



**Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Eletrônica**

Laboratório de Controle e Automação I

Instrumentação

Transdutor de Posição com LVDT

Prof. José Carlos Rodrigues de Oliveira, Dr.

**Belo Horizonte, fevereiro de 2005
Revisão em março de 2009**

Introdução

Em processos industriais e em máquinas ferramenta, há necessidade de se medirem pequenos deslocamentos ou posições retilíneos com grande precisão. Entre os sensores desenvolvidos para realizar tais medições destacam-se os **Transformadores Diferenciais Variáveis Linearmente (LVDT - Linear Variable Differential Transformer)** [1], pela sua praticidade e confiabilidade nas medições. Um exemplo desse sensor é o LD200, fabricado pela Omega Engineering [3], mostrado na Figura 1.



Figura 1 – O LVDT LD200.

A Figura 2 mostra o esquema elétrico de um LVDT [3]: ele é um transformador, cujas tensões induzidas nos dois enrolamentos secundários dependem da posição do núcleo magnético. Uma vez aplicada uma tensão externa senoidal no enrolamento primário, a tensão em cada enrolamento secundário será tanto maior quanto mais acoplado ele estiver em relação ao enrolamento de excitação [1].

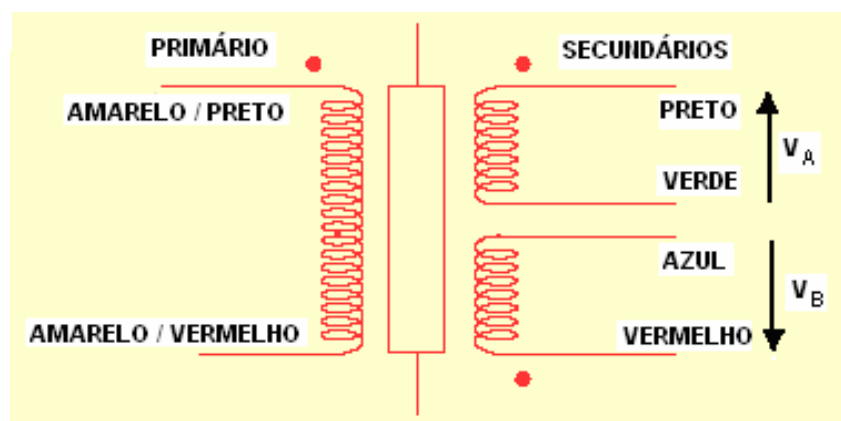


Figura 2 – Esquema elétrico do LVDT LD200

Para entender o funcionamento do LVDT, supor que o núcleo magnético esteja na sua posição central, isto é, eqüidistante dos dois enrolamentos secundários. Nesta situação, as tensões V_A e V_B (Figura 2) induzidas nos dois secundários serão iguais.

De uma forma geral, as tensões V_A e V_B podem ser descritas em função de um coeficiente α e da frequência f de excitação do primário:

$$V_A(t) = \left[\frac{V_P}{2} (1 + \alpha) \right] \sin(2\pi ft)$$

$$V_B(t) = \left[\frac{V_P}{2} (1 - \alpha) \right] \sin(2\pi ft)$$

α correspondente ao deslocamento x do núcleo, medido em relação à sua posição central. Considerar-se-á o deslocamento do núcleo variando o fator α (entre +1 e -1), para um dos lados ($\alpha > 0$) ou para o outro lado ($\alpha < 0$), relativamente ao seu curso total. O valor $\alpha = 0$ equivale ao núcleo eqüidistante dos dois enrolamentos secundários, posição $x = 0$, estando as suas tensões induzidas em fase e com o mesmo valor de pico ($V_P/2$). Das expressões acima, observa-se que a soma dos valores de pico dessas duas tensões senoidais V_A e V_B é igual a V_P .

Utilizando-se o modelo acima, o valor de pico V_P poderia ser previsto para $\alpha = +1$, posição máxima ($+x_M$), e para $\alpha = -1$, posição máxima inversa ($-x_M$)? Isto corresponderia a situações de máximo acoplamento do primário com um dado enrolamento e ao desacoplamento total com o outro, como mostra a Figura 3.

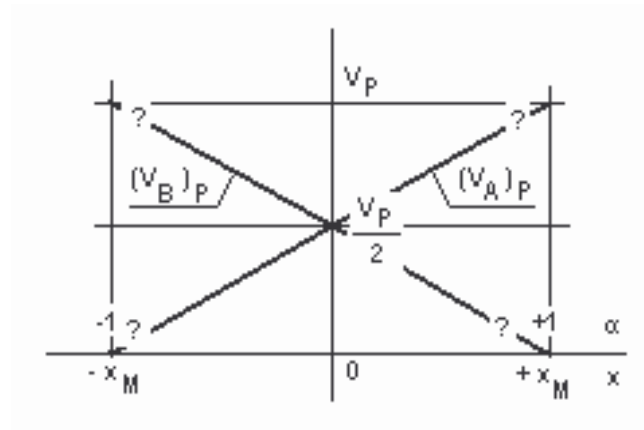


Figura 3 – Característica ideal do LVDT.

A Figura 4 apresenta detalhes construtivos do LVDT [6]. Segundo o autor, o curso do núcleo deverá ser menor do que o comprimento do encapsulamento das bobinas, para que se tenha boa linearidade, o que comprova que não se chegará às situações de $\alpha = +1$ e de $\alpha = -1$. Aliás, um grande distanciamento (do núcleo) de uma bobina já colocaria a outra bobina fora do acoplamento máximo com o primário.

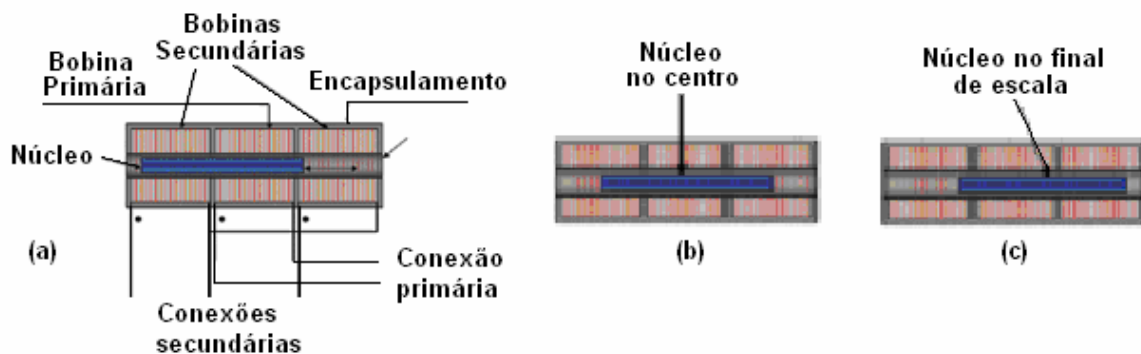


Figura 4 – Detalhes construtivos do LVDT

As tensões do secundário devem ser processadas de tal forma que:

$$V_{\alpha} = \frac{V_A - V_B}{V_A + V_B} = \alpha$$

onde V_{α} é a tensão (normalizada) proporcional ao deslocamento relativo do núcleo.

O LVDT utilizado no laboratório é o LD200-2.5, fabricado pela Omega Engineering. Ele trabalha em uma faixa de deslocamento retilíneo de $\pm 2,50$ mm, possui linearidade de 0,25% do fundo de escala (quando operando a 2,5 kHz), sensibilidade de 180 mV/V/mm, tensão de excitação de 1 a 10V RMS e frequência de operação de 1 a 10 kHz [3].

Desafio: O que é um **RVDT**?

Para a excitação do primário é necessário um circuito gerador de sinal senoidal. As tensões induzidas nos dois secundários devem ser condicionadas e processadas, para se obter um sinal analógico de tensão, imagem do deslocamento do núcleo. Um circuito integrado capaz de realizar todas essas funções é o **AD598**, fabricado pela **Analog Devices** [4]. A Figura 5 mostra o seu diagrama funcional, que executa internamente as operações descritas anteriormente.

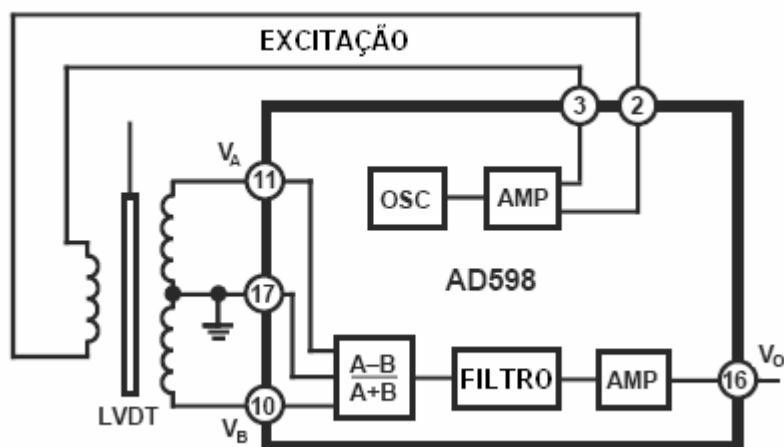


Figura 5 – Diagrama funcional do AD598.

Preparação para o experimento:

- 1) Ler o datasheet da OMEGA Engineering [3] no Anexo 1 e verificar as principais características do LVDT tipo LD200-2.5.
- 2) Descrever as funções e as principais características do circuito integrado AD598, com o auxílio do datasheet da Analog Devices [4], no Anexo 2.
- 3) Informar-se sobre leitura de deslocamento com um micrômetro [Anexo 3]. Qual é o valor indicado no exemplo (com duas casas decimais)?

Parte Experimental

- 1) Verificar as partes constituintes do kit construído para o transdutor com LVDT [2].
- 2) Fazer o ajuste de “zero” com o núcleo do LVDT na posição central: com $V_A(t) = V_B(t)$, lidas com osciloscópio, anotar o valor de deslocamento d_0 do micrômetro, e atuar no trimpot (R_3 - R_4) até que a tensão de saída V_O do transdutor seja igual a 0,00 V. Escrever uma expressão matemática relacionando a escala “x” de deslocamento com o valor de leitura “d” do micrômetro. Calcular o valor V_P mostrado na Figura 3 e verificar se a frequência das tensões no LVDT está dentro das especificações do LD200 e do chip AD598?
- 3) Ajustar o “fundo de escala” do transdutor: para a posição de deslocamento $x = +2,50$ mm, atuar no trimpot de ganho de modo que a tensão $V_O = +1,00$ Volt. Em seguida, para $x = -2,50$ mm, verificar se $V_O = -1,00$ Volt.
- 4) Levantar pontos experimentais ($V_O \cdot x$) da Característica Estática do Transdutor, sendo 20 pontos com variações para a direita e 20 com variações para a esquerda, além do ponto correspondente à posição “zero”. Em cada uma das 41 posições, medir com osciloscópio as amplitudes de V_A e de V_B e calcular o fator α correspondente. Qual é a faixa de α utilizada?
- 5) Com o auxílio de um Software (p. ex., Planilha Excel ou MATLAB) obter o gráfico V_O [Volts] em função de x [milímetros].
 - Fazer uma regressão de primeira ordem nessa curva experimental.
 - Obter a função analítica $V'_O = f(x)$, isto é, a equação de calibração do transdutor. Qual é o ganho k do transdutor (dado em Volt / mm)?
 - Demonstrar que a tensão de saída do transdutor de deslocamento é:
$$V'_O = \alpha \cdot V_{OM} = k \cdot (d - d_0) = k \cdot x$$
sendo V_{OM} o maior valor positivo na saída do transdutor.
 - Calcular e plotar o erro de linearidade do transdutor, em função do deslocamento x :
$$E_L(x) = V_O(x) - V'_O(x)$$
Qual é o seu maior valor absoluto, em % do “span”?
- 6) Repetir os passos (4) e (5), variando x em intervalos de 1,00 mm, na faixa estendida que toca as duas extremidades de curso do micrômetro. Comparar o erro de linearidade com aquele obtido anteriormente.

Conclusões

1. Os resultados dos ensaios estáticos mostraram se o sinal de saída do transdutor varia proporcionalmente ao deslocamento do núcleo?
2. Na faixa de $\pm 2,50$ mm, o maior valor percentual experimental do erro de linearidade da tensão de saída V_O é compatível com aquele atribuído pelo fabricante ao LVDT? Por quê? E na faixa estendida estudada no item (6)?

3. As classes de erro de linearidade do micrômetro, do osciloscópio e do multímetro utilizados são compatíveis com aquela especificada para o LVDT? Quais as fontes de erro do transdutor de posição, como um todo?
4. Apontar possíveis aplicações para um Transdutor de Deslocamento com LVDT.

Desafio:

Observar a figura do **Anexo 4** e provar analiticamente que um LVDT pode ser utilizado como sensor de pressão.

Referências Bibliográficas

1. Doebelin, E. O.
Measurement Systems – Application and Design
McGraw-Hill International Editions, 4th Edition, 1990.
2. Luz, E.J.S.; Butilheiro, V.T.; Sathler, T.H.S.
Desafio de Instrumentação: Sensor de Posição com LVDT – Relatório Final.
Laboratório de Controle e Instrumentação I – Dep. de Engenharia Eletrônica
da EE-UFMG, dezembro/2004.
3. Omega Engineering
AC POWERED LVDT TRANSDUCERS – LD200 SERIES.
www.omega.com, acesso em outubro/2004.
4. Analog Devices
AD598 – LVDT Signal Conditioner
www.analog.com, acesso em novembro/2004.
5. Mitutoyo America Corporation
Catalog No. 2004
<http://www.mitutoyo.com/pdf/E1006MicrometerHeads.pdf>
<http://www.mitutoyo.com/catalog/pdf/L-14-17.pdf>, acesso em março/2005.
6. David S. Nyce
The LVDT: A Simple and Accurate Position Sensor
Revolution Sensor, Aug 1, 2005
<http://www.sensorsmag.com/sensors/article>, acesso em 04/03/2009.

ECONOMICAL LVDT DISPLACEMENT TRANSDUCERS

AC POWERED
 ± 1.25 TO ± 10.0 MM
 (± 0.050 TO ± 0.400 ")

LD200 Series
 Starts at
\$115

- Low Cost—High Linearity
- Rugged Construction for Machine Tools and Vehicles
- Large Core Clearance for Easy Installation
- Compatible with Standard AC LVDT Instruments
- Cores are Reversible and Interchangeable

The LD200 Series AC-powered LVDT displacement transducers are ruggedly constructed, delivering high performance at a low cost. Along with a broad measurement range, from 1.25 to 10 mm (0.05 to 0.40"), these transducers have high resolution and repeatability.

The coils are wound on a rugged bobbin housed in a stainless steel case. Epoxy-bonded construction makes these devices suitable for applications involving wet or oily environments, or high levels of mechanical stress (vibration, shock, etc.). The armature assembly ensures friction-free movement within the sensor because of the large radial clearance of the bore.

These transducers offer excellent linearity, low levels of residual voltage, and good temperature coefficients. They are thus ideal for most industrial or general purpose displacement measurement applications.

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL

Linearity: See chart

Sensitivity: See chart (mV/V/mm)

Excitation: 1 to 10 Vrms

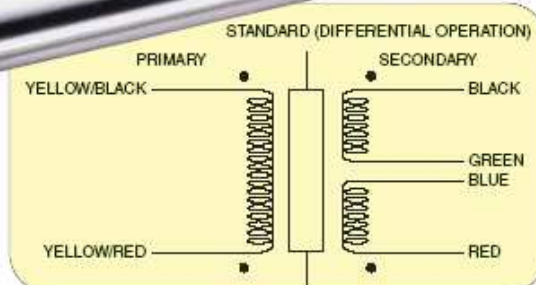
Excitation Frequency: 1 to 10 kHz

Energizing Current: <40 mA

Frequency Response:

10% of excitation frequency

LD200-10, \$260,
 shown smaller than
 actual size.



LD200-7.5, \$225, shown
 smaller than actual size.

Zero Offset: 0.5% FS

Operating Temperature:

-55 to 150°C (-67 to 302°F)

Compensated Temperature:

-55 to 150°C (-67 to 302°F)

Thermal Effects:

Zero: 0.025%/°C

Sensitivity: 0.020%/°F

Electrical Termination:

0.3 m (12") leads

Electrical Connections:

Yellow/Black: Excitation

Yellow/Red: Excitation

Black: + Signal

Red: Signal ground; connect blue
 and green together

MECHANICAL

Core Mass:

LD200-1.25: 3.7 g (0.13 oz)

LD200-2.5: 6.2 g (0.22 oz)

LD200-5: 9.1 g (0.32 oz)

LD200-7.5: 11.3 g (0.40 oz)

LD200-10: 14.2 g (0.50 oz)

Core Thread: 6-40 UNF

Core Material: NiFe—Radio Metal 50

Radial Core Clearance: 1.6 mm (0.062")

Case Material: 400 Series SS

Case Weight:

LD200-1.25: 33 g (1.16 oz)

LD200-2.5: 43 g (1.52 oz)

LD200-5: 48 g (1.73 oz)

LD200-7.5: 71 g (2.50 oz)

LD200-10: 74 g (2.61 oz)

MODEL NO.	Nominal Range		Linearity—Typical 2.5 kHz % of Full Scale				Sensitivity @ 2.5 kHz—Nom.	
	mm	in	50%	100%	125%	150%	mV/V/mm	mV/V/0.001"
LD200-1.25	± 1.55	± 0.06	0.10	0.25	0.25	0.50	250	6.35
LD200-2.5	± 2.50	± 0.10	0.10	0.25	0.25	0.50	180	4.50
LD200-5	± 5.00	± 0.20	0.10	0.25	0.25	0.50	100	2.54
LD200-7.5	± 7.50	± 0.30	0.10	0.25	0.25	0.50	57	1.40
LD200-10	± 10.0	± 0.40	0.10	0.25	0.25	0.40	35	0.90

To Order (Specify Model Number)

MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!

MODEL NO.	PRICE	COMPATIBLE INSTRUMENTS*
LD200-1.25	\$115	DP-LVDT, LDX-2, LDX-3A, LDX-4
LD200-2.5	165	DP-LVDT, LDX-2, LDX-3A, LDX-4
LD200-5	205	DP-LVDT, LDX-2, LDX-3A, LDX-4
LD200-7.5	225	DP-LVDT, LDX-2, LDX-3A, LDX-4
LD200-10	260	DP-LVDT, LDX-2, LDX-3A, LDX-4

* See omega.com for compatible instruments.

Comes with complete operator's manual.

Ordering Example: LD200-5, LVDT displacement transducer with a range of ± 5 mm (± 0.20 "), \$205.

Anexo 2: Circuito de excitação e conformação com AD598

O circuito de excitação e conformação para o transdutor de posição está mostrado na Figura A2.1, baseado no integrado AD598 da Analog Devices [4] e no trabalho de [2].

O resistor R1 determina a amplitude do sinal de excitação do LVDT e o capacitor C1 fixa a sua frequência. Os capacitores C2, C3 e C4 selecionam a frequência de corte de um filtro passa-baixa, de modo que a faixa de passagem do transdutor possa ser limitada. O resistor R2 seleciona o ganho para o ajuste do fundo de escala. Os resistores R3 e R4 são utilizados para adicionar *off-set* no sinal de saída, de forma a se ajustar o “zero” do transdutor. Finalmente, a fonte de alimentação é obtida por um retificador de onda completa a diodos, simétrico e regulado em $\pm 15V$.

Os conectores DB-9 apresentados na figura referem-se, respectivamente, às conexões com o LVDT (em cima) e com o circuito do transdutor (em baixo).

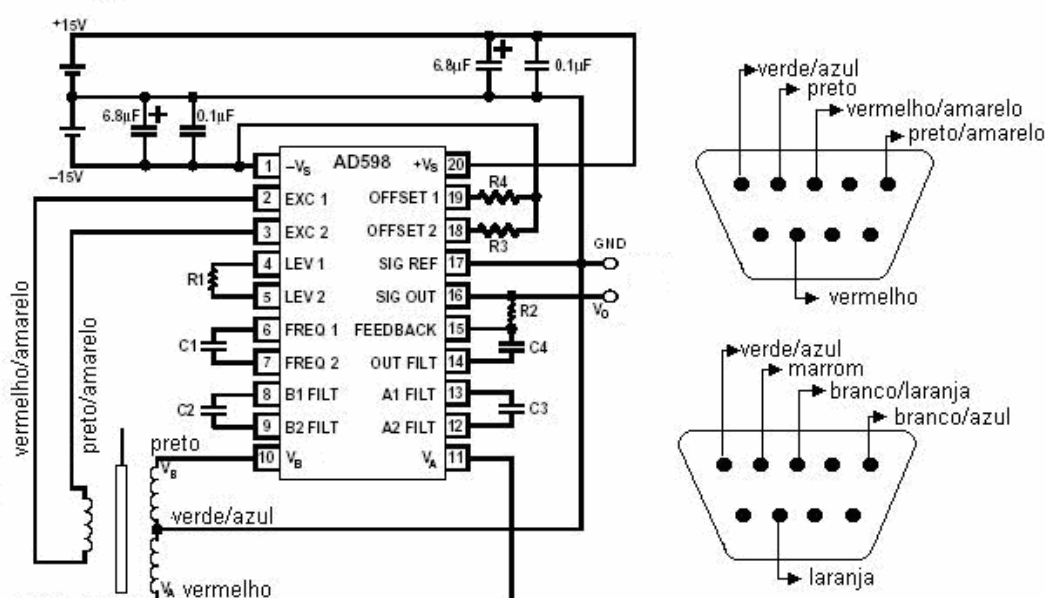


Figura A2.1 – Circuito do Transdutor de Posição.

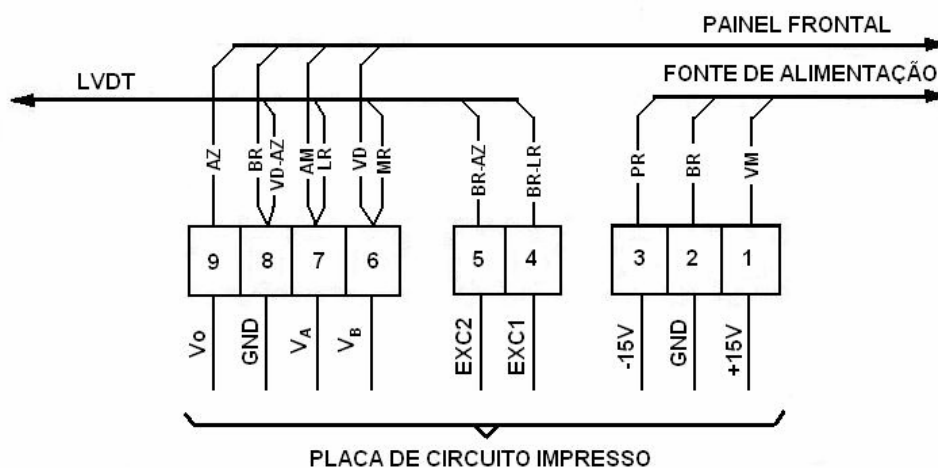


Figura A2.2 – Régua de Bornes do Transdutor de Posição.

Anexo 3 – Micrômetro

Fonte: www.mitutoyo.com

Data de acesso: 23/03/2005



Features

- Carbide faces.
- Positive locking clamp.*
- Ratchet stop or Friction Thimble for exact repetitive readings.
- Baked-enamel-finished frame.
- Clear graduations on satin-chrome finish.
- Complete with fitted carrying case.

*Unless otherwise noted

- Flatness: 0.6µm (.000024") for models up to 300mm (12")
1µm (.00004") for models over 300mm (12")
- Parallelism: $(2+L/100)\mu\text{m}$ [.00008+.00004 (L/4)]*
- * L=Maximum measuring length (mm) [(inch)]. Fraction rounded down

Specifications

Outside Micrometers

Metric

Order No.	Range	Resolution	Accuracy	Remarks
103-125	0-25mm	0.01mm	±0.002mm	Friction Thimble type
103-126	25-50mm	0.01mm	±0.002mm	Friction Thimble type with Standard
103-133	0-25mm	0.001mm	±0.002mm	Friction Thimble type
103-134	25-50mm	0.001mm	±0.002mm	Friction Thimble type with Standard
103-137	0-25mm	0.01mm	±0.002mm	Ratchet Stop type
103-138	25-50mm	0.01mm	±0.002mm	Ratchet Stop type with Standard
103-139-10	50-75mm	0.01mm	±0.002mm	Ratchet Stop type with Standard
103-140-10	75-100mm	0.01mm	±0.003mm	Ratchet Stop type with Standard
103-141-10	100-125mm	0.01mm	±0.003mm	Ratchet Stop type with Standard
103-142-10	125-150mm	0.01mm	±0.003mm	Ratchet Stop type with Standard
103-143-10	150-175mm	0.01mm	±0.004mm	Ratchet Stop type with Standard
103-144-10	175-200mm	0.01mm	±0.004mm	Ratchet Stop type with Standard
103-145-10	200-225mm	0.01mm	±0.004mm	Ratchet Stop type with Standard
103-146-10	225-250mm	0.01mm	±0.005mm	Ratchet Stop type with Standard
103-147-10	250-275mm	0.01mm	±0.005mm	Ratchet Stop type with Standard
103-148-10	275-300mm	0.01mm	±0.005mm	Ratchet Stop type with Standard

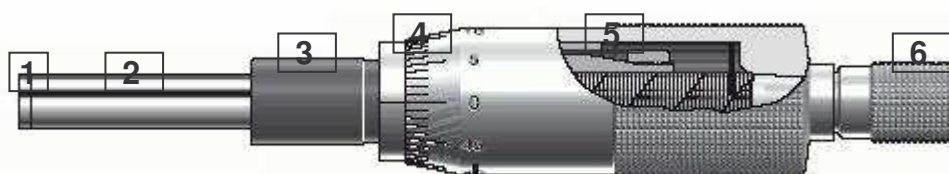
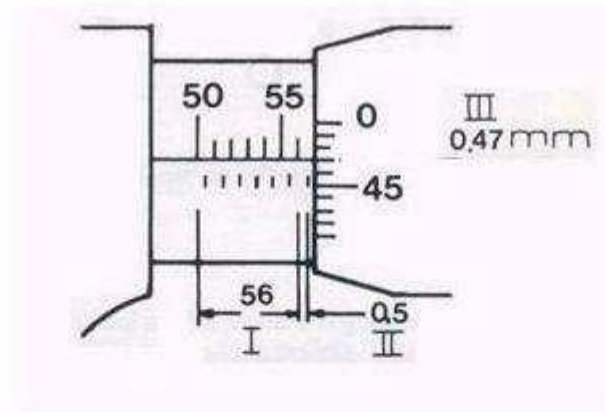


Figura A3.1 – Cabeça do micrômetro.

As partes da cabeça do micrômetro, mostradas na figura A3.1, são:

- 1 – Extremidade de contato com a peça a ser medida;
- 2 – Haste;
- 3 – Escala longitudinal, graduada em metade de milímetro;
- 4 – Escala circular (parte decimal);
- 5 – Cilindro principal, para a rotação de todo o conjunto;
- 6 – Cilindro de ajuste do torque de contato.

Micrómetro: Exemplo de leitura



Paso I.

Lea la escala (I) sobre la línea de revolución en la escala 56mm

Paso II

Vea si el extremo del manguito está sobre la marca .5 mm, si está sobre .5mm, agregue .5 mm (A)

Si está abajo 0.5 mm, no agregue nada. (B)

Paso III

Tome la lectura de la escala sobre el manguito, la cual coincide con la línea de revolución de la escala .47 mm

Paso Final

El total de las lecturas en los pasos I, II, III, es la lectura correcta.

Anexo 4 (Desafio) – Sensor de Pressão Indutivo

Fonte: Fundamentals of Pressure Sensor Technology - PART 2

Robert E. Bicking, Honeywell Micro Switch

http://archives.sensormag.com/articles/1198/fun1198/fun1198_2.shtml

Data de acesso: 20/02/2009.

Algumas configurações baseadas em indutância variável ou em acoplamento indutivo são utilizadas em transdutores de pressão. Todas elas requerem que uma bobina seja excitada com tensão CA e, se um sinal CC é desejado na saída, é necessário fazer-se uma demodulação e subsequente filtragem.

Na figura A4.1 abaixo, o deslocamento do núcleo de um LVDT é utilizado para variar o acoplamento indutivo entre o seu primário e os dois secundários. O LVDT possui uma baixa resposta em frequência, devido à necessidade de mover o seu núcleo ferromagnético.

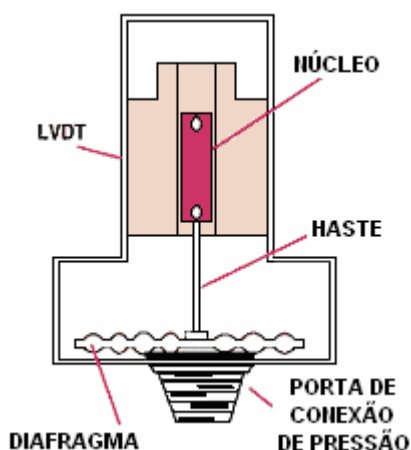


Figura A4.1: Sensor de pressão com LVDT.