precisão de medição necessário e da quantidade do objeto. A Tabela 3.1 mostra os principais equipamentos de medição de comprimento utilizados atualmente assim como as suas principais especificações.

Tabela 3.1 Características de diversos tipos de equipamentos para medição de comprimento.

	menor divisão mm	precisão μm	campo de medição mm	mecanismo de amplificação	observação
1. regua graduada	1 (0.5)	± 50	vários		precisão relativa ao melhor estado
2. paquímetro	0.05 (0.02)	± 20	vários		precisão relativa ao melhor exemplo
3. micrometro	0.01 (0.001)	± 2	25 em 25 mm	rotação de um fuso	precisão relativa ao caso de 0~25 mm
4. relógio comparador	0.01 (0.001)	± 10 (± 3)	0~10~ (0~1)	engrenagem	precisão relativa ao melhor exemplo
5. minimeter	0.001	± 0.5	± 0.010 (± 0.030)	alavanca	
6. orthotest	0.001	± 0.5	± 0.100	alavanca e engrenagem	
7. mikrokator	0.00002~0.005	$\pm (2.5 \sim 1)\%$	$\pm (0.001 \sim 0.2)$	rotação de uma fita de aço ao ser esticada	
8. optímetro	0.001	± 0.5	± 0.100	alavanca óptica	
9. optímetro de projeção $1\mu\text{m}$	0.001	± 0.5	± 0.100	alavanca óptica	
10. ultra-optímetro	0.0002	± 0.06	± 0.083	alavanca óptica dupla	existe ainda o modelo $0.2\mu\text{m}$
11. interferômetro óptico	0.0001	± 0.02	± 0.005	franja de interferência	um exemplo
12. micrometro pneumático	0.001	± 0.8	± 0.015	resistencia de vazão de ar numa fresta estreita	tipo vazão, com aumento de 5000 x
13. micrômetro eletrônico	0.0005 0.001 0.002 0.005	± 0.25 ~ ± 2.5	± 0.015 ± 0.030 ± 0.060 ± 0.150	métodos eletrônicos	com amplificação em 4 estágio
14. medidor de comprimento	0.0005	± 0.5	1016*	microscópio (*régua padrão 508)	caso do MUL-1000 da SIP
15. comparador de calibradores	0.0001	± 0.01	± 0.001	alavanca mec. e óptica	Millions-Comparator da Conventry

3.1 Amplificação

Para fins de classificação é possível identificar 4 tipos de métodos de amplificação: mecânica, óptica, pneumática e elétrica. Na maioria dos instrumentos, a amplificação é obtida pela combinação de dois mais destes métodos básicos ou pela combinação de diferentes técnicas de um mesmo método básico.

3.1.1 Amplificação mecânica

É sem dúvida o mais antigo e o mais simples método. Possui uma ampla gama de aplicação na metrologia, desde o micrômetro até os relógios comparadores mais complexos.

(1) A alavanca e o braço radial (*lever & radius arm*)



Fig. 3.1 Princípio da alavanca

(2) O plano inclinado e a cunha (*inclined plane & wedge*)

O Princípio é ilustrado na Fig. 3.2. A amplificação depende do ângulo θ , e quando as faces adjacentes são lapidadas com alto grau de planicidade e o ângulo θ é conhecido com alta precisão, constitui um método simples e preciso de amplificar o movimento.

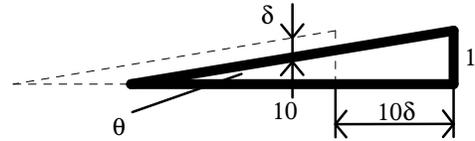


Figura 3.2 Princípio da cunha

O parafuso pode ser visto como um caso especial de um plano inclinado. Aqui, o plano é torcido em torno de uma hélice e a amplificação obtida do equipamento é visualizada pela combinação deste com uma alavanca ou um braço radial. Um exemplo típico é o micrômetro que possui por exemplo um parafuso de passo 0.025 in e diâmetro de 0.3 in: é obtida um amplificação de $0.3\pi / 0.025 = 37.5$. A isso deve ser acrescentada a amplificação devido ao tambor conectado ao parafuso. Esta última amplificação costuma ser de 1.6:1, resultando numa amplificação total de 60:1.

(3) Trem de engrenagens

Aqui a amplificação depende da razão entre os diâmetros primitivos das engrenagens que constituem o trem. O trem de engrenagem é comumente empregado nos relógios comparadores (dial gauge, dial-test indicator).

3.1.2 Amplificação óptica

(1) Reflexão óptica

Um dos princípios básicos da óptica estabelece que quando um feixe de luz incide num espelho, o ângulo entre a luz incidente e a normal ao espelho é igual ao ângulo entre a luz refletida e a normal. Entretanto, quando o espelho é rodado de $\delta\theta$, tanto o ângulo de incidência como o de reflexão são acrescidos de $\delta\theta$ e com isso a luz refletida irá mover de $2\delta\theta$. Uma amplificação maior pode ser obtida executando uma reflexão dupla ou múltipla.

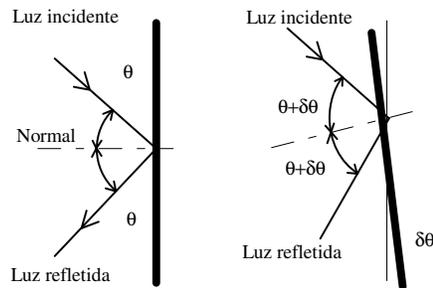


Fig. 3.3 Reflexão simples

(2) Projeção óptica

A vantagem da projeção óptica como técnica de medição, está na facilidade com que permite verificar perfis complexos por meio de um traçado padrão. O traçado padrão pode conter uma banda para a tolerância e a indicação das dimensões a serem verificadas e dessa forma permite uma verificação rápida se uma peça está boa ou não.

Existem projetores nas quais a peça é instalada sobre uma mesa de coordenadas e dessa forma permitem que a peça seja medida com a utilização de umas marcas de referência existentes na tela do projetor.

A amplificação total depende dos seguintes fatores.

- acuracidade do sistema óptico, que deve ser no mínimo de 1 parte em 1000.
- acuracidade do traçado de referência; normalmente melhor que ± 0.002 in
- precisão de movimento da mesa de coordenadas, utilizado no lugar do traçado de referência; geralmente a perda de acuracidade na mesa é da ordem de ± 0.0001 in / in de movimento.
- a acuracidade com que o operador pode estimar a discrepância entre a imagem projetada e o traçado de referência; o erro é da ordem de ± 0.005 in.

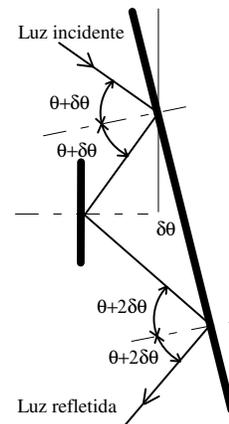


Fig. 3.4 Reflexão múltipla

(3) Franjas de Moiré

Dois padrões, cada um deles feitos por meio da repetição contínua e uniforme de linhas, a serem sobrepostos, podem gerar um padrão diferente dos originais. A esse fenômeno se dá o nome de efeito Moiré. Especialmente quando padrões consistentes de um conjunto de retas ou curvas com espaçamento constante são sobrepostos são geradas linhas com espaçamento distinto das linhas ou curvas originais. A essas linhas se dá o nome de franjas de Moiré.

As franjas de Moiré podem ser gerados:

- pela sobreposição de duas grades com passos ligeiramente diferentes (p_1, p_2 , sendo $p_1 = p_2(1 + \alpha)$), deslocamento relativo $p_2\alpha =$ deslocamento da franja de p_1/α)

- b. pela sobreposição de duas grades com passos idênticos sendo que neste caso dá-se um desvio angular minúsculo entre as duas grades ($W = p \cos(\theta/2) / \sin \theta$, W espaçamento entre as franjas, θ : inclinação relativa, p : passo da grade, a cada movimento de p corresponde um W)

(4) Interferometria

Interferômetro de Michelson, Twyman-Green, Fabri-Perrot. Seja um feixe de luz coerente $I = I_0[1 + \cos(\omega t + \phi)]$. Este feixe ao ser dividido pelo semi-espelho dá origem a dois feixes. Um dos feixes percorre um caminho de distância fixa e incide na tela. O outro feixe também incide sobre a tela, juntando-se com o primeiro feixe mas percorre um caminho que pode variar de acordo com a posição do espelho móvel. Ao se juntarem, o feixe de referência será dado por $I_1 = I_0[1 + \cos(\omega t + \phi_1)]$ ao passo que o feixe de medição será dado por $I_2 = I_0[1 + \cos(\omega t + \phi_1 + 2x \cdot 2\pi/\lambda)]$. Dessa forma a intensidade do feixe na tela será dada por:

$$I = I_1 + I_2 = I_0[1 + 2\cos(\omega t + \phi_1 + x\pi/\lambda)\cos(2x\pi/\lambda)] \quad (3.1)$$

A frequência da luz $\omega/2\pi$ é da ordem de 10^{10} Hz e para a maioria dos sensores de uso prático, o termo $\cos(\omega t + \phi_1 + x\pi/\lambda)$ pode ser considerado constante. Já o termo $\cos(2x\pi/\lambda)$ é perceptível. O seu efeito é tal que a cada deslocamento do espelho móvel de λ , o feixe projetado sobre a tela repete duas vezes o ciclo claro > escuro. Logo, observando o número de vezes que a tela ficou clara e escura, é possível medir o deslocamento do espelho móvel.

3.1.3 Amplificação Elétrica

Os sistemas de amplificação elétrica evoluíram rapidamente nos anos recentes e hoje é amplamente aplicado na metrologia convencional assim como nas aplicações de medição em processo. As vantagens sobre os outros métodos estão na possibilidade de obtenção de um grande campo de linearidade, na facilidade com que se pode alterar a intensidade da amplificação e na alta velocidade da resposta.

(1) Pontes de Wheatstone

Um dos circuitos mais utilizados para amplificação elétrica é a ponte de Wheatstone. A Fig. 3.6 mostra a aplicação para um extensômetro (strain-gauge) que produz uma variação na resistência, um LVDT (linearly variable differential transformer), que produz uma variação na indutância e um sensor capacitivo, que produz uma variação na capacitância.

Em qualquer dos casos, a ponte se encontra em equilíbrio quando o produto das impedâncias dos elementos numa diagonal for igual ao produto na outra diagonal da ponte.

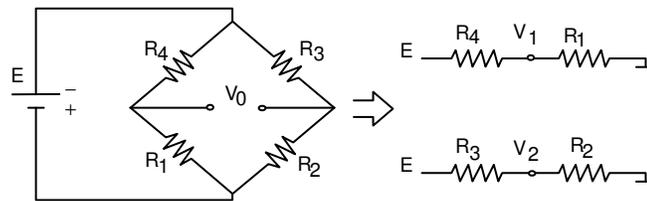


Figura 3.5 Ponte de Wheatstone

$$V_1 = E \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_4} \quad (3.2) \quad V_2 = E \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (3.3)$$

$$V_o = V_2 - V_1 = E \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) \quad (3.4) \quad , \text{ que rearranjando resulta em,}$$

$$V_o = E \cdot \frac{\frac{R_3}{R_2} - \frac{R_4}{R_1}}{\left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right)\left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right)} \quad (3.5)$$

Nesta última equação, consideremos uma situação em que $V_o = 0$, (ou seja, $R_1 R_3 = R_2 R_4$ e por conseguinte, $R_3 / R_2 = R_4 / R_1 = \alpha$) e consideremos que, $R_1 = R_0(1 + x)$. Dessa forma a última equação pode ser reescrita da seguinte forma.

$$V_o = E \cdot \frac{\alpha x}{(1 + \alpha)(1 + \alpha(1 + x))} \quad (3.6)$$

Onde, fazendo $k = \frac{\alpha}{(1 + \alpha)(1 + \alpha(1 + x))}$, teremos,

$$V_o = E \cdot kx \quad (3.7)$$

Fazendo

$$s = \left. \frac{dk}{d\alpha} \right|_{x=0}, \text{ concluímos se que para } \alpha=1, k \text{ assume um valor máximo.}$$

Isto é, a sensibilidade da ponte será máxima quando $R_1=R_2=R_3=R_4$.

Exemplos de ponte:

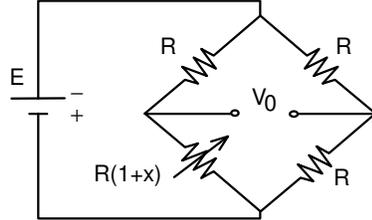
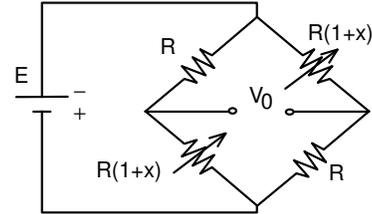


Figura 3.6 Exemplos de ponte

$$V_o = E \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{x}{1 + x/2} \quad (3.8)$$



$$V_o = E \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{1 + x/2} \quad (3.9)$$

Variedades de ponte de Wheatstone:

- Resistência (ex: strain-gauge, potenciômetro, etc)

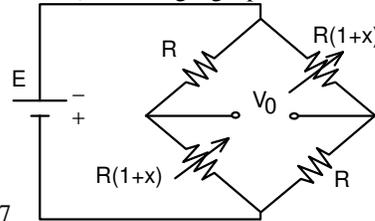


Figura 3.7

- Indutância (ex.: LVDT)

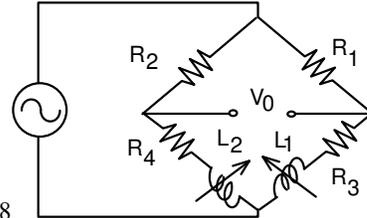


Figura 3.8

$$\text{Cond. de equil: } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \text{ e } \frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2}$$

- Capacitância

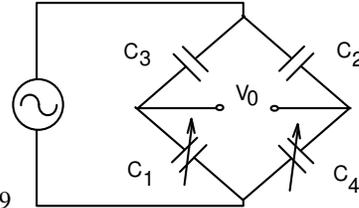


Figura 3.9

$$\text{Cond. de equil: } \frac{C_1}{C_2} = \frac{C_3}{C_4}$$

(2) Amplificação diferencial

Hoje em dia já se encontram no mercado Amp OPs dedicados á instrumentação (instrumentation OP Amps) projetados para permitir um ganho extremamente alto (acima de 100 vêzes) e com nível de ruído extremamente baixo. Entretanto, apesar desse grande ganho, o problema da amplificação fica condicionado ao nível do ruído proveniente do próprio sensor. Nisso se emprega uma técnica de amplificação chamada de amplificação diferencial descrito na Fig. 3.7. Seja por exemplo um sensor que apresenta uma variação positiva Δv na tensão de saída, mediante um movimento do objeto de Δx . Instala-se um outro sensor com características semelhantes de forma que para um mesmo movimento se obtenha $-\Delta v$ para um mesmo Δx e considere-se que um ruído r "entre" nos sinais dos sensores. Mediante a amplificação diferencial os sinais dos sensores serão somados e divididos por 2 ou seja:

$$s_1 = \Delta v + r \quad (3.10)$$

$$s_2 = -\Delta v + r \quad (3.11)$$

$$\Delta v = (s_1 + s_2) / 2 \quad (3.12)$$

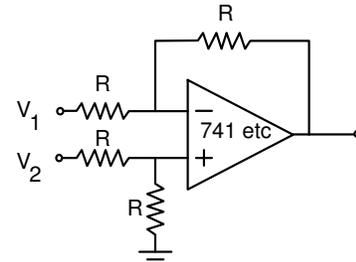


Figura 3.10 Amplificação diferencial

(3) Amplificação com modulação

Quando a faixa de frequência do sinal e do ruído estão próximos, não podendo obter uma boa relação S/N, realize-se uma amplificação com modulação, ou seja, condiz-se o sinal para uma faixa de frequência onde o ruído é baixo.

Alto ganho, baixo drift, e boa rejeição de interferências.

sendo v_r o sinal de entrada e v_s , um sinal de referência

$$v_s = V_s \sin(\omega t + \phi) \quad (3.13)$$

$$v_r = V_r \sin \omega t \quad (3.14)$$

$$v_s \times v_r = \frac{V_s V_r}{2} [-\cos(2\omega t + \phi) + \cos \phi] \quad (3.15)$$

Por meio de um filtro passa-baixa elimina-se a componente $-\cos(2\omega t + \phi)$, restando somente:

$$v_o = \frac{V_s V_r}{2} \cos \phi \quad (3.16)$$

onde, se $f=0$, v_o é proporcional a v_s
se $v_s = \text{cte}$ e $v_r = \text{cte.}$, f

3.1.4 Amplificação pneumática

Trata-se de um método de amplificação empregado originalmente pela companhia Solex (França). As suas vantagens estão na possibilidade de amplificação de até 30.000 vêzes, alta estabilidade e confiabilidade. São frequentemente utilizados na medição de diâmetros internos. As suas desvantagens estão no estreito campo de linearidade (em torno de 0.1mm) e na baixa velocidade de resposta (em torno de 0.1s).

No intervalo $0.6 < p/P < 0.8$ a curva é aproximadamente linear e pode ser representado por:

$$\frac{p}{P} = A - b \frac{M}{c} \quad (3.17)$$

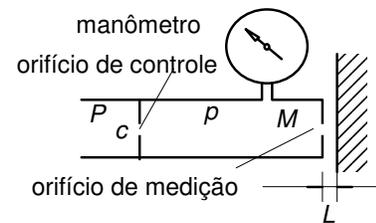
para $2 \text{ lib/in}^2 < P < 75 \text{ lib/in}^2$

$A \sim 1.1$

$b = 0.6$ para $P=1 \text{ lib/in}^2$

$b = 0.4$ para $P=75 \text{ lib/in}^2$

A correlação entre M e L depende da configuração do cabeçote de medição empregado. Para o cabeçote no qual o jato de ar incide diretamente sobre o componente, a área de escape M será igual a πdL , onde d é o diâmetro do orifício de medição.



P : pressão montante p : pressão juzante
 M : área do orifício de medição
 c : área do orifício de controle

Figura 3.11 Medidor Solex

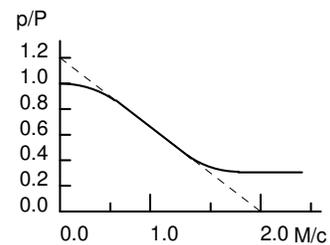


Figura 3.12 Curva de calibração

Existem ainda os calibradores pneumáticos implementados sob a forma de ponte Whetstone. As vantagens desta configuração são: compensação da variação de P, possibilidade de um ajuste fino da medição por meio da válvula de ajustável e a possibilidade de utilização de todo o campo de medição do manômetro.

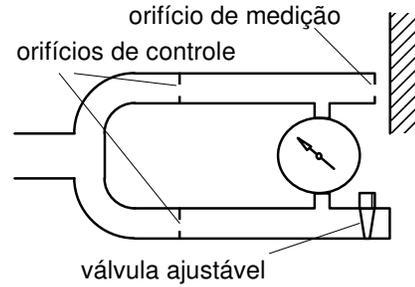


Figura 3.13 Amplificação diferencial

3.2 Alguns sensores utilizados na medição de deslocamento/posição

(1) Potenciômetro

Pode ser um fio simples mas como a resistência total é pequena, emprega-se comumente um fio em espiras. No segundo caso, a resolução do potenciômetro é determinada pela espessura do fio (em torno de 20µm).

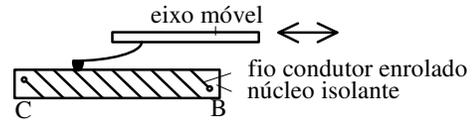


Figura 3.14 Potenciômetro

Uma resposta contínua pode ser obtida por meio da deposição de uma camada de metal ou de carbono mas como há contato contínuo do contactor com a camada, os potenciômetros deste tipo apresentam problemas de desgaste.

Outro problema que pode afetar a precisão de um potenciômetro é a piroeletricidade, ou seja a eletricidade gerada pelo calor, que por sua vez é gerado pelo atrito entre o contactor e a resistência.

(2) LVDT (Linearly Variable Differential Transformer)

Induzindo uma CA na bobina II, será induzida uma corrente na bobina I e uma na bobina II, sendo que estas corrente induzidas dependerão da posição do núcleo de ferro com relação às bobinas I e II. Estes transdutores são utilizados geralmente montando-se uma ponte. Como a saída do transdutor é sensível também aos movimentos que não aqueles na direção x, há a necessidade de se utilizar um mecanismo que restringe os movimentos do núcleo somente na direção x.

Geralmente, a sensibilidade destes sensores depende do tamanho da bobina. A sensibilidade atinge valores de até 10nm.

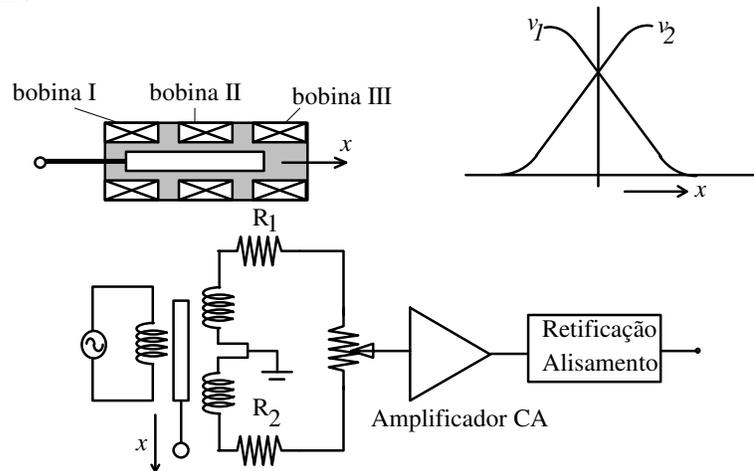


Figura 3.15 LVDT: estrutura; tensões induzidas nas bobinas; circuito de amplificação

(3) Strain-gauge

Existem dois tipos de strain-gauges mais utilizados: o do tipo fio metálico e o do tipo semiconductor. A característica principal do strain-gauge é expressa por meio do chamado gauge-factor, que é definido da seguinte forma:

$$k = \frac{\Delta R / R}{\epsilon} \quad (3.18)$$

onde $\Delta R / R$ representa a taxa de variação da resistência do strain-gauge e ϵ , o alongamento do objeto onde o sensor foi colado.

Valores típicos de k:

2 : no caso de s.g. de fio metálico

50 ~ 200: no caso de s.g. semiconductor

O campo de medição no caso do s.g., é determinado pelo limiar de elasticidade do material do próprio s.g.. Geralmente o s.g. admite ϵ de até 0.1%. A variação da resistência elétrica no s.g. é geralmente medido por meio de uma ponte de Wheatstone.

Exige-se cuidado no uso do s.g. pois a sua resistência elétrica é extremamente sensível à variação de temperatura. No caso de um s.g. de fio metálico, uma variação de 1 grau K produz uma variação de 0.1% no valor da resistência, variação que é da mesma ordem daquela resultante da deformação. Há a necessidade de utilização de circuitos de compensação de temperatura.

(4) Sensor capacitivo

$\epsilon_0 = 10^7 / 4\pi c^2 R$: raio d : distância S : área em oposição ϵ_r : condutibilidade relativa

Sistema de condutor elétrico	Capacitância
esfera	$4\pi\epsilon_0\epsilon_r R$
esferas concêntricas	$\frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r R_1 R_2}{R_2 - R_1}$
cilindros concêntricos	$\frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r d}{\log(R_2 / R_1)}$
placas paralelas	$\frac{\epsilon_0\epsilon_r S}{d}$

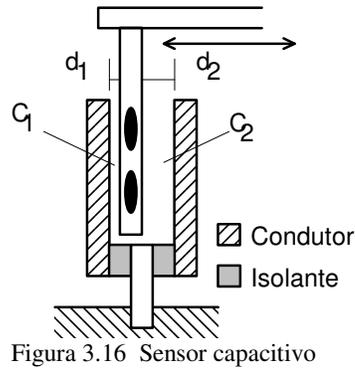


Figura 3.16 Sensor capacitivo

(5) Sensores de correntes Eddy

Este sensor é composto por um núcleo de material magnético e por duas bobinas, que são enroladas por sobre o núcleo. As bobinas são excitadas com CA. Com isso, surge no objeto, que é colocado nas proximidades do sensor, um campo magnético que atravessa o mesmo. Surge então no objeto, uma corrente cujo campo tende a cancelar o campo que a originou. Em outras palavras, a impedância da bobina altera na presença do objeto, sendo que a impedância varia conforme a distância do núcleo à superfície do objeto.

Geralmente é um sensor de baixa sensibilidade, mas com grande campo de medição. A grande desvantagem deste sensor é que a sua sensibilidade varia conforme a condutibilidade σ e a permeabilidade magnética μ_s do material do objeto.

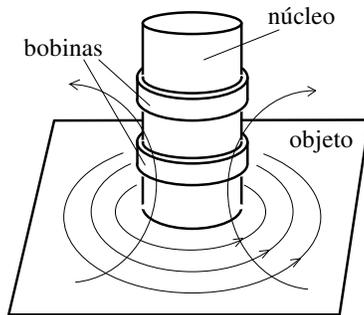
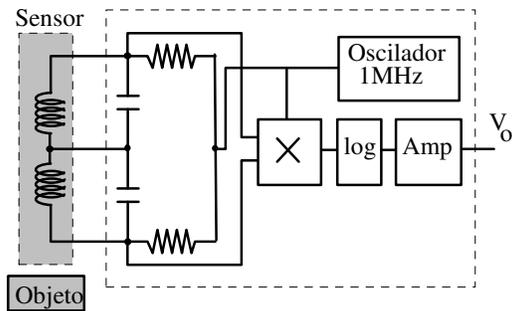


Figura 3.17 Sensor de corrente Eddy: sensor; circuito de amplificação



(6) Fotosensores

(a) Sensor do tipo fotoresistivo

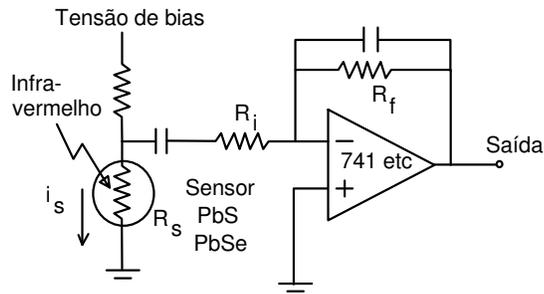


Figura 3.18 Sensor fotoresistivo

(b) Sensor do tipo fotoelétrico

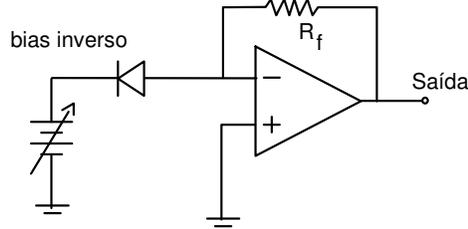


Figura 3.19 Sensor fotoelétrico

(c) Sensor de imagem
Câmeras CCDs 2d e 1d.

3.3 Elementos de máquinas para a metrologia

3.3.1 Projeto cinemático

Em muitas medições há a necessidade de se restringir os movimentos do objeto da medição ou mesmo do próprio medidor. Por exemplo, no caso de um apalpador para medição de deslocamento que utiliza um LVDT, o apalpador, solidário ao núcleo, só poderá ter movimento na direção do eixo das bobinas. Os demais movimentos deverão ser restringidos por algum tipo de mecanismo. Ou em outras palavras a estrutura mecânica deste apalpador, deverá ser projetado de modo a assegurar que o apalpador tenha somente um grau de liberdade.

Existem ainda casos em que um determinado mecanismos deve ser acoplados a outro, sendo que o acoplamento não deve gerar nenhuma deformação em qualquer parte. É o que acontece por exemplo, ao se fixar uma peça na máquina ferramenta com a ajuda de um fixador.

Tudo o que foi mencionado até agora trata do problema: como impor restrições (locações) ao movimento de um determinado objeto, de modo a assegurar um número n desejado de g.d.l. sem que jamais o acoplamento se torne hiperestático. É ao conjunto de metodologias para a solução deste problema que chamamos de **projeto cinemático**.

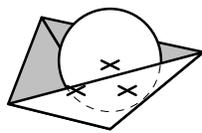


Figura 3.20 Locação para restrição de 3 gdl (translações x, y e z)

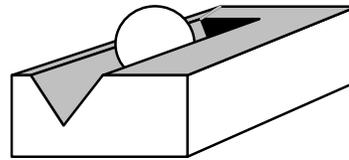


Figura 3.21 Locação para restrição de 2 gdl (translações em x e y)

O projeto cinemático se baseia exclusivamente no seguinte princípio: *Ao se desejar que um objeto tenha n graus de liberdade, será necessário que este esteja em contacto com um outro objeto em $6-n$ pontos.*

Apesar do que foi dito anteriormente, não se conhece nenhuma metodologia que permita DEDUZIR a melhor solução para uma dada necessidade. O que existem são conjunto de soluções já propostas anteriormente. As figuras seguintes mostram alguns tipos de locações bem conhecidas e exemplos de acoplamentos bem utilizados. No estudo de algum caso novo, a orientação é que se observe rigorosamente o princípio do projeto cinemático, com auxílio dos conhecimentos de estática dos sólidos e aproveitar os acoplamentos já conhecidos.