

TRANSDUTORES DE PRESSAO

ARIVALDO VICENTE GOMES

INFORMAÇÃO IEA N.º 40
Janeiro — 1975

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SAO PAULO — BRASIL

TRANSDUTORES DE PRESSÃO

Arivaldo Vicente Gomes

**Coordenadoria de Engenharia Nuclear
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil**

**Informação IEA Nº 40
Janeiro - 1975**

Instituto de Energia Atômica

Conselho Superior

Eng^o Roberto N. Jafet - Presidente
Prof. Dr. Emilio Mattar - Vice-Presidente
Prof. Dr. José Augusto Martins
Prof. Dr. Milton Campos
Eng^o Helcio Modesto da Costa

Superintendente

Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

TRANSDUTORES DE PRESSÃO

Arivaldo Vicente Gomes

Introdução:

Este trabalho consiste em uma parte teórica, onde descrevemos algumas características dos transdutores de pressão tipos ponte e potenciométrico, e uma parte prática, na qual relatamos os ensaios realizados neles.

A introdução teórica nos foi muito útil, principalmente por esclarecer certos pormenores omissos pelo fabricante, possibilitando um melhor conhecimento de certas particularidades dos sistemas estudados.

Desenvolvemos alguns modelos teóricos, sendo outros completados a partir de referências.

A parte experimental serviu, principalmente, para provar a eficiência da aparelhagem em usos práticos.

Inicia-se este trabalho com a parte teórica, passando posteriormente aos ensaios experimentais, focalizando curvas características de transdutores, acoplamento, calibração, métodos de medidas, etc.

PARTE TEÓRICA

1 - "STRAIN GAUGE" baseado na variação da resistência de um fio com a deformação

A corrente elétrica num condutor é produzida pelo fluxo de elétrons livres através de espaços vazios dentro da estrutura cristalina do metal.

Qualquer resistência ao fluxo eletrônico é causada pelos átomos que constituem a rede cristalina; devemos esperar, assim, que um metal puro, dotado de uma estrutura cristalina bem regular, tenha menor resistência do que uma liga. Isso geralmente ocorre. Por outro lado, se o movimento térmico dos átomos no retículo cristalino aumenta, a interferência ocorrerá, conseqüentemente, um aumento da resistividade com a temperatura.

Pode-se também aceitar que a deformação de um pedaço de fio aumentará a resistência elétrica, pois teremos distorções na rede cristalina que dificultarão a passagem dos elétrons.

A disposição tridimensional dos átomos dentro do retículo será afetada e, conseqüentemente, sua resistividade.

Podemos estudar essa variação introduzindo $\delta\rho$ como a contribuição para a variação dR , obtendo, para uma variação de tensão mecânica $d\sigma$, em temperatura constante, o raciocínio que

segue.

Suponhamos um pedaço de fio com o comprimento (L) e o diâmetro (d). Considerando-se a resistência elétrica do fio como

$$R = \rho \frac{L}{a},$$

onde (ρ) é a resistividade do material que o compõe, e (a) sua área transversal, teremos, fig. 1

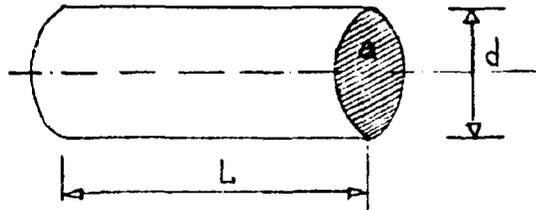


Fig 1

$$\frac{dR}{d\sigma} = \frac{d}{d\sigma} \left(\rho \frac{L}{a} \right) = \frac{\rho}{a} \frac{\partial L}{\partial \sigma} + L \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - \frac{\rho L}{a^2} \frac{\partial a}{\partial \sigma}$$

Dividindo ambos os membros por $R = \rho \frac{L}{a}$ e substituindo as diferenciais por acréscimos infinitesimais, o que é possível se admitirmos que $\frac{\partial L}{\partial \sigma}$, $\frac{\partial a}{\partial \sigma}$ e $\frac{\partial \rho}{\partial \sigma}$, variam muito pouco, teremos:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\rho}{a} \frac{\Delta L}{\rho L} + L \frac{\Delta \rho}{\rho L} - \frac{\rho L}{a^2} \frac{a \Delta a}{\rho L}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{L} \Delta L + \frac{1}{a} \Delta a \quad (I)$$

$$a = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{Admitindo-se uma variação bem pequena no diâmetro, ter-se-á}$$

$$\Delta a = \frac{2\pi \Delta d}{4} = \frac{\pi d \Delta d}{2} \quad (II)$$

$$a = \frac{\pi d^2}{4} \quad (III)$$

$$\text{Dividindo-se (II) por (III)} \rightarrow \frac{\Delta a}{a} = 2 \frac{\Delta d}{d} \quad (IV)$$

Introduzindo-se a razão de Poisson ν (razão entre a contração lateral e a elongação longitudinal), a contração lateral do fio será, fig 2:

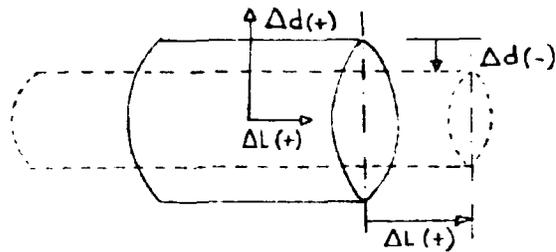


Fig. 2

$$\frac{\Delta d}{d} = -\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (V)$$

Do sistema (V), (IV) e (I), resulta:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

O fator "gauge" K (sensibilidade à deformação, portanto é:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta L/L}$$

Para a maioria dos metais $\nu = 0.3$, e o fator "gauge" torna-se:

$$K = 1,6 + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta L/L}$$

Este é um resultado bem interessante, pois praticamente K é maior do que 1,6. Deverá, portanto, haver alguma variação da resistividade no fio considerado.

De fato, muitas ligas metálicas com coeficientes de resistividade bem baixos quanto à temperatura, por exemplo as ligas de cobre e níquel, têm um fator "gauge" próximo de dois.

Com estas ligas podemos medir valores altos e baixos de deformação com um "gauge" de fator constante, o que pode ser visto no esquema seguinte, fig. 3.

Outras ligas e a maioria dos metais puros são menos utilizáveis. O níquel possui um fator "gauge" variável.

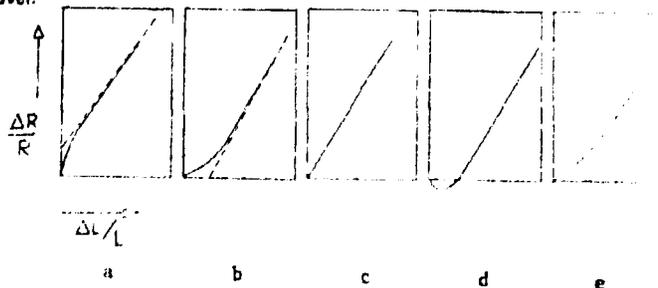


Fig. 3

- a) - ferro, cobre, platina, 10% irídio platina, 10% ródio-platina
- b) - 40% platina paládio
- c) - cobre recozido
- d) - níquel
- e) - minalpha

II - Transdutores de pressão.

Neste trabalho, pressão significará uma diferença de pressão entre dois pontos de um sistema sensor de pressão

Exceto nos raros casos de uma pressão diferencial muito pequena, superposta a uma pressão elevada não conhecida, um dos dois pontos de pressão está numa pressão de referência bem definida, como o "vacuo" (pressão absoluta), pressão ambiente (pressão "gauge"), ou qualquer outro nível de pressão

Portanto, os transdutores de pressão diferencial têm duas tomadas de pressão de trabalho. Os transdutores de pressão "gauge" têm uma tomada de pressão, estando a outra à pressão atmosférica

Finalmente, os transdutores de pressão absoluta têm somente uma tomada, estando a outra numa pressão bem reduzida (vácuo).

III - Tipos de transdutores.

a) Tipo cantoneira:

Em transdutores do tipo "strain gauge", a pressão pode ser medida indiretamente, seguindo a deformação de um diafragma ou de uma cápsula. Essa deformação atua sobre um sistema elétrico, variando sua resistência

A seguir, daremos alguns exemplos de cápsulas e diafragmas, fig 4.

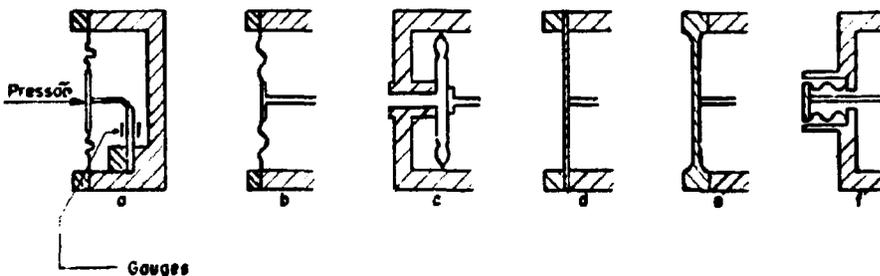


Fig 4

- a) - diafragma do tipo pistão
- b) - diafragma corrugado

- c) - cápsula
- d) - diafragma plano parafusado
- e) - diafragma plano usinado
- f) - tipo fole

b) tipo barril.

No esquema que segue, são apresentados os transdutores de pressão do tipo barril que é um modelo mais aprimorado, apresentando-se em duas versões, fig. 5a e 5b

- a) tubo cilíndrico
- b) tubo elíptico.

O tambor cilíndrico em (a) tem usualmente dois enrolamentos ativos em torno da parte ôca do cilindro e dois enrolamentos não ativos na parte não deformável do elemento cilíndrico

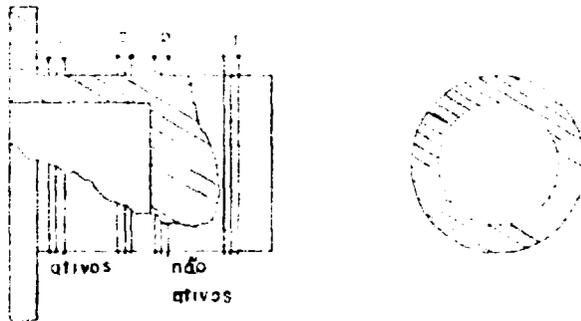


Fig. 5a

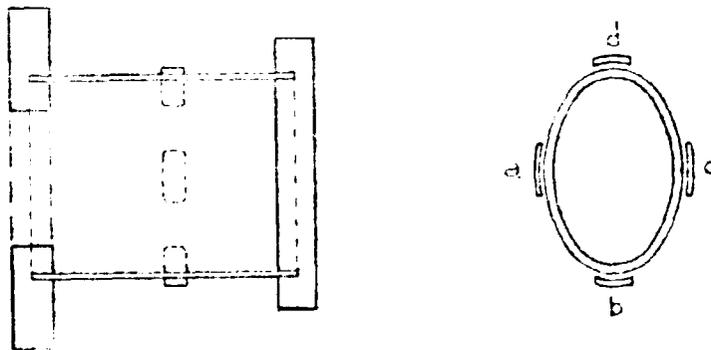


Fig. 5b

Aplicando-se pressão ao transdutor o tubo expandirá no formato de um barril, havendo um aumento da resistência elétrica nos enrolamentos a e c; ao mesmo tempo os enrolamentos b

e d dão a necessária compensação quanto as variações da temperatura

Para um tubo de paredes finas (a espessura da parede é desprezível comparada ao raio do tubo) a deformação tangencial na parede, numa pressão P (N/m^2) é:

$$e = \frac{Pr}{Et} \left(1 - \frac{\nu}{2}\right) \left(\frac{m}{m}\right)$$

r (m) = raio médio do tubo

t (m) = espessura da parede

E (N/m^2) = módulo de Young

ν = razão de Poisson do material

O modelo cilíndrico (a) é utilizável somente para altas pressões, enquanto o tubo elíptico (b) cobre a faixa das pequenas pressões, tendo uma melhor taxa de sobrecarga pois o tubo elíptico se deforma assumindo o formato circular antes de arrebentar.

Os "strain gauges" a e c estão interligados entre si, o mesmo ocorrendo com b e d

No modelo elíptico, a e c estão tracionados, enquanto b e d acham-se comprimidos

Constrói-se, assim, uma ponte de Wheatstone com quatro ramos ativos.

IV - Tipos de diafragma.

Faremos referência aos transdutores com "strain gauges" ligados a um diafragma sensor de pressão, conforme fig 6:

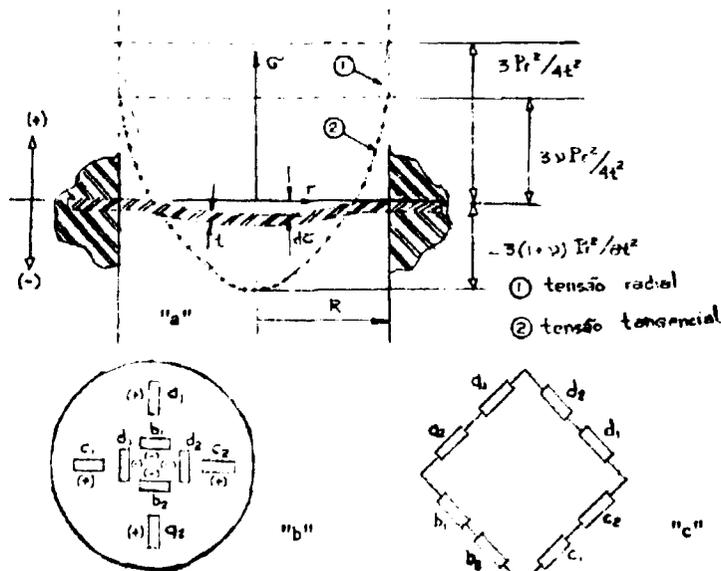


Fig 6

Diafragma de pequena espessura

- tensões radiais e tangenciais
- localização dos "strain gauges" no diafragma
- "gauges" no circuito em ponte

Mostra-se, na figura (a) a distribuição de tensões para deflexões pequenas, num diafragma de pequena espessura

Comumente, faz-se um circuito em ponte com pelo menos dois "gauges" tracionados na direção radial, perto das extremidades do diafragma e dois "gauges" comprimidos na direção tangencial localizados na parte central do diafragma. Isso permite tirar vantagem das máximas variações de tensões nestas localizações

A figura (b) mostra um arranjo simétrico com um total de oito "gauges", encontrando-se na figura (c) o circuito elétrico correspondente

Os requisitos principais num diafragma são:

- A relação pressão-deformação deve ser linear
- Deve-se dimensionar a espessura do diafragma para mantê-lo dentro dos limites de segurança

V - Condições de linearidade.

Podem ser mostrados que a condição de linearidade na deformação de um diafragma de pequena espessura, circular e parafusado, quando solicitado uniformemente por uma pressão $P(N/m^2)$ é satisfeita pela regra que deflexão central não deve exceder a metade da espessura do diafragma, fig 7

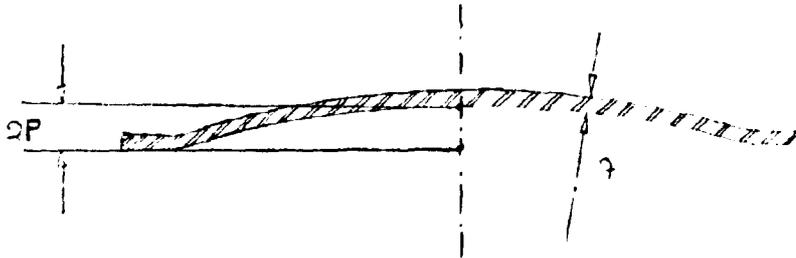


Fig 7

$$\delta_c = \frac{3(1 - \nu^2) r^4 P}{16 E t^3} \leq t/2 \text{ (m)}$$

A pressão máxima para operações lineares é portanto

$$P_{\max} \leq \frac{8E}{3(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (I)$$

A equação acima será representada graficamente no item seguinte para diafragmas de aço e duralumínio

Notar, no gráfico que para uma razão $r/t \cong 100$, a faixa útil de pressão, quando há relação linear, é aproximadamente igual a 1 lb/in^2

Faixas muito maiores não são permissíveis em razão de excessivas tensões no diafragma, conforme será mostrado a seguir.

VI- Condições de tensões seguras.

Além da condição (V) de linearidade, o diafragma não deve ser operado além de um valor seguro de tensão, característico do material e do modo de sollicitação mecânica, devendo-se ressaltar que ele é sollicitado muitas vezes durante sua vida útil.

Tem-se, como exemplo de tensões seguras para dois tipos de diafragma:

a) diafragma de aço = $75 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

b) diafragma de alumínio = $30 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

Calcula-se, agora, a máxima tensão radial na circunferência de distintos valores (r/t) , de acordo com a equação:

$$\sigma = \frac{3}{4} P_{\max} \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (II)$$

Na equação (II), P_{\max} , foi obtida da expressão (I), para assegurar que se está trabalhando com a condição (V) de linearidade

Tracemos os gráficos (fig. 8) correspondentes às equações (I), (II) e a equação que dá a deformação $e = \sigma/E$, todas em função da razão (r/t) .

No cálculo dos valores de pressão máxima na equação (I), usou-se a tabela seguinte:

MATERIAL	MÓDULO DE YOUNG E (N/m ²) 10 ¹⁰	RAZÃO DE POISSON ν
Alumínio	7,0	0,34
Latão	10,0	0,35
Cobre	11,0 - 13,0	0,34
Duralumínio	7,1	0,34
Vidro	5,0 - 7,0	0,2 - 0,3
Níquel	20,4	0,28
Bronze Ferroso	12,0	0,38
Aço	21,0	0,29
Titânio	11,8	0,32
Zinco	8,7	0,21
Ferro Fundido	10,0 - 13,0	0,2 - 0,3

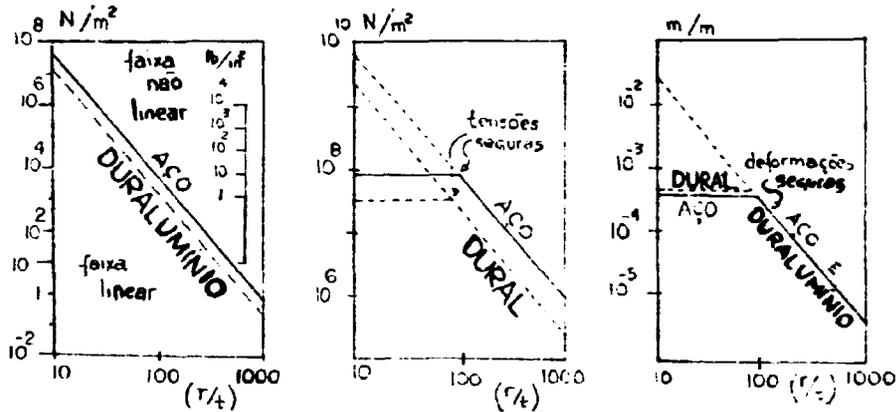


Fig. 8

- pressão máxima na faixa linear
- tensão radial máxima na faixa linear
- deformação máxima correspondente à máxima tensão na faixa linear

$$a) P_{\max} = \frac{8E}{3(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^4 \quad (\text{N/m}^2)$$

$$b) \sigma = \frac{3}{4} P_{\max} \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^2 \quad (\text{N/m}^2)$$

$$c) \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (\text{m/m})$$

As quebras bruscas nos gráficos (b) e (c) da fig. 8 decorrem dos limites de tensões seguras anteriormente fixados.

São as seguinte as razões para restringir-se a faixa de variação $\left(\frac{r}{t}\right)$ dentro dos limites 10 a 1000:

- Para diafragmas muito espessos $\left(\frac{r}{t} \rightarrow 10\right)$, nosso estudo não é mais válido, pois inicialmente admitimos diafragma fino. Além disso, tal faixa não teria atrativo prático, pois a deformação máxima seria constante, e a sensibilidade (deformação/pressão) cai com o aumento da espessura.
- Para razões $\left(\frac{r}{t}\right)$ muito altas $\left(\frac{r}{t} \rightarrow 1000\right)$ a faixa linear útil cai muito rapidamente (figura (a)) e a deformação que poderia ser medida seria bem menor. A maioria dos diafragmas têm razões $\frac{r}{t}$ ao redor de 100, mas mesmo assim a máxima deformação radial é bem abaixo de 0,1%. Desde que os "strain gauges" devem ser localizados a alguma distância da região deformável, a deformação disponível será portanto, ainda menor. Poderia ser alcançada uma melhoria no nível de deformação, empregando-se materiais com módulo de Young maior e maiores tensões de segurança. O ganho do sistema, porém, não aumentaria muito e o perigo de fraturas decorrente da fadiga, conjuntamente com o aumento da histerese, limitaria o emprego do diafragma em pressões maiores. O uso de "strain gauges", em diafragmas planos é limitado pela

baixa deformação disponível em baixos níveis de tensões, quando se impõem condições de linearidade e tensões mecânicas seguras

VII - Elementos de transdutores do tipo "strain gauges" de fio metálico não solidário.

Esses tipos de transdutores são basicamente extensômetros. Entretanto, como é necessária uma força bem definida para deformar o fio da armação (fig 9), os extensôres podem ser usados como dinamômetros.

Usam-se os tipos de transdutores referidos para medir forças derivadas de pressão e de aceleração

Fisicamente o sistema é formado por enrolamentos isolados com fios de pequeno diâmetro (0,025 mm). O número de enrolamentos varia entre 2 e 20.

Cada enrolamento está preso a um pino isolado de uma plataforma móvel e em outro pino de uma moldura fixa, de tal forma que qualquer movimento longitudinal da plataforma em relação à moldura ocasionará um aumento de tensão mecânica dos fios em dois enrolamentos e uma diminuição da tensão nos enrolamentos remanescentes

Constróem-se a moldura e a plataforma em ligas de alumínio, enquanto os pinos são confeccionados com alumínio anodizado ou barretes de safira

O número de enrolamentos determina a força de reação do dinamômetro e, portanto, a faixa de sua utilização, não se considerando a rigidez adicional das duas molas planas. Entretanto, devemos observar que as molas normalmente oferecem menor resistência mecânica do que os enrolamentos

A fim de impedir sobrecarga nos fios, o deslocamento da plataforma é regulado para $\pm 0,15\%$ da deformação máxima

O processo de confecção dos enrolamentos do transdutor é bem complicado pela existência dos pinos, pois eles se encontram muito próximos. Tal processo requer muita precisão e cuidado

Mostra-se, na fig. 10 um tipo mais recente de elemento sensor de força.

Neste modelo a barra atua sobre uma mola em formato de cruz.

A mola cruciforme é soldada a um anel rígido. Os pinos de safira acham-se localizados nos pontos de inflexão, isto é, nos pontos onde há maior deslocamento angular dos enrolamentos

Cada lado da cruz suporta dois circuitos isolados de fios com 0,005 mm de diâmetro, formando uma ponte de Wheatstone.

Uma das vantagens desse elemento é a simetria radial, que elimina a influência de sinais espúrios provocados pelas forças transversais

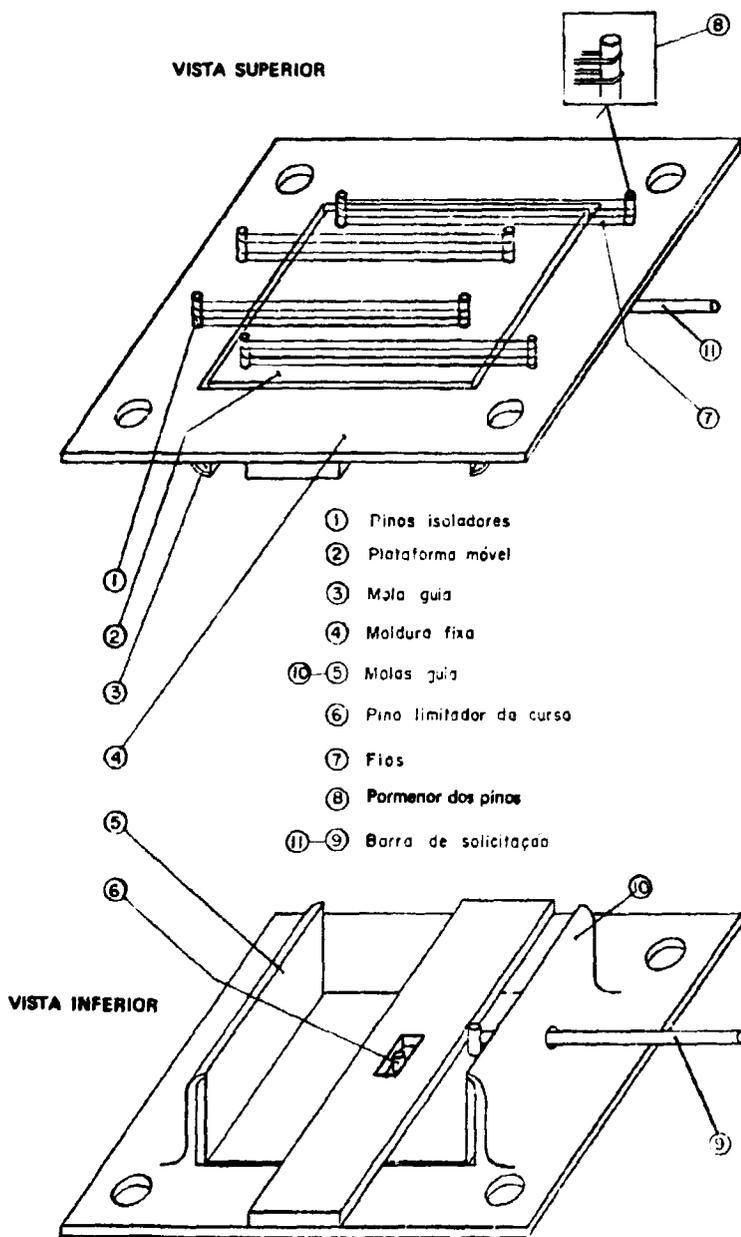


Fig 9

Esquema de um elemento sensor de força com "Strain Gauge"
 de fio atuado pelo movimento longitudinal da plataforma

Como a distância entre os pinos também é muito pequena, os inconvenientes provenientes das vibrações dos fios são desprezíveis.

Focalizaram-se dois dos vários elementos que podem ser usados em "strain gauges" com fios não solidários. Os demais elementos do mesmo tipo servem para os mesmos propósitos, tendo características bem semelhantes.

Para finalizar a parte referente à mecânica dos transdutores do tipo "strain gauges" de fio não solidário citaremos algumas vantagens e desvantagens do sistema

I) - Vantagens:

- a) - O posicionamento definitivo dos fios nos pinos isoladores garantem baixa histerese. Além disso, não há problema de escorregamento ou quebra, fatos que podem ocorrer nas camadas coladas dos tipos de fio, porém, solidários.
- b) - A instalação defeituosa do elemento por fixação imperfeita decorrente da falta de experiência ou perícia do operador é eliminada.
- c) - O pequeno tamanho do transdutor é facilitado pela integração do elemento aplicador e sensor da força externa.
- d) - Podem ser usados em altas temperaturas, desde que a construção dos elementos não requer o uso de materiais orgânicos (plásticos, borracha etc.).

II) - Desvantagens:

- a) - O perigo de afrouxamento dos fios limitam o uso em baixas densidades de corrente. Esse fato é agravado pela má dissipação de calor nos fios suspensos livremente. Dissipadores posicionados próximo aos fios não são tão efetivos quanto o desejado.
- b) - Pequena sobrecarga para evitar quebra ou afrouxamento dos fios. Empregam-se, usualmente, limitadores de curso.
- c) - Maior custo.

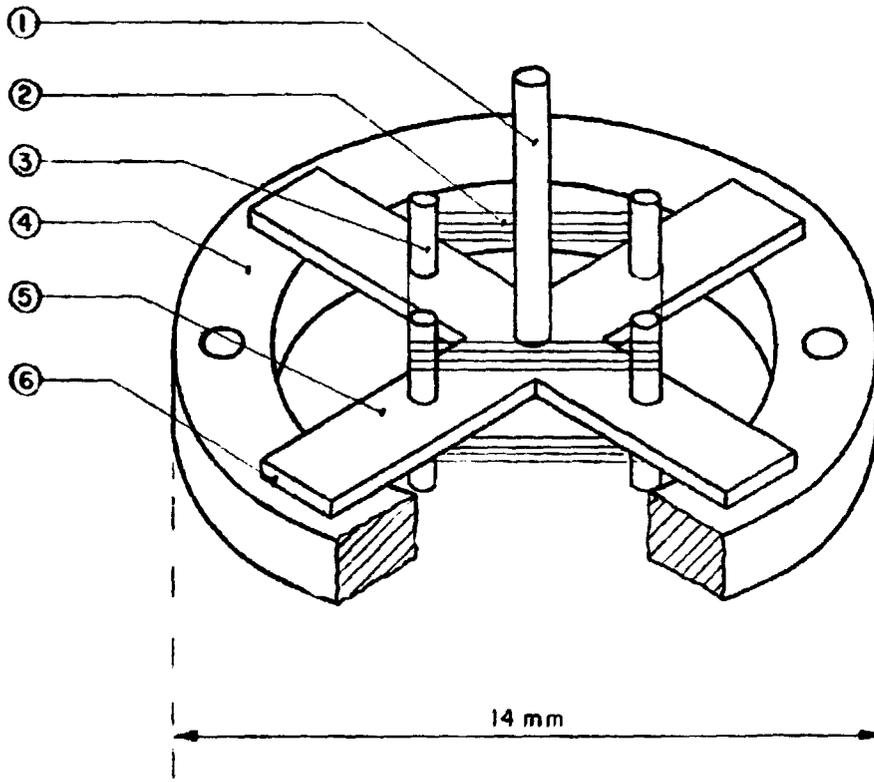
Observação:

Existe um novo conceito que tende a eliminar algumas desvantagens.

O princípio de fundamento de "gauge" de comprimento zero pode ser entendido na fig. 11.

O ponto B está inicialmente na mesma vertical que o ponto A (daí o nome). Os dois fios (AC e BC) suportam metade do peso W.

Quando o ponto B sofre um pequeno deslocamento no sentido indicado, a carga em AC é gradativamente transferida para BC, fazendo com que as tensões nos dois fios variem numa forma de "push-pull".



- ① Barra de solicitação
- ② Enrolamento (fios)
- ③ Pinos de safira
- ④ Anel
- ⑤ Mola cruciforme
- ⑥ Junta soldada

Fig 10

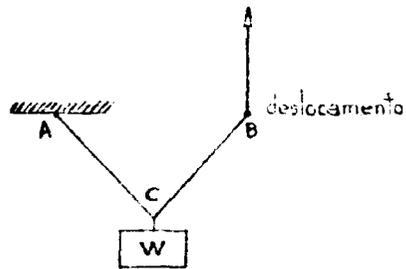


Fig. 11

Na prática, o peso W é substituído por uma mola em espiral que produz uma tensão constante independente do deslocamento.

O modelo mais avançado usa duas molas e quatro fios, estes últimos podendo constituir uma ponte, conforme a fig. 12.

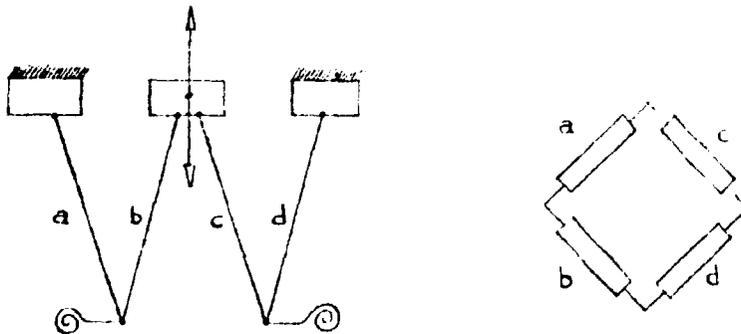


Fig. 12

CIRCUITOS PARA "STRAIN GAUGES" À RESISTÊNCIA DE FIO.

a) Operação D. C.

Em operação D. C., usam-se invariavelmente circuitos em configuração de ponte de Wheatstone para instrumentação com "strain gauges". Os circuitos potenciométricos não dão saída nula quando a deformação for nula, exceto em medidas dinâmicas quando for usado um capacitor de bloqueio.

Os circuitos potenciométricos são mais sensíveis à flutuação de tensão do que circuitos em ponte, fig. 13

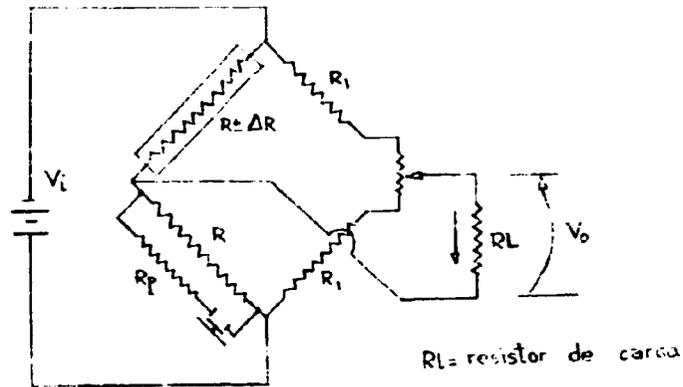


Fig. 13

"Strain gauges" em circuito tipo ponte

Para analisar o circuito pode-se modificá-lo para a forma seguinte que é mais conveniente (fig.14)

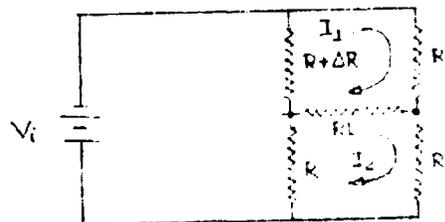


Fig 14

$$I_1 R_1 + I_1 R_L + I_1 (R + \Delta R) - I_2 R_L = 0$$

$$I_2 R_1 + I_2 R_L + I_2 R - I_1 R_L = 0$$

A corrente em R_L será:

$$I = I_2 - I_1$$

$$(I_2 - I_1) R_1 + (I_2 - I_1) R_L + (I_2 - I_1) R - I_1 \Delta R - (I_1 - I_2) R_L = 0$$

$$I R_1 + I R_L + I R - I_1 \Delta R + I R_L = 0$$

$$I (R_1 + R + 2R_L) = I_1 \Delta R$$

$$I = \frac{I_1 \Delta R}{(R_1 + R + 2R_L)}$$

Se a variação relativa de resistência, $\frac{\Delta R}{R} = (Ke)$ for pequena, a corrente de saída próximo a condição de equilíbrio será

$$I = \frac{I_1 \Delta R}{(R_1 + R + 2RL)} \cdot \frac{2}{2} = \frac{2ek I_1 R}{2(R_1 + R + 2RL)}$$

Mas se $2RL \gg R + R_1$, conforme a consideração feita, logo

$$I = \frac{Vi ke}{2(R + R_1 + 2RL)}$$

R_1 = resistência de dois braços da ponte.

V_i = tensão D. C. de alimentação

K = fator "gauge" definido no início do trabalho

e = deformação aplicada.

Em variações muito grandes de resistência a saída da ponte pode não ser mais linear com $\frac{\Delta R}{R}$, conforme ver-se-á mais adiante

Para $\frac{\Delta R}{R} \ll 1$, a tensão de saída através de RL será:

$$V_o = IRL = \frac{ViKeRL}{2(R + R_1 + 2RL)} = \frac{Vi \cdot Ke}{2 \left[\frac{(R + R_1)}{RL} + 2 \right]}$$

$$V_o = \frac{Vi Ke}{2 \left[2 + \frac{(R + R_1)}{RL} \right]}$$

Examinando a equação (V_o) nota-se que para $RL \gg R + R_1$ (caso em que se usou uma carga com impedância de entrada bem alta), a tensão de saída (V_o) independe de R e R_1

$$V_o = \frac{Vi Ke}{4}$$

Para dois "strain gauges" funcionando em "push-pull", a corrente e a tensão de saída são duas vezes maiores.

Pode-se fazer um ensaio bem simples na precisão operacional de um sistema medidor de tensão introduzindo-se, algumas vezes, uma variação conhecida de resistência durante a operação, particularmente antes e após um teste.

Se se coloca uma resistência de valor elevado R_p , fig. 15, em paralelo com R ou qualquer outra resistência da ponte, ou então em circuitos potenciométricos, a variação relativa de resistência tornar-se-á:



Fig. 15

$$\Delta R = R - \frac{R R_p}{R + R_p}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = 1 - \frac{R_p}{R + R_p}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R}{R + R_p} = \frac{1}{1 + \frac{R_p}{R}}$$

$$\text{Como } R_p \gg R \Rightarrow \frac{R_p}{R} \gg 1; \text{ logo } \frac{\Delta R}{R} \cong \frac{R}{R_p}$$

R_p deve ser escolhido de tal forma que o valor resultante de $\frac{\Delta R}{R}$ seja da magnitude da faixa de deformação apropriada.

Deve-se notar, porém que o método acima verifica a estabilidade da fonte de alimentação, circuito da ponte etc., mas não verifica o fator "gauge".

b) Não linearidade da ponte.

A ponte inicialmente em equilíbrio ($R_1 R_3 = R_2 R_4$) (fig. 16), tem um "gauge" ativo R_1 . A tensão de saída da ponte V_o , numa variação finita de resistência torna-se:

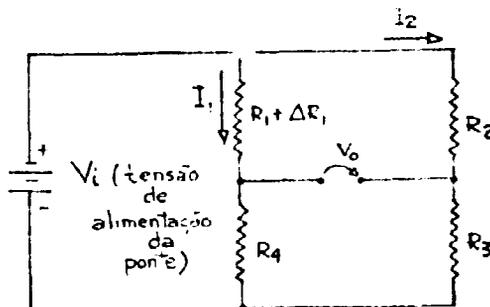


Fig. 16

$$I_1 (R_1 + \Delta R_1) + R_4 I_1 = V_i$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_2 = V_i$$

$$-I_1 (R_1 + \Delta R_1) + R_2 I_2 - \underbrace{R_4 I_1 + R_3 I_2}_{V_o} = 0$$

$$V_o = I_1 (R_1 + \Delta R_1) - R_2 I_2 \quad (I)$$

$$I_1 = \frac{V_i}{(R_1 + R_4 + \Delta R_1)} \quad (II)$$

$$I_2 = \frac{V_i}{(R_2 + R_3)} \quad (III)$$

Substituindo (II) e (III) em (I), resultará:

$$V_o = V_i \left[\frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1 + R_4)} \cdot \frac{R_2}{(R_2 + R_3)} \right]$$

$$V_o = V_i \left[\frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_2 + R_3) - (R_1 + \Delta R_1 + R_4)R_2}{(R_1 + R_4 + \Delta R_1)(R_2 + R_3)} \right]$$

$$V_o = V_i \left\{ \frac{R_1 R_2 + \Delta R_1 R_2 + R_1 R_3 + \Delta R_1 R_3 - R_1 R_2 - \Delta R_1 R_2 - R_4 R_2}{(R_1 + R_4 + \Delta R_1)(R_2 + R_3)} \cdot \frac{(R_1 + R_4)}{(R_1 + R_4)} \right\}$$

$$V_o = V_i \left\{ \frac{\Delta R_1 R_3 + R_1 R_3 - R_4 R_2}{\left[1 + \frac{\Delta R_1}{(R_1 + R_4)} \right] (R_2 + R_3) (R_1 + R_4)} \right\}$$

Como $R_1 R_3 = R_2 R_4$ (ponte inicialmente em equilíbrio sem variação de ΔR).

$$V_o = V_i \left\{ \frac{\Delta R_1}{\left[1 + \frac{\Delta R_1}{(R_1 + R_4)} \right]} \cdot \frac{R_3}{(R_2 + R_3) (R_1 + R_4)} \right\} \tag{IV}$$

Para um circuito em ponte onde $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, a equação (IV) torna-se:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}$$

Observamos pela equação acima uma não linearidade da ponte com a variação $\frac{\Delta R}{R}$.

Os grandes desvios de linearidade podem porém ser reduzidos se os resistores R_3 e R_4 têm valor ôhmico bem maior do que os resistores R_1 e R_2 . Este aumento pode ser expresso por meio de um fator n .

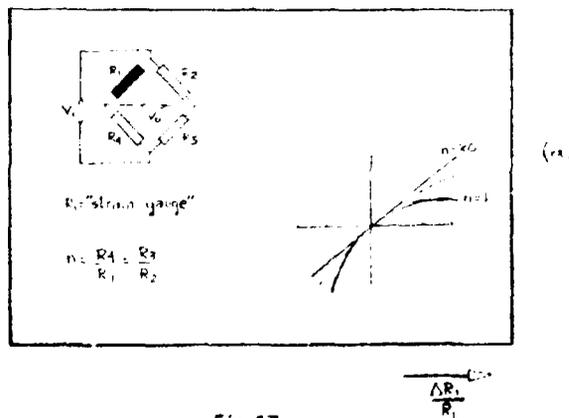


Fig 17

Não linearidade da ponte para vários valores da razão $n = R_4/R_1 = R_3/R_2$

A fig 17 mostra uma aproximação gradual para a linearidade com o aumento do fator, n. Por exemplo, para $n = 10$ a não linearidade é reduzida para 10% de seu valor original ($n = 1$).

c) Compensação para a linearidade.

Citaremos dois tipos de compensação para linearidade em circuitos tipo ponte.

c-1) Resistência em paralelo.

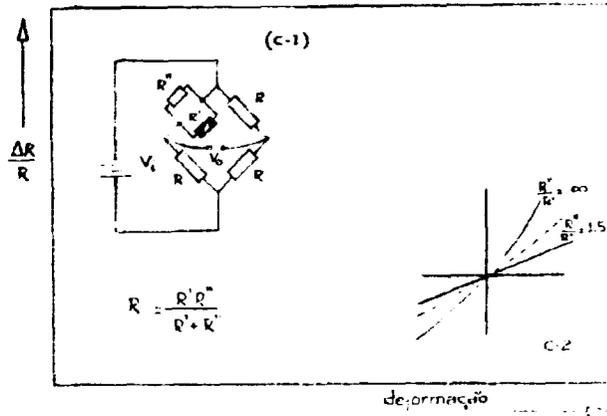


Fig. 18

A fig 18(c-1), mostra um circuito em ponte com um resistor R'' em paralelo ao resistor gauge R' , com:

$$R = \frac{R' R''}{R' + R''}$$

A linearidade do circuito é aumentada, fig 18(c-2), para pequenas razões R''/R' , mas a perda de sensibilidade é muito grande, por exemplo: 44% para a razão:

$$\frac{R''}{R'} = 1.5$$

c-2) Operação em "push-pull".

Uma compensação apreciável, embora não perfeita, pode ser conseguida com dois "gauges" em "push-pull" (em tração e em compressão, respectivamente) ligados a dois lados adjacentes do circuito, em ponte, ou por dois pares de "gauges" constituindo uma ponte completa. Esse arranjo acha-se na fig 19.

Analisando o circuito ao lado temos: (Obs: admitindo as variações de R_1 e R_2 com mesma amplitude.)

$$V_0 = R_1 I_1 - (R_2 + \Delta R) I_2$$

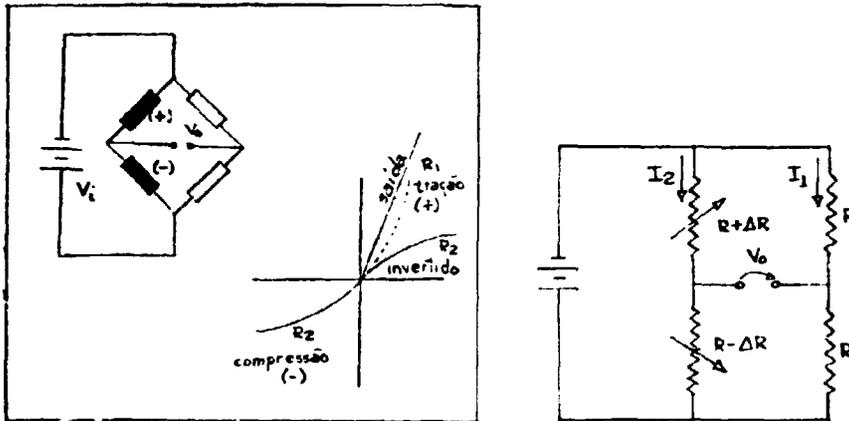


Fig 19

$$I_1 = \frac{V_i}{2R}$$

$$I_2 = \frac{V_i}{(R + \Delta R) + (R - \Delta R)} = \frac{V_i}{2R} \quad I_1 = I_2 \text{ (em virtude da compensação)}$$

$$V_o = \frac{V_i}{2} - (R - \Delta R) \frac{V_i}{2R} \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{(R - \Delta R)}{R} \right] = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}$$

Logo $V_o = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) V_i$, comprovado a linearidade da saída com $\frac{\Delta R}{R}$, para o nosso modelo teórico

PARTE EXPERIMENTAL.

I - Introdução:

O objetivo prático do trabalho foi provar equipamentos para medidas de pressões disponíveis em nosso laboratório.

Durante o trabalho tivemos a oportunidade de estudar e provar dois tipos de transdutores: os transdutores em ponte com "strain gauges", anteriormente estudados e os transdutores potenciométricos, que focalizaremos adiante

O equipamento disponível em nosso poder foi fabricado pela ETHER LTD - ENGLAND, consistindo em:

- Unidade de energização, 1 registrador gráfico e vários transdutores de diferentes limites de pressão.

II - Descrição da parte prática.

a) Transdutores potenciométricos.

b) Transdutores em ponte com "strain gauges".

a) Transdutores de pressão potenciométricos:

a) - Descrição:

Esse transdutor foi projetado para satisfazer as exigências em aplicações aeroespaciais, ou seja, uso em sistemas de instrumentação para mísseis, aeronaves etc., sendo também utilizado em controle industrial.

O instrumento é formado por um tubo de Bourdon (sensor de pressão) acoplado a um potenciômetro de fio de alta precisão, fornecendo uma tensão linear proporcional à pressão aplicada.

b) - Princípio de operação.

Basicamente, o transdutor é um potenciômetro, podendo funcionar como divisor de tensão, conforme a fig. 20:

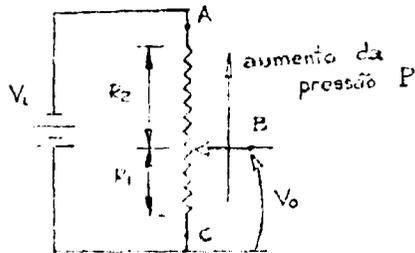


Fig 20

A fonte V_i é uma fonte de tensão estável, porque qualquer flutuação em V_i daria uma flutuação na tensão de saída V_o .

Ligou-se o transdutor no esquema acima, carregando-o com uma alta impedância, a fim de não alterar o divisor de tensão. Analiticamente, tem-se:

$$V_o = V_i \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$R = R_1 + R_2 \text{ (resistência total do potenciômetro.)}$$

$$V_o = V_i \cdot \frac{R_1}{R} = K_v \cdot R_1$$

$$V_o = K_v R_1 \text{ (I)}$$

Sendo o transdutor linear (relação entre R_1 e P é linear), verifica-se: $R_1 = \alpha P$, onde P = pressão aplicada.

Substituindo esta última relação em (1) implica:

$$V_o = K_v \alpha P \quad V_o = K'v.P$$

Deve-se observar que $K'v$ depende da tensão aplicada, sendo uma constante para cada valor de V_i .

Colocando-se, genericamente, em gráfico, a equação (1) resulta, fig. 21

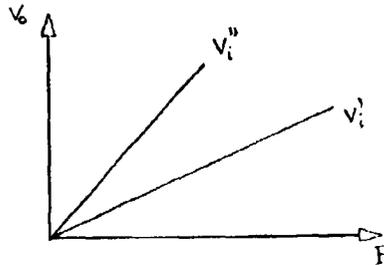


Fig. 21

c) - Parte prática:

c-1) - A fim de comprovar o modelo teórico levantou-se a característica ($V_o \times P$) para distintas tensões de alimentação, construindo-se o gráfico correspondente.

Na obtenção de pontos V_o correspondente aos pontos P montou-se o arranjo experimental esquematizado na figura 22

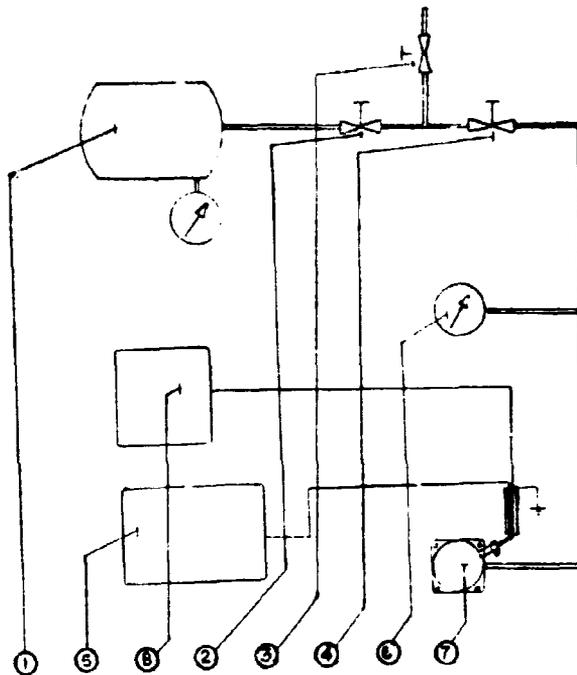
c-2) - Sequência de operação (calibração)

- 1 - Manter fechadas as válvulas 2,3 e 4
- 2 - Energizar o transdutor com a fonte D.C. de alimentação, deixando estabilizar por alguns minutos.
- 3 - Abre-se a válvula 2, ligando-se o compressor ao sistema
- 4 - Abrir a válvula 4, carregando o transdutor até uma pressão ligeiramente superior ao fim de escala.
- 5 - Fechar as válvulas 2 e 4
- 6 - Abrir a válvula 3
- 7 - Controlar pela válvula 4 o escape de ar, e conseqüentemente a pressão do sistema.
- 8 - Para cada valor de pressão ler a tensão correspondente no voltímetro.

c-3) - Deve-se repetir a sequência (c-2) para cada valor (V_i) de tensão de alimentação.

c-4) - Características do modelo estudado.

ARRANJO EXPERIMENTAL



- ① COMPRESSOR
- ② VÁLVULA DO COMPRESSOR
- ③ VÁLVULA DE ESCAPE DO AR
- ④ VÁLVULA ISOLADORA DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO
- ⑤ MANÔMETRO
- ⑥ VOLTÍMETRO DIGITAL HP
- ⑦ TRANSDUTOR POTENCIOMÉTRICO
- ⑧ FONTE DE ALIMENTAÇÃO HP

Fig 22

c - 5) Tabela

P (Kg/cm ²)	Vi (v) = 5,03	V'i (v) = 10,22	V''i (v) = 20,00
	V (v)	V (v)	V (v)
0,0	0,013	0,027	0,052
0,2	0,206	0,417	0,810
0,3		0,687	1,270
0,4	0,489	0,934	1,750
0,5	0,623	1,260	2,470
0,6	0,762	1,530	2,980
0,7	0,891	1,892	3,460
0,8	1,034	2,072	4,050
0,9		2,341	4,570
1,0	1,295	2,702	5,120
1,1	1,411	2,853	5,580
1,2	1,530	3,200	6,140
1,3	1,679	3,514	6,630
1,4	1,872	3,813	7,390
1,5	1,981	4,095	7,830
1,6	2,167	4,413	8,570
1,7	2,286	4,682	9,030
1,8	2,442	4,981	9,740
1,9	2,583		10,270
2,0	2,716	5,551	10,730
2,1	2,879		11,380
2,2	2,998	6,149	11,910
2,3	3,161		12,430
2,4	3,323	6,688	13,080
2,5	3,458		13,730
2,6	3,620	7,319	14,330
2,7	3,783		14,970
2,8	3,947	7,948	15,620
2,9	4,079		16,090
3,0	4,213	8,518	16,670
3,1	4,331		17,260
3,2	4,495	9,087	17,780
3,3			18,380
3,4	4,792	9,774	18,970
3,5			9,960

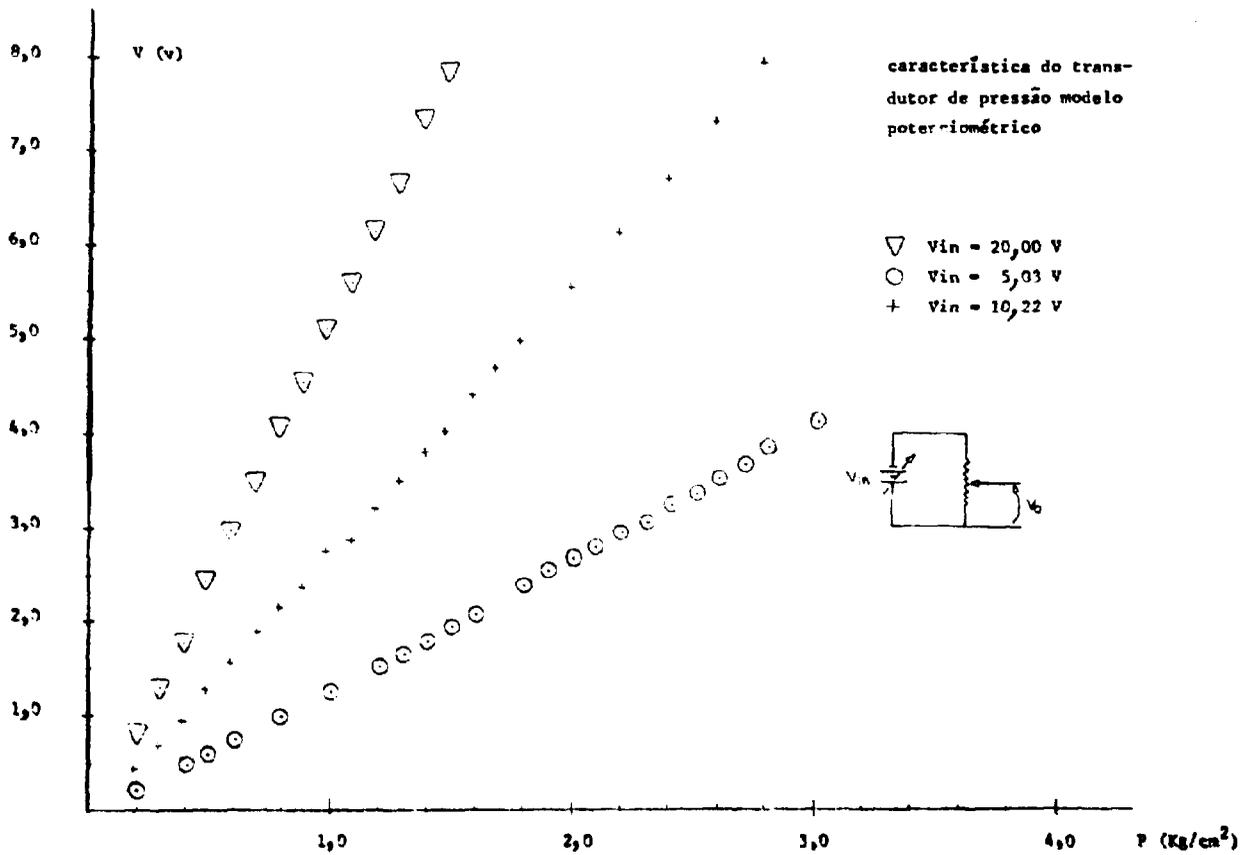


Fig 23

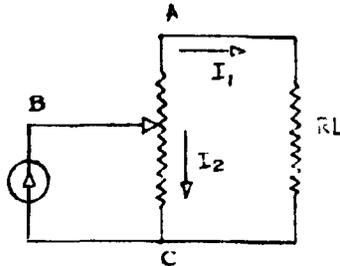
Tipo PP 9 (Ether)	
Faixa de operação	: 0-50 psi (0-3,52 Kg/cm ²)
Tensão de alimentação máxima	: 30 V
Resistência elétrica total	: 5 K Ω \pm 5%
Corrente máxima	: 10 mA
Faixa de temperatura de utilização	: -30°C + 100°C
Precisão (linearidade e histerese)	: 1%

c 6 - Fig.23

c-7) Analisando a fig 23, verifica-se a comprovação de nosso modelo teórico, quando admitimos a linearidade entre a pressão aplicada e a tensão de saída: $V_o = K'v P$

Uma segunda opção para ligar o transdutor seria usar uma fonte de corrente

Neste caso poderíamos carregá-lo com baixas impedâncias



Pela análise do circuito temos:

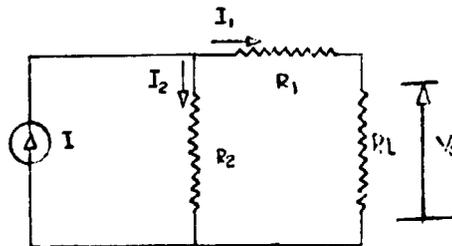


Fig 24

Com o aumento de P (pressão) a corrente em R_1 também aumenta, daí o sentido de P na fig 24.

$$I = I_1 + I_2$$

$$I_2 = I - I_1 \quad (I)$$

$$R_2 I_2 = (R_1 + RL) I_1$$

$$I_2 = I_1 \left(\frac{R_1 + RL}{R_2} \right) \quad (II)$$

Igualando-se (I) e (II) resulta:

$$\left(\frac{R_1 + RL}{R_2} \right) I_1 = I - I_1$$

$$I_1 \left(1 + \frac{R_1 + RL}{R_2} \right) = I$$

$$I_1 = \left(\frac{R_2 + R_1 + RL}{R_2} \right) I$$

$$I_1 = I \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + RL} \right)$$

$$\text{Como } V_o = RL I_1$$

$$V_o = \frac{RL \cdot R_2}{(R_1 + R_2 + RL)} \cdot I$$

Considerando que:

1. - A fonte de corrente é constante, isto é, $I = \text{cte}$.
2. - $R_1 + R_2 = \text{constante}$ (resistência total do transdutor)

Das considerações 1.- e 2.- tem-se que para um valor fixo de RL:

$$V_o = K R_2$$

Adotando um modelo linear para o transdutor análogo ao caso anterior:

$$R_2 = K'P$$

sendo P a pressão aplicada implica:

$$V_o = KK'P$$

$$V_o = K'IP$$

Devemos observar que $K'I$ é uma constante fixado um valor de RL. Pode-se então, modificar a notação para:

$$V_o = K I (R_L) F$$

mantendo-se I constante.

Construindo-se um gráfico esquemático, fig 25, para a expressão

$$V_o = K' I (R_L) P$$

resulta:

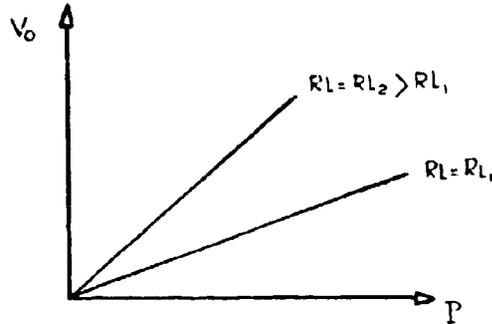


Fig. 25

Para um determinado valor de R_L pode-se calcular o valor de $K' I (R_L)$ medindo-se o coeficiente angular da reta característica, admitindo-se que I também não varie

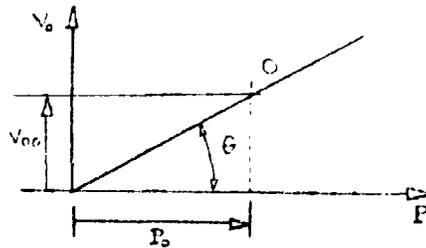


Fig. 26

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{V_{oo}}{P_0} = K' I (R_L), \text{ fig. 26}$$

Conhecida $K' I (R_L)$ pode-se calcular a constante K' que relaciona a resistência em função da pressão aplicada.

$$K \cdot K' = K' I (R_L)$$

$$\frac{R_L \cdot I}{R_1 + R_2 + R_L} \cdot K' = K' I (R_L)$$

$$K' = K' I (R_L) \frac{(R_1 + R_2 + R_L)}{(R_L) \cdot I}$$

O mesmo raciocínio é válido para o caso em que se alimenta o transdutor com fonte de tensão constante.

Para uma tensão de alimentação (V_i) estável calculou-se graficamente o valor de K_v .

Sendo $K'v = K_v \alpha$ e $K_v = \frac{V_i}{R}$, pode-se facilmente conhecer α ; pois

$$\alpha = \frac{K'v}{K_v}$$

$$\alpha = K'v \cdot \frac{R}{V_i}$$

c-8) - Determinação da constante α

Pelo gráfico característico do transdutor potenciométrico pode-se calcular o valor de α

a) $V_i = 5,03V$

$$V_o = K'vP$$

$$K'v = \frac{V_o}{P}$$

$$K'v = \frac{2,80}{2} = 1,4 \left(\frac{V \text{ cm}^2}{Kg} \right)$$

$$\alpha = 1,4 \times \frac{5000}{5,03} = 1391 \text{ } (\Omega/\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$$

b) $V_i = 10,22 V$

$$K'v = \frac{2,85}{1,0} \left(\frac{V \text{ cm}^2}{Kg} \right)$$

$$\alpha = 2,85 \times \frac{5000}{10,22} = 1394 \text{ } (\Omega/\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$$

c) $V_i = 20,00 V$

$$K'v = \frac{5,55}{1,0} \left(\frac{V \text{ cm}^2}{Kg} \right)$$

$$\alpha = 5,55 \times \frac{5000}{20,00} \text{ } (\Omega/\text{Kg} \cdot \text{cm}^{-2})$$

$$\alpha = 1387 \text{ } (\Omega/\text{Kg} \cdot \text{cm}^{-2})$$

Os resultados obtidos comprovam nossa hipótese teórica, pois:

I) - O valor de α independe da tensão aplicada.

II) - $K'v$ segue a lei de variação imposta no modelo. Para uma mesma pressão P temos:

$$V_{o1} = K'v_1 \cdot P$$

$$V_{o2} = K'v_2 \cdot P$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{o2}} = \frac{K'v_1}{K'v_2}$$

III) - Pelo valor de α teríamos $R = 4865\Omega$, sendo $5K\Omega$ o valor do manual

B) Transdutores em ponte.

I) - Sistema de energização de transdutores.

O sistema disponível contém quatro canais idênticos

Cada canal contém uma fonte de tensão DC estável independente para energização dos transdutores acoplada a um circuito que possibilita controlar o sinal de saída, de tal forma que ele possa ser usado em indicadores, registradores gráficos, etc.

No início deste trabalho levantamos o circuito de uma canal.

Examinando o circuito anexo verificamos ser ele uma fonte de tensão D C estável.

O transistor funciona como gerador de corrente, pois sua tensão de base é mantida constante pela soma das tensões reversas dos diodos zener

O potenciômetro R_f simula a variação $\frac{\Delta R}{R}$ do "strain gauge", conforme já tivemos a oportunidade de explicar.

A ponte é balanceada por R_0 fornecendo o ajuste do ponto zero

Para outras informações do sistema energizador consultar o manual: TRANSDUCER CONDITIONING UNITS, SERIE 70-20

II) - Calibração dos transdutores do tipo em ponte.

Inicialmente, devemos fazer as conexões elétricas entre o sistema de energização, transdutor e rede, segundo o esquema da fig 27

Devemos observar que as ligações dos transdutores e a saída do sinal devem ser feitas com cabos blindados. Deve-se também observar as fases L, N e E, fig. 28.

c-1) Seqüência de Calibração.

- 1) - Manter o transdutor sem pressão
- 2) - Ligar um resistor de $100 K\Omega$ nos terminais (A,B) e ligar o sistema, deixando-o estabilizar por aproximadamente 10 minutos.
- 3) - Ajustar o ponto zero por meio do potenciômetro localizado na frente do aparelho.
- 4) - Apertar a chave de calibração e com a mesma pressionada, ajustar a saída (sinal), para o valor indicado no teste de calibração do referido transdutor (ver operação D. C.).

Esta operação simula a variação $\frac{\Delta R}{R}$ na faixa de deformação do "strain gauge", conforme o explicado

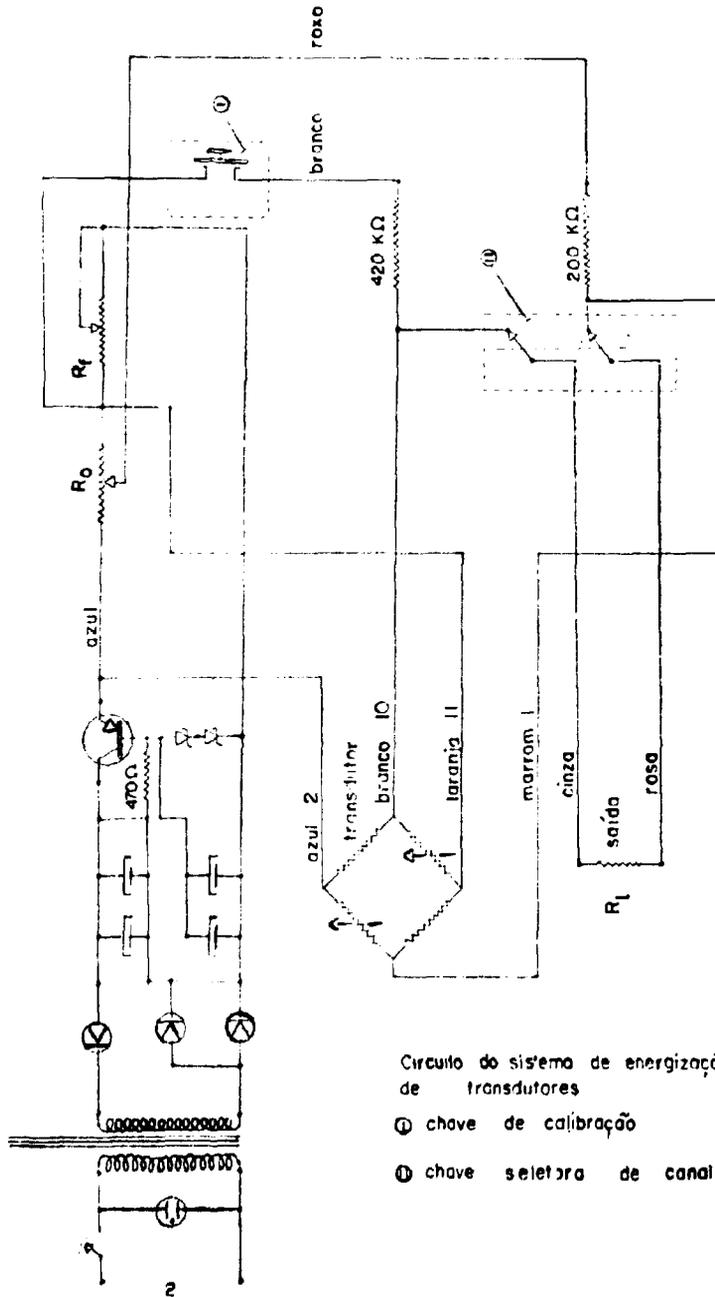


Fig 27

L = fase ativa
 N = fase neutra
 E = terra

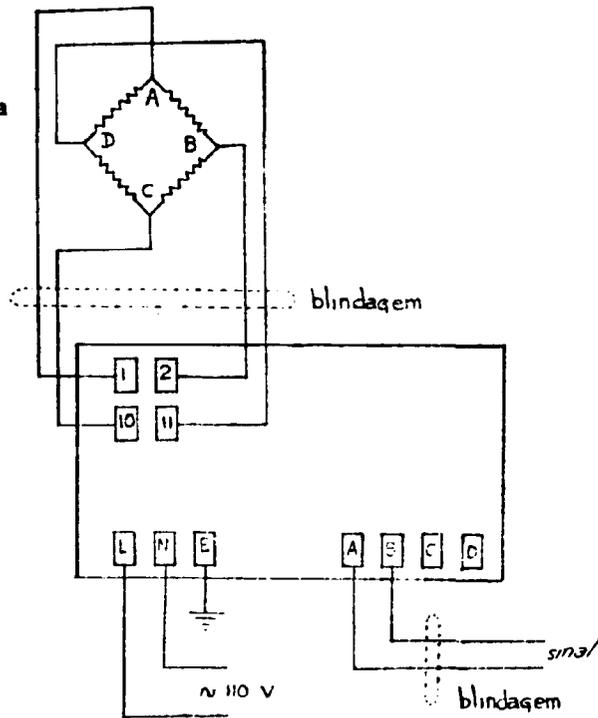


Fig. 28

O valor indicado no certificado de calibração deve ser ajustado para quaisquer tensões de alimentação, ajustando-se o potenciômetro, porém, a saída de fim de escala será o valor ajustado multiplicado pela tensão de alimentação

Logo, a saída será função da tensão do transdutor.

Devemos observar que as tensões de saída são muito pequenas (0–35 mV), sendo conveniente medi-las com o voltímetro digital.

Esquema de calibração, fig. 29

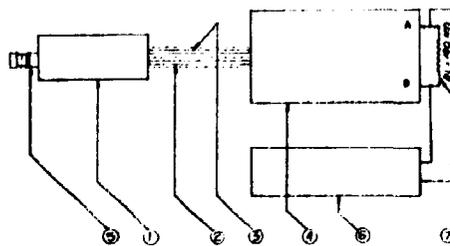


Fig. 29

- 1 - Transdutor
- 2 - Cabo de alimentação do transdutor
- 3 - Cabo de conexão entre o transdutor fonte e saída
- 4 - Fonte de alimentação com sistema de calibração
- 5 - Tomada de pressão
- 6 - Voltímetro digital
- 7 - Resistência de carga

5) - Repetir as operações 3 e 4 quantas vezes forem necessárias até obter uma calibração de acordo com o certificado.

6) - Ler o manual da ETHER para os pormenores.

c-2) - Descrição dos transdutores em ponte.

c-2-1) Tipo BP1

Este tipo de transdutor é formado por uma ponte resistiva com "strain gauges", possuindo dois enrolamentos ativos e dois para compensação de temperatura.

O elemento sensor é um tubo de secção elíptica, já discutido em tipos de transdutores, quando descrevemos o tipo barril com formato elíptico.

c-2-2) Tipo BP6

São transdutores com as mesmas características físicas dos BP1, porém, com o elemento sensor possuindo o formato cilíndrico (ver transdutor do tipo barril com formato cilíndrico).

Usam-se os transdutores BP6 para altas pressões. Por esse motivo os modelos disponíveis em nosso laboratório não chegaram a ser ensaiados.

Especificações do Modelo BP6.

Limites de pressão:	: 0 — 140 Kg/cm ²
	: 0 — 70 Kg/cm ²
Tensão de operação máxima	: 30 V
Saída na pressão máxima	: 1,5 mV/V aplicado
Resistência da ponte	: 1000 Ω
Faixa de temperatura para operação	: - 40° C — + 120° C

Internamente, os elementos da ponte acham-se ligados no seguinte esquema, fig. 30:

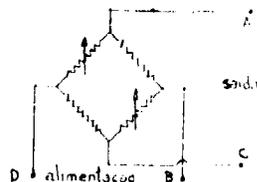


Fig. 30

c-2-3) Tipo UP

Fisicamente, o transdutor é formado por um diafragma que atua um elemento sensor de força. É semelhante ao referido na introdução teórica, quando estudamos os elementos de transdutores do tipo "strain gauges" de fio metálico não solidário.

O princípio é o mesmo, havendo uma moldura dentro da qual se move uma plataforma acionada por uma barra acoplada ao diafragma (ver elementos de transdutores na parte teórica).

Nos modelos UP usam-se dois tipos de diafragma, já estudados anteriormente.

Nos que operam até 5 psi o diafragma é do tipo fole enquanto para pressões maiores, é um diafragma plano usinado

Especificações dos Transdutores UP.

Tipo UP 4	
Limite máximo de pressão	: 1,5 Kg/cm ²
Tensão de alimentação máxima	: 15 V
Impedância de saída	: 1016 Ω
Sensibilidade	: 3,956 mV/V aplicado

c-3) Observações:

- 1 - Quando no item (c-1-2) se mandou ligar um resistor de 100 KΩ na saída (A,B) estávamos ensaiando os modelos UP.

Para outros modelos devem-se usar os valores de RL convenientes que se encontram nos respectivos manuais de calibração.

- 2 - Para verificar a influência de RL na saída do sinal uma vez calibrado o transdutor para a carga nominal, mudamos o valor de RL para distintos valores, a fim de estudar o comportamento do sistema em diferentes cargas. Ver curva característica do transdutor de pressão modelo 6304 DE SÉRIE UP, fig.31 e tabela c-4).

A influência de RL no sinal já foi estudada quando se examinou o sistema em operação D. C..

Viu-se que para $RL \gg R + R_1$, a tensão de saída torna-se:

$$V_o = \frac{V_i K_e}{4} \quad (v)$$

o que explica as diferentes inclinações das várias curvas, pois a tensão de saída é maior para as altas impedâncias de carga (ver operação D. C.)

c-4) Tabela:

Tensão de saída em função da pressão aplicada para diferentes valores de RL.

c-5) Figs. 31 e 32 correspondentes à tabela c-4

c-6) Medidas com transdutores em ponte.

Um método de medida poderia ser o que utilizasse a curva de calibração do transdutor. Entretanto, tal método seria de uso bem incômodo, pois avaliaríamos as pressões por meio de um gráfico ou de uma tabela, quando muitas vezes teríamos de usar interpolações.

Além disso, deveríamos conhecer previamente a curva de calibração do transdutor, e conforme vimos ela depende da resistência da carga RL.

Para contornar a inconveniência deste método de medida usamos um registrador gráfico disponível em nosso laboratório que fornece leitura direta quando calibrado corretamente

c-7) Registrador gráfico.

c-7-1) Especificações:

O registrador foi projetado pela ETHER, pertencendo à série 7000 B.

Impedância de entrada	: 15 K Ω
Impedância de carga máxima	: 500 Ω
Largura total da escala	: 6 polegadas
Sinal mínimo para a pena percorrer toda a escala (span)	: 5,0 mV
Sinal mínimo (span)	: 250,0 mV
Alimentação	: 105 - 125 V, 50/60 HZ.

c-8) Acoplamento entre o registrador e o sistema de energização

Nos terminais (A,B) do sistema de energização, verifica-se uma impedância que depende do transdutor ligado (fig 30), sendo da ordem de 1000 Ω .

Como a impedância de carga máxima do registrador é de 500 Ω , deve-se fazer um acoplamento conveniente. Para tanto, ligou-se em paralelo com o cabo conector um resistor $R = 470\Omega$, de tal forma que a impedância de carga diminua

- 1.- Potenciômetro de ajuste R_1 (zerador).
- 2.- Sistema de energização.
- 3.- Registrador.
- 4.- Transdutor.
- 5.6.- Blindagem.

Deve-se observar também as fases L,N e E segundo o esquema da fig. 33.

c-9) Calibração:

c-9-1) Retirar o resistor de calibração do transdutor e substituí-lo pelo resistor de 470 Ω .

c - 4) Tabela

Tensão de saída em função da pressão aplicada para diferentes valores de RL.

Modelo	Transdutor 6304 série UP4						Transdutor 6303 série UP 4 RL = 100 K Ω
	RL (Ω)						
	∞	100 K	18 K	1,2 K	480	100	
P	V	V	V	V	V	V	V
$\frac{Kg}{cm^2}$	mv	mv	mv	mv	mv	mv	mv
1,5	32,55	32,20	31,08	17,48	10,40	2,85	29,48
1,4	30,20	29,65	28,45	16,13	9,60	2,60	27,25
1,3	27,55	27,14	25,87	14,82	8,77	2,41	25,50
1,2	25,38	25,05	24,34	13,59	8,07	2,19	23,25
1,1	23,21	22,92	21,93	12,54	7,40	2,04	21,40
1,0	21,25	21,05	20,13	11,35	6,78	1,85	19,64
0,9	19,19	19,17	18,25	10,19	6,16	1,67	17,88
0,8	17,40	17,07	16,25	9,27	5,49	1,49	16,00
0,7	14,87	14,97	14,21	8,16	4,80	1,29	14,10
0,6	13,00	12,74	12,26	6,88	4,10	1,10	12,15
0,5	10,90	10,60	10,19	5,78	3,43	0,88	10,15
0,4	8,43	8,02	7,84	4,39	2,59	0,68	7,86
0,3	6,10	6,09	5,88	3,36	1,93	0,50	6,08
0,2	4,05	3,83	3,59	2,04	1,19	0,28	4,17
0,1							3,30
0,0	0,03	0,3	0,11	0,05	0,04	0,04	0,10

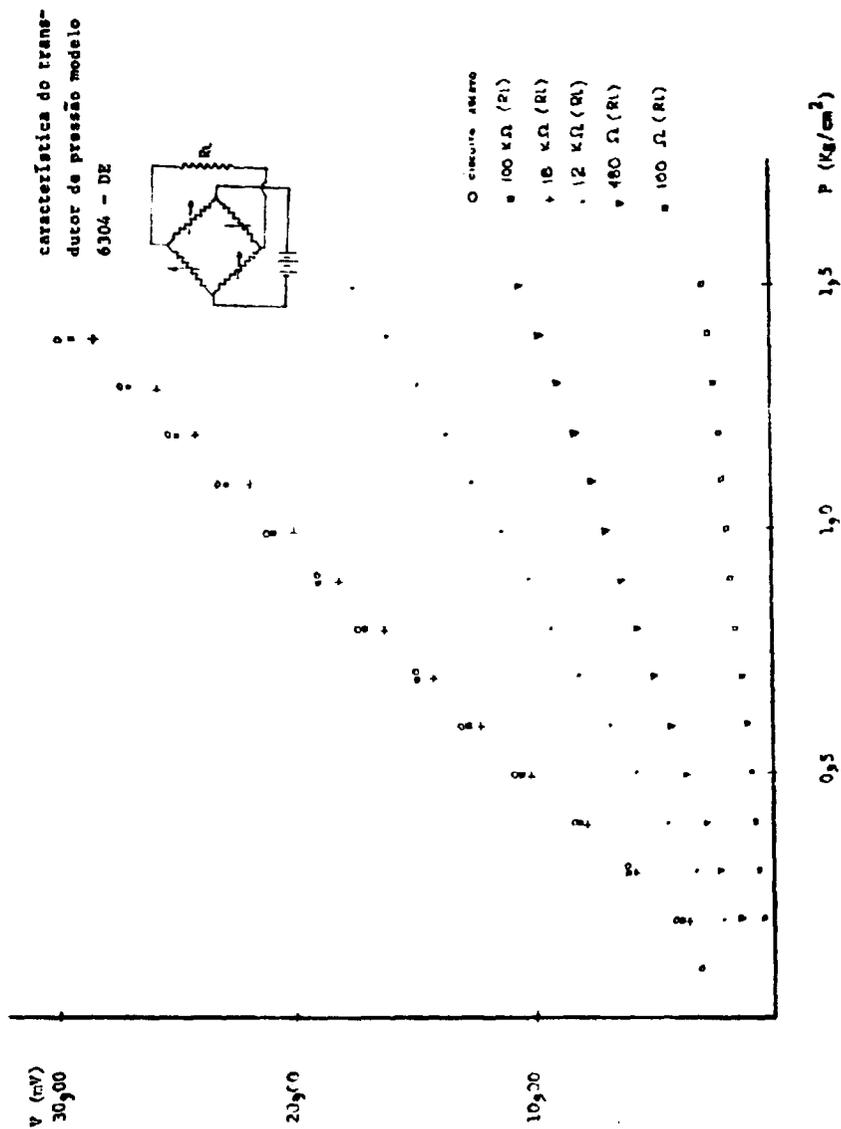


Fig 31

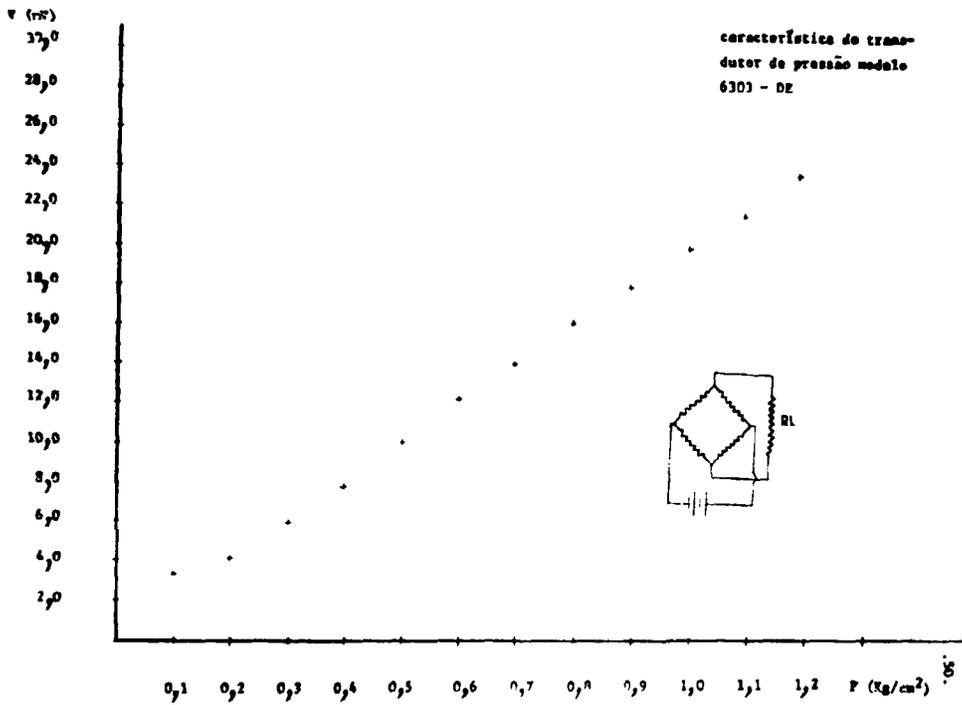


Fig 32

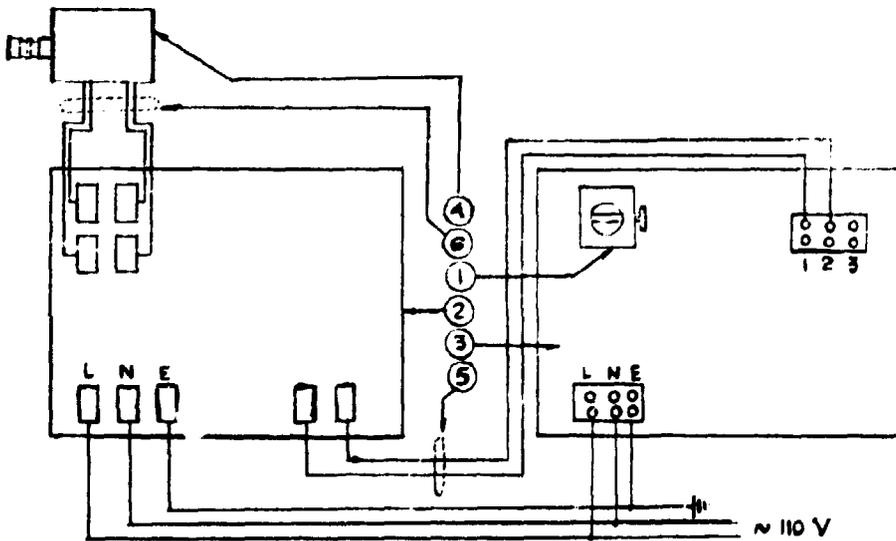


Fig 33

- c-9-2) Não se deve mexer na calibração do transdutor
- c-9-3) Ligar o sistema de energização do transdutor e o registrador, deixando o sistema estabilizar por 10 minutos
- c-9-4) Com o transdutor descarregado, colocar em zero o registrador por meio do potenciômetro R_1
- c-9-5) Carregar o transdutor numa pressão conhecida e ajustar a leitura do registrador com a escala, usando o potenciômetro R_2 "span"

O potenciômetro R_2 é acessível retirando-se o registrador da caixa

Olhando pela parte anterior junto ao circuito impresso, veem-se dois potenciômetros: R_2 e R_3

R_2 : tem uma ranhura para o encaixe de chaves de fenda.

R_3 : possui um prolongamento cilíndrico podendo ser ajustado manualmente

- c-9-6) Repetir as operações c-9-4) e c-9-5) até um ajuste perfeito.

- c-9-7) Verificar a sensibilidade do sistema.

Com a pena numa posição qualquer, deslocá-la ligeiramente, largando-a em seguida. Ela deve voltar à sua posição original sem oscilar.

A sensibilidade pode ser ajustada por meio do potenciômetro R_3

- c-9-8) Ler o manual de instrução do registrador para os pormenores adicionais, a saber: troca de bobina de papel, tinta, chaves de acionamento, etc.

- c-10) Observações complementares

- c-10-1) A característica dos transdutores para os diversos valores de RL ajudou no acoplamento, pois a linearidade dos transdutores (ver figuras anteriores) permitiu variar RL confiantes na linearidade do sinal com a pressão, para cargas inferiores a 500Ω

O estudo teórico também foi de grande valia nesse particular.

- c-10-2) O método usado para calibrar o registrador foi análogo ao usado para levantar as curvas características dos transdutores UP e BP

- c-10-3) Pormenores da aparelhagem podem ser encontrados nas seguintes referências de propriedade da Divisão de Engenharia de Reatores do DEN

a) Manual de instrução ETHER XACTLINE TRANSISTORISED RECORDERS.
series 7000B

b) ETHER: INDUSTRIAL TRANSDUCERS

c) ETHER: TRANSDUCERS CONDITIONING UNITS (series 17-20)

d) ETHER: CONTROL INSTRUMENTS

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NEUBERT, H. K. P. *Strain gauges: kinds and uses*. New York, Macmillan, 1967.

