

239423

## Sensores de deformação do tipo Strain Gage

Fábio F. da C. Campos  
Hugo Guerra de Vasconcelos  
José Inácio Ávila

### RESUMO

É apresentado um tutorial introdutório sobre os transdutores do tipo Strain Gage, englobando introdução, um breve histórico e considerações gerais sobre sua utilização.

**Prof. Fábio F. da C. Campos** é professor do Curso de Eletrotécnica, na área de Eletrônica Industrial, na Escola Técnica Federal de Pernambuco (ETFPE), Mestre em Engenharia Eletrônica, na área de Instrumentação, pela Universidade Federal de Pernambuco (DES-UFPE), e presta consultoria na área de instrumentação e automação industrial.

**Prof. Hugo Guerra de Vasconcelos**, é Docteur Ingénieur em Engenharia Eletrônica pela ENSEEIHT (Universidade de Toulouse), Pesquisador e Professor Adjunto dos Cursos de Graduação e Mestrado em Engenharia Eletrônica, na área de Eletrônica Aplicada (ênfase em Instrumentação), no Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco (DES-UFPE).

**Prof. José Inácio Ávila** é PhD em Engenharia Civil pela Universidade de Leeds (Inglaterra), Pesquisador e Professor Adjunto do Curso de Graduação em Engenharia Civil, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (DEC-UFPE).

## 1. INTRODUÇÃO

Os strain gages<sup>(1)</sup> são transdutores que transformam deformação em variação de resistência elétrica. Podem ser feitos de fio, semiconductor, ou de lâminas metálicas finas.

Devido à ampla gama de aplicações, bem como as condições adversas nas quais eles podem ser aplicados, tornaram-se transdutores versáteis e amplamente empregados.

Como exemplos de aplicações dos strain gages pode-se citar além de medições de deformações em estruturas usuais da construção civil (como pontes, viadutos e prédios, vide figura 1): medição de esforços em estruturas submetidas a temperaturas criogênicas, medição de deformações em estruturas submetidas a temperaturas como as encontradas com a reentrada de um artefato espacial na atmosfera, dinamômetros, sensores de pressão quando acoplados a diafragmas (observe a figura 2), e medição de fluxo através de pressão diferencial.

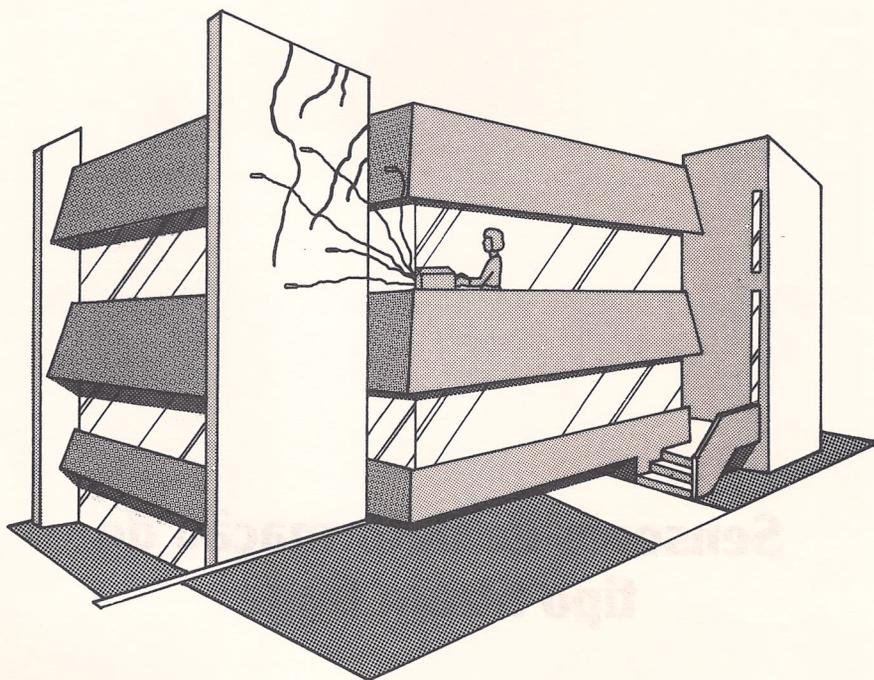


Figura 1: Aplicação de strain gages na medição de deformações num prédio.

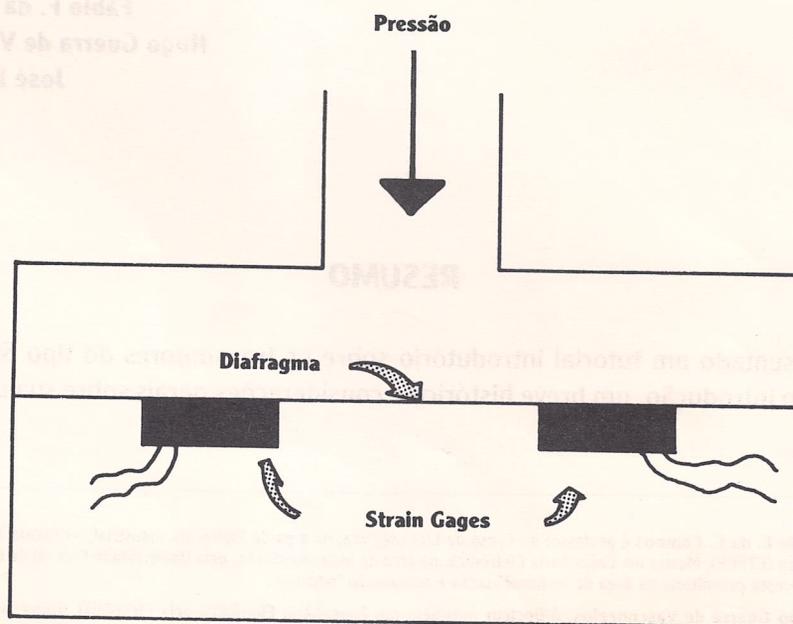


Figura 2: Sensor de pressão implementado com a utilização de strain gages.

(1) Também aceita-se a grafia "strain gauges".

Dependendo do tipo de processamento realizado sobre o sinal fornecido pelos strain gages, pode-se obter informações sobre a magnitude das deformações, sobre a velocidade, aceleração e/ou frequência.

Conforme a configuração física à qual conectar-se os strain gages, pode-se obter transdutores específicos, como as células de carga e os acelerômetros.

## 2. HISTÓRICO

Apesar do princípio, segundo o qual baseiam-se os strain gages, ou seja, que a resistência elétrica de um corpo altera-se com a deformação, ter sido enunciado por Lord Kelvin em 1856, apenas em 1939 ele foi implementado sob a forma prática dos strain gages, por dois norte americanos, Dr. A.C. Ruge e E.E. Simons.

O primeiro dispositivo prático do tipo strain gage foi o chamado “aferidor de tensão mecânica”. Dispositivos deste tipo consistiam de fios dispostos ao redor de pernos (vide figura 3a e 3b); ao deformar-se a base na qual os pernos estavam montados, alterava-se a tensão mecânica dos fios, e, conseqüentemente, sua resistência elétrica (vide figura 3c).

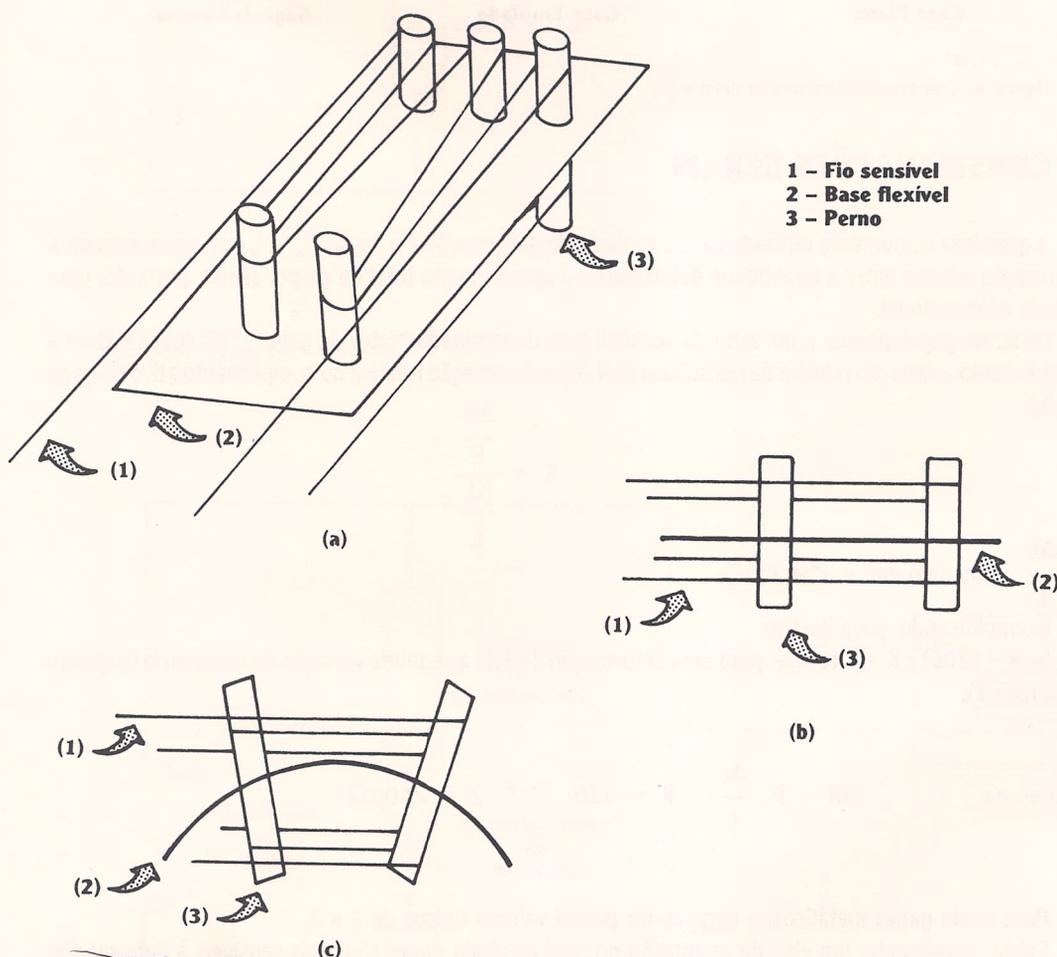


Figura 3: Tipo primordial de strain gage: o “aferidor de tensão mecânica”.

Em seguida a este dispositivo, foi desenvolvido o chamado “gage plano” (flat gage), vide figura 4(a), o qual consistia de uma grelha de fio sensível, montada sobre um substrato; ao deformar-se o substrato (“Backing”), deformava-se o fio sensível, alterando assim a sua resistência.

Para conseguir-se uma maior resistência por área, desenvolveu-se o “gage enrolado” (wrap-around gage), no qual o fio sensível era enrolado numa forma, antes de ser fixado ao substrato, conforme mostra a figura 4b.

Com a evolução das técnicas fotolitográficas de confecção de circuitos impressos, surgiu o gage de lâmina, mostrado na figura 4c, confeccionado segundo as mesmas técnicas.

Mais recentemente, desenvolveu-se o chamado “gage semiconductor”, que possui uma maior sensibilidade que os gages metálicos.

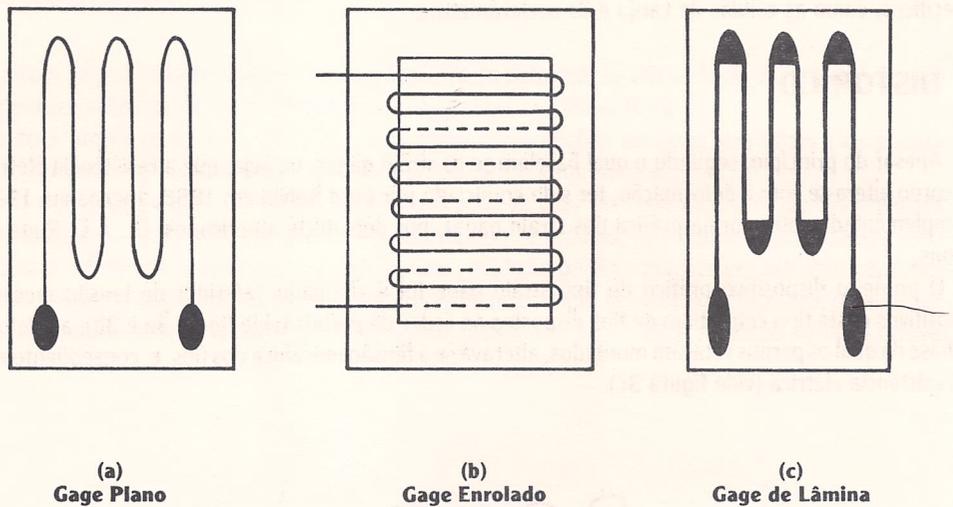


Figura 4: Três dos principais tipos de strain gages.

### 3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A grandeza comumente utilizada para a medição da deformação é o “strain”, “ $\epsilon$ ”, que representa uma deformação relativa entre a quantidade deformada e o comprimento total do corpo, sendo, portanto, uma unidade adimensional.

Os strain gages possuem um fator de sensibilidade denominado “fator de gage”, “ $K$ ” (gage factor) e definido como a variação relativa da resistência ( $\Delta R/R$ ) pela variação relativa do comprimento ativo do gage ( $\Delta L/L$ ).

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

$\frac{\Delta L}{L}$  é medido em  $\epsilon$  (“strains”).

Exemplificando, para ilustrar:

Se  $R = 120\Omega$  e  $K = 2$ , tem-se, para uma deformação de  $1\mu\epsilon$  a seguinte variação de resistência (segundo a equação 1):

$$\Delta R = R \cdot \frac{\Delta L}{L} \cdot K = 120 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 240\mu\Omega$$

Para strain gages metálicos, o gage factor possui valores típicos de 2 a 3.

Existe, geralmente, um eixo de orientação no qual os strain gages são mais sensíveis à deformação; no caso dos gages metálicos, este eixo corresponde ao eixo de maior exposição de área de grelha sensível (denomina-se “grelha”, “grid”, o arranjo do fio ou lâmina sensível num strain gage metálico).

Os strain gages são conectados ao espécime (por “espécime” entenda-se “corpo onde serão detectadas as deformações”) de duas formas básicas: colando-os ou soldando-os.

O adesivo é capaz de forçar a compressão e a expansão da parte sensível do strain gauge porque a área superficial do strain gauge é milhares de vezes superior à seção transversal do mesmo, e o adesivo atua, justamente, fazendo a interface desta área superficial com o espécime.

É usual a utilização de uma configuração do tipo Ponte de Wheatstone para a conversão da variação de resistência dos strain gages em variação de tensão (elétrica).

Pode-se utilizar pontes formadas apenas por strain gages, as chamadas “pontes completas” (“full-bridges”); pontes com dois strain gages e duas resistências fixas, chamadas de “meia-ponte” (“half-bridge”), figura 5; ou pontes com apenas um gage e três resistências fixas denominadas “um quarto de ponte” (“one-quarter bridge”), figura 6. A configuração de ponte com três gages não é usualmente utilizada.

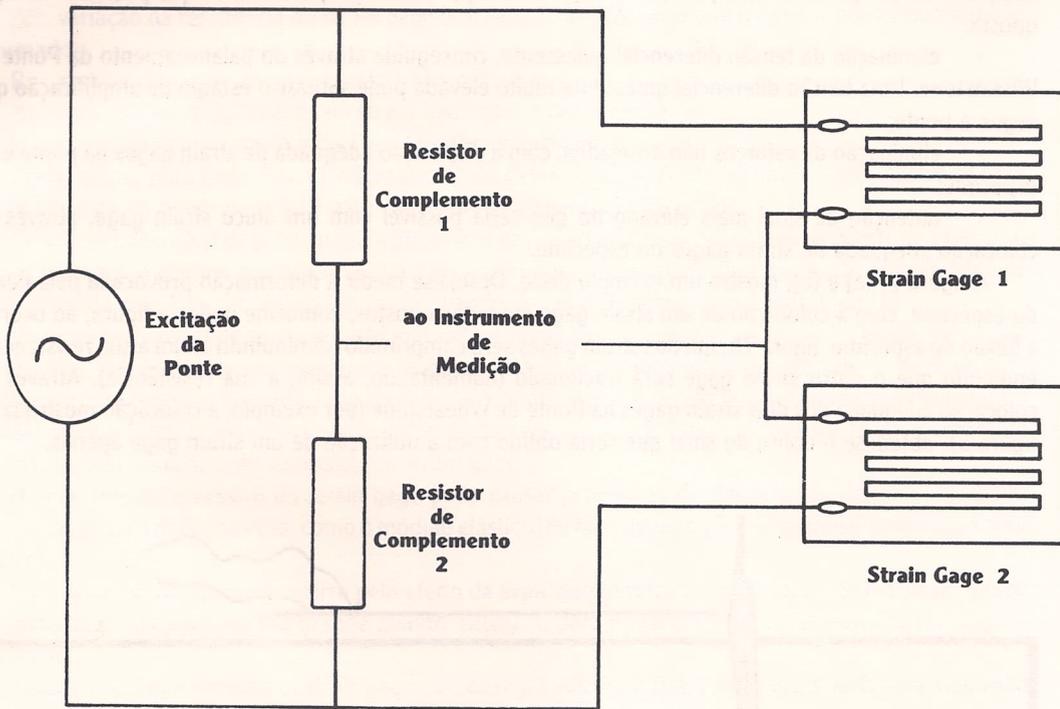


Figura 5: Ponte do tipo "meia-ponte"

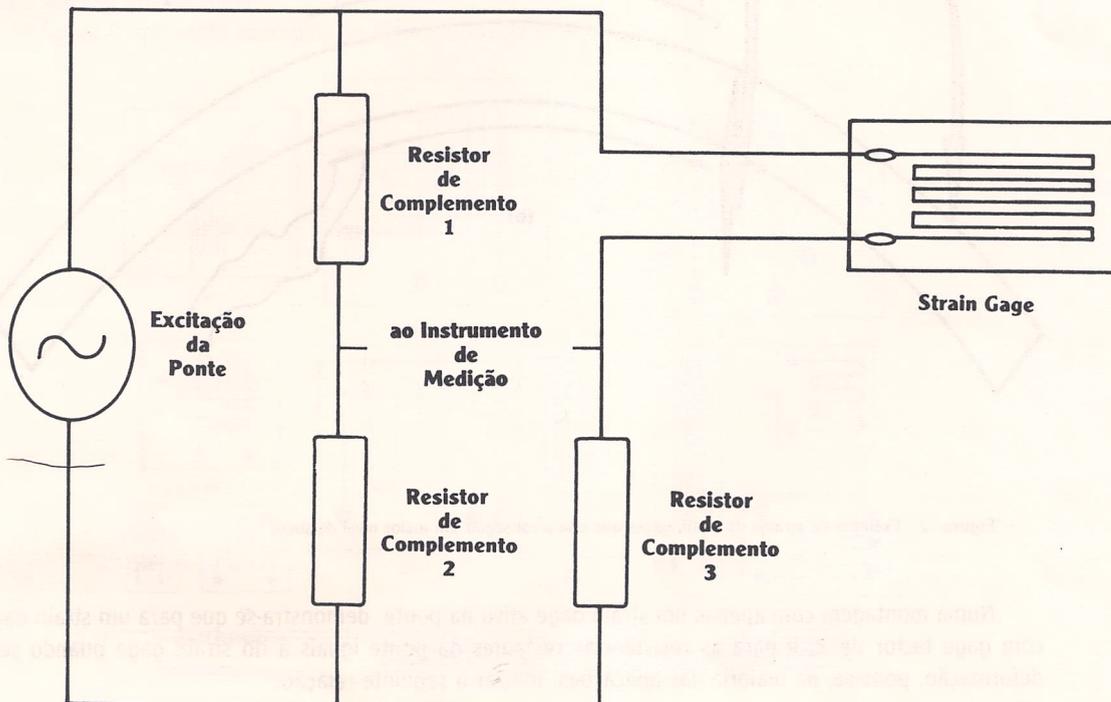


Figura 6: Ponte do tipo "um quarto de ponte"

- As razões da adoção da configuração em ponte são várias, como exemplo, pode-se citar:
- compensação de efeitos da deriva dos componentes da ponte com a temperatura, pela colocação adequada de componentes que possuam a mesma variação com a temperatura, ou que possuam variação oposta;
  - eliminação da tensão diferencial quiescente, conseguida através do balanceamento da Ponte de Wheatstone. Uma tensão diferencial quiescente muito elevada pode saturar o estágio de amplificação que segue a ponte;
  - eliminação de esforços não desejados, com a disposição adequada de strain gages na ponte e no espécime;
  - obtenção de sinal mais elevado do que seria possível com um único strain gage, através da colocação adequada de strain gages no espécime.

A figura 7, (a) e (b), mostra um exemplo disso. Deseja-se medir a deformação provocada pela flexão do espécime, com a colocação de um strain gage em lados opostos, conforme indica a figura; ao ocorrer a flexão do espécime, figura 7b, um dos strain gages será comprimido (diminuindo assim a sua resistência), enquanto que o outro strain gage será tracionado (aumentando, assim, a sua resistência). Através da colocação adequada dos dois strain gages na Ponte de Wheatstone (por exemplo, a colocação mostrada na figura 5), obtém-se o dobro do sinal que seria obtido com a utilização de um strain gage apenas.

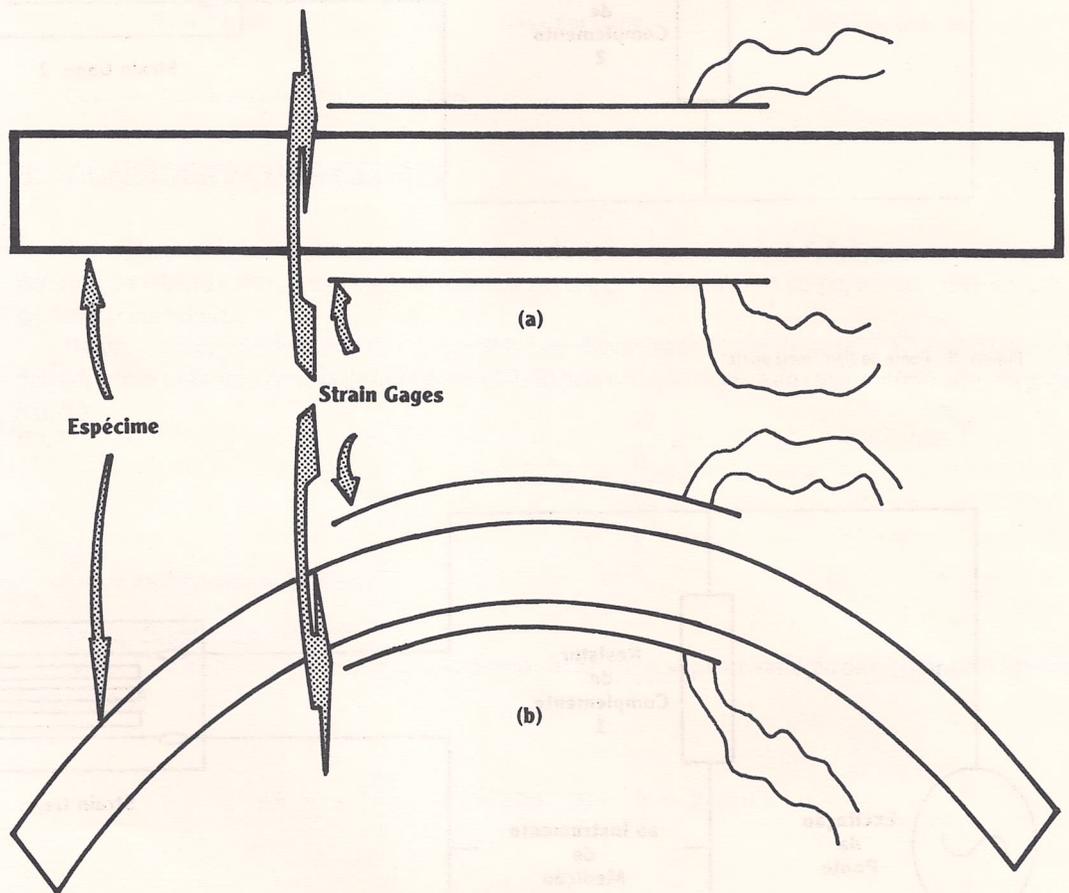


Figura 7: Exemplo de arranjo de strain gages que visa a conseguir um maior nível de sinal.

Numa montagem com apenas um strain gage ativo na ponte, demonstra-se que para um strain gage com gage factor de 2, e para as resistências restantes da ponte iguais à do strain gage quando sem deformação, pode-se, na maioria das aplicações, utilizar a seguinte relação:

$$\frac{V_0}{V} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L}$$

Onde:

$V_0$ : tensão de saída da Ponte de Wheatstone

$V$ : tensão de alimentação da Ponte de Wheatstone

$\Delta R$ : variação da resistência do strain gage (em relação à resistência que o mesmo possui quando não deformado).

$R$ : resistência do strain gage quando não deformado.

$\Delta L$ : variação do comprimento do strain gage com a deformação.

$L$ : comprimento do strain gage (quando não deformado).

Desta forma, para cada  $1\mu\epsilon$  (1 micro-strain) de deformação aplicada ao strain gage, obtém-se uma tensão de saída da ponte de  $0,5\mu V$  para cada Volt de alimentação da ponte.

Devido ao baixo nível de sinal de saída disponível na maioria das aplicações e do ambiente de utilização dos strain gages, é comum a ocorrência de sinais espúrios, de intensidade superior ao do próprio sinal de saída; devendo este fato ser levado em conta quando do condicionamento do sinal. Vide [1].

Do exposto, depreende-se que quanto mais alta a alimentação da ponte, maior será a tensão fornecida por ela. Mas, deve-se obter um compromisso quanto à tensão de alimentação da ponte; ela deve ser alta o suficiente para obter-se, na saída, uma magnitude de tensão tal que permita o adequado condicionamento do sinal, para a faixa de magnitudes das deformações que se deseja medir, e deve ser baixa o suficiente para não causar aquecimento excessivo do strain gage.

O aquecimento excessivo do strain gage pode causar problemas de stress no espécime e, também, mudar suas propriedades básicas, como o módulo elástico (de fácil visualização, se imaginar-se um espécime plástico).

Uma deformação aparente ocorre pelo efeito da expansão térmica do material ao qual o strain gauge está conectado. Ela pode ser tão grande quanto  $12\mu\epsilon/^\circ C$  para o aço e aproximadamente  $23\mu\epsilon/^\circ C$  para o alumínio.

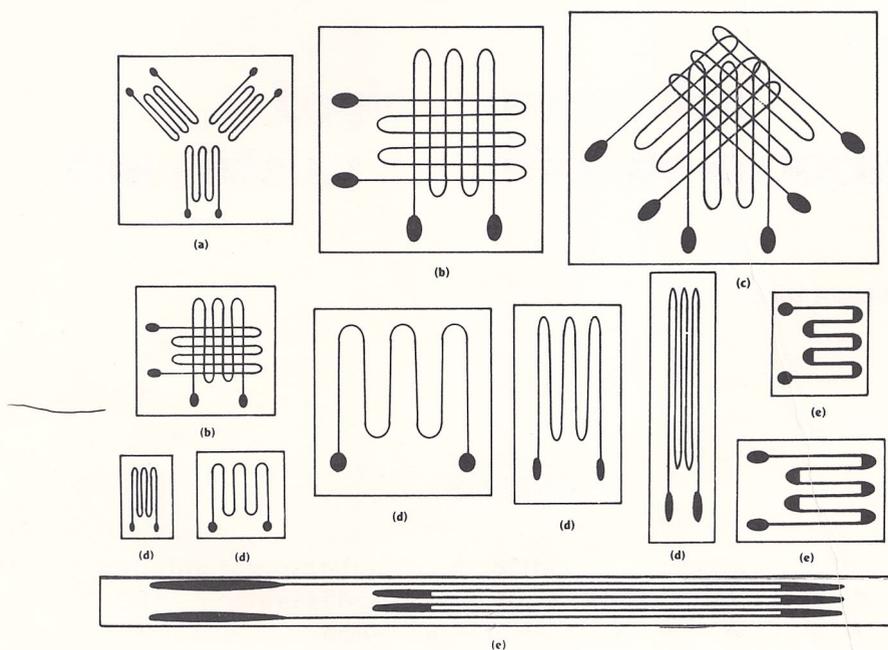
Como o metal que constitui os strain gages, via de regra, não é o cobre, e a fiação utilizada para a conexão dos gages ao dispositivo de medição geralmente é deste metal, formam-se termopares nas junções entre a fiação e o metal do strain gage.

Um termopar típico, formado nas junções entre a cabeção e a liga constitutiva dos strain gages, é a junção Cobre-Costantan. Tal junção fornece um termopar com sensibilidade de  $40\mu V/^\circ C$ , superior, portanto, ao sinal provocado por pequenas deformações.

Deve-se prever, portanto, meios de compensação destes dois fenômenos, quando significativos para a aplicação.

Apenas um único fabricante (a Micro Measurements - E.U.A.) fabrica mais de 4000 tipos de strain gages (não computando os strain gages feitos sob encomendas), sendo necessária uma metodologia consistente para a seleção dos mesmos.

A figura 8 apresenta exemplos de alguns tipos de strain gages.



- (a) Tipo Roseta Delta não superposta
- (b) Tipo Roseta "T" superposta
- (c) Tipo Roseta Retangular superposta
- (d) Gage de Fio, tipo plano
- (e) Gage de Lâmina

Figura 8: Alguns tipos de strain gages.

Como fatores determinantes na escolha de strain gages pode-se citar: precisão, estabilidade, alongação máxima, duração das medições, ciclicidade do esforço, simplicidade e facilidade de instalação.

Uma seleção racional dos strain gages influirá em:

- otimização da performance do gage para as condições de operação;
- precisão e confiabilidade nas deformações medidas;
- facilidade de instalação e minimização do custo total da instalação do gage.

Bibliografia recomendada: [2], [3], [4], [5], [6] e [7].

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Measurements Group. **Noise Control in Strain Gage Measurements**. Tech Note "Noise Control in Measurements" TN-501, Measurements Group, Inc., P.O. Box 27777 Raleigh, North Carolina, 27611, USA, 1980.
- [2] Fábio Campos. **Sistema de Condicionamento de Sinais, Aquisição e Armazenagem de Dados para Transdutores Strain Gage**. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco - Departamento de Eletrônica e Sistemas, 1991.
- [3] Van Valkenburgh and Nooger & Neville, Inc. **Eletricidade Industrial Básica**. Volume 1, Livraria Freitas Bastos S.A., Rua 7 de Setembro 127/129, Rio de Janeiro, RJ, Cep 20000, 2edition, 1976.
- [4] Douglas V. Hall. **Microprocessors and Interfacing, Programing and Hardware**. MacGraw-Hill Book Company - USA, 1986.
- [5] Hewlett Packard. **The Fundamentals of Data Acquisition**. Hewlett-Packard Company, 4 Choke Cherry Road, Rockille, MD 20850, USA, apr 1990.
- [6] CHR. PEEKEL. **Do We Measure Strain, When We Measure Stran?** Technical Report, Civil Engineering Department - University of Leeds, Leeds, LS2, 9jT, England, 1972.
- [7] Paul Horowitz and Winfield Hill. **The Art of Electronics**. Press Syndicate of the University of Cambridge, 40 West 20th Street, New York, NY 10011, USA, 2 edition, 1990.