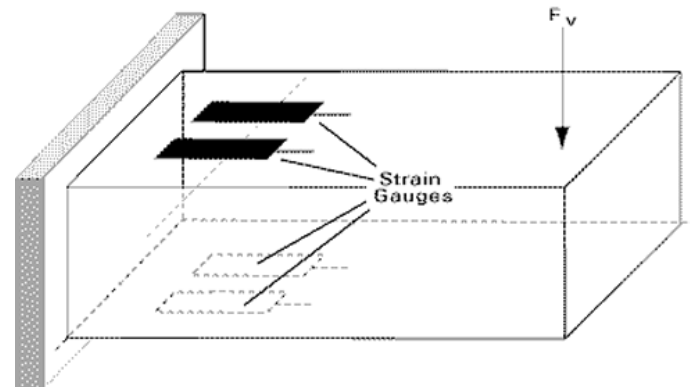
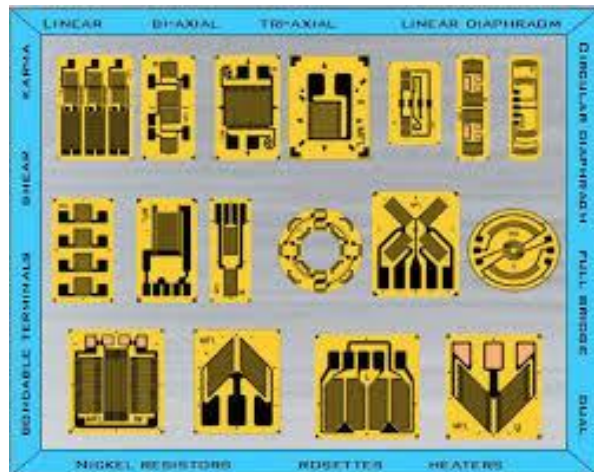
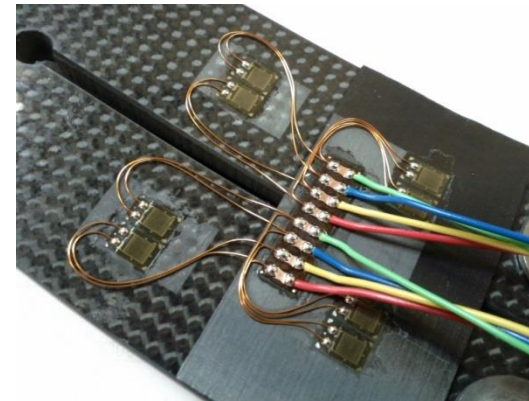


“Extensometria é a técnica de medição de deformações na superfície dos corpos.”



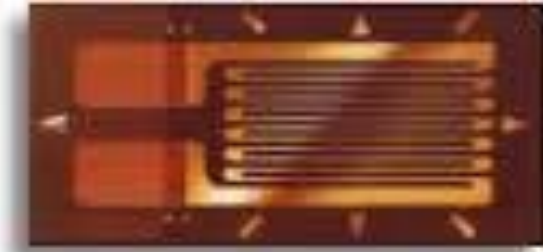
Fonte amplificadora



SILVIO TADO ZANETIC



EXTENSOMETRIA-VIA STRAIN GAUGES

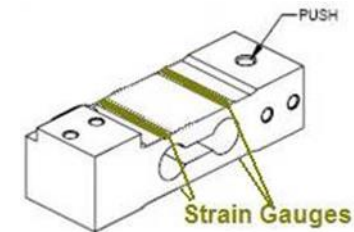


ANÁLISE DE TENSÕES

- tensão por carregamento
- Tensão residual
- monitoramento

CÉLULAS DE CARGA

- peso-massa
- Força
- Torque
- Pressão
- esforços



Avaliação da integridade estrutural sob o ponto de vista de tensões, em peças solicitadas estática e dinamicamente.

APLICAÇÕES

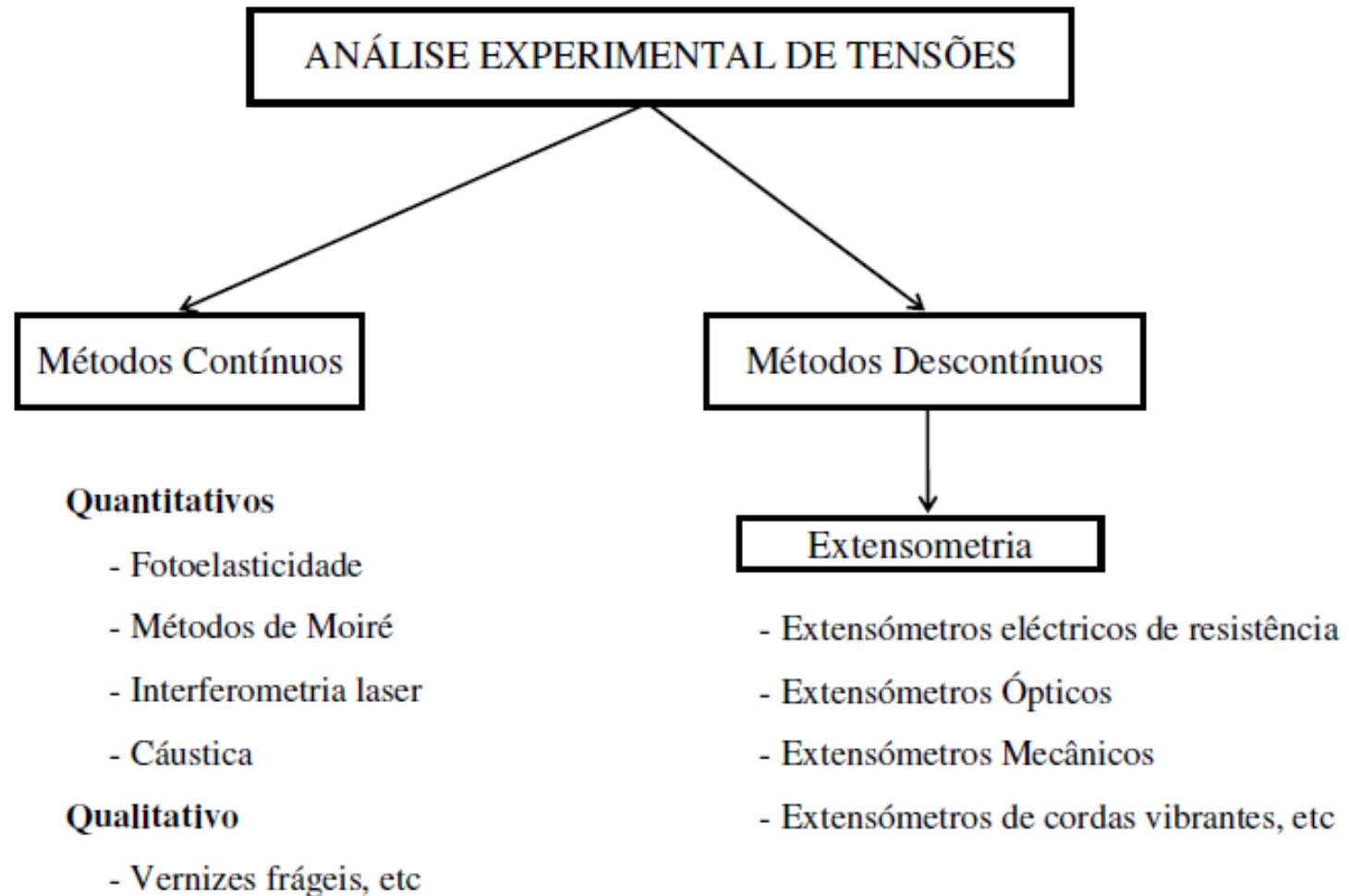
EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES



Strain Gage (ou Gauge)=Extensômetro: Sensores utilizados para medições de força tem importantes aplicações em ciências, engenharia e tecnologias, tais como em ensaios de resistência dos materiais ; análise de tensões em estruturas .



EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES



EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

**Resumo-
Histórico**

- **1856**-William Thomson (Lord kelvin), verificou que condutores de cobre e ferro sujeitos à solicitação mecânica de tração, a resistência elétrica que percorria esses condutores $R=f(\rho,L,A)$ ou $R=\rho \frac{L}{A}$
- Entre **1930 a 1940** Roy Carlson realmente aplicou o princípio na construção de extensômetro de fio, como são utilizados hoje;
- Em **1937-39**, Edward Simmons e Arthur Ruge, trabalhando independentemente utilizaram pela primeira vez fios metálicos colados à superfície de um corpo de prova para medida de deformações.
- Em **1952**-Saunders-Roe [lamina]
- Em **1960**- Masen-semi-conductor
- Em **1990**-Soldáveis

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

Resultados do experimento de Lord Kelvin:

- **Resistência Elétrica do cobre e ferro quando submetido à tensões, segundo a equação**

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

- 1- Resistência do fio varia em função da deformação;
- 2- Materiais diferentes tem sensibilidades diferentes;
- 3- A ponte de Wheatstone pode ser usada para medir essas variações.

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

Análise experimental de estruturas via strain gages permite:

- Validar os cálculos através de modelos analíticos
- Prever melhorias no projeto de novas e antigas estruturas
 - Avaliar a ação de esforços não previstos.

Etapas clássicas de um projeto

- a) Modelagem-Idealização (CAD): definição da geometria, cargas, vinculações, materiais, etc;
- b) Análise do modelo (CAE): cálculo das tensões, deformações, deslocamento, dimensionamento, critérios de resistência, rigidez, estabilidade, segurança, etc.;
- c) Construção-projeto definitivo (CAM): detalhamento, fabricação, montagem, funcionamento, manutenção, etc.;
- d) Testes (CAT): monitoração, análise experimental.

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

Principais campos de aplicação

- Ensino
- Pesquisa
- Indústria

O que medir?

- Unidirecional
- Estado bi-dimensional de Tensões
- Medições são feitas na superfície
 - Dificuldades
- A deformação não é medida no ponto mas ao longo de um comprimento;

$$\text{Deformação: } \epsilon = \frac{\delta L}{L}$$

Em que:

- ϵ - deformação axial específica;
- δL - variação do comprimento;
- L - comprimento inicial.

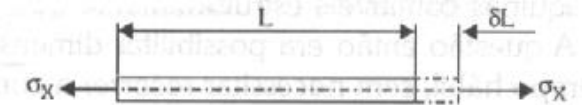


Figura 1 - Elemento deformado axialmente.

Tensão x deformação

$$\text{Deformação } \epsilon = \frac{\delta}{l}$$

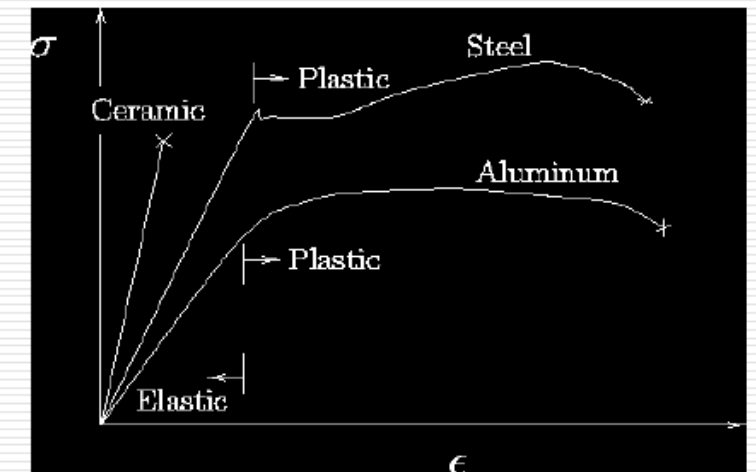
Lei de Hooke :

$$\sigma = E \epsilon$$

onde:

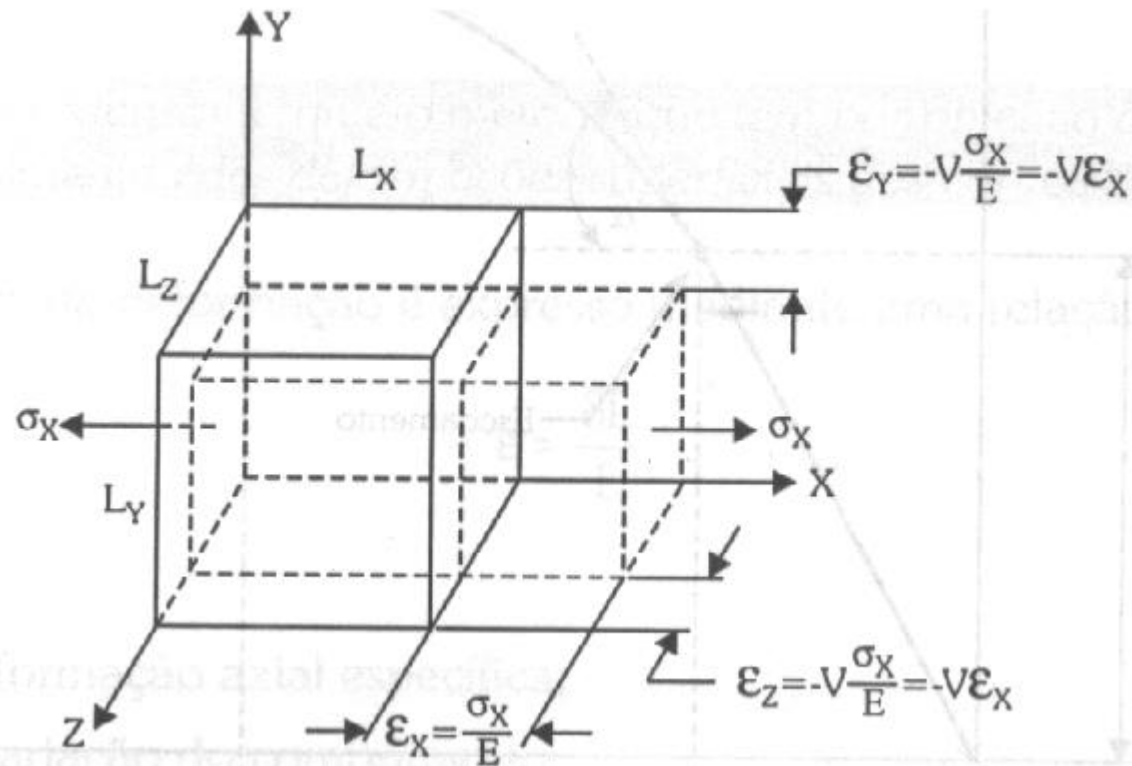
 E = Módulo de Elastic. σ = tensão ϵ = deformação

$$\text{Tensão: } \sigma = \frac{F}{A}$$



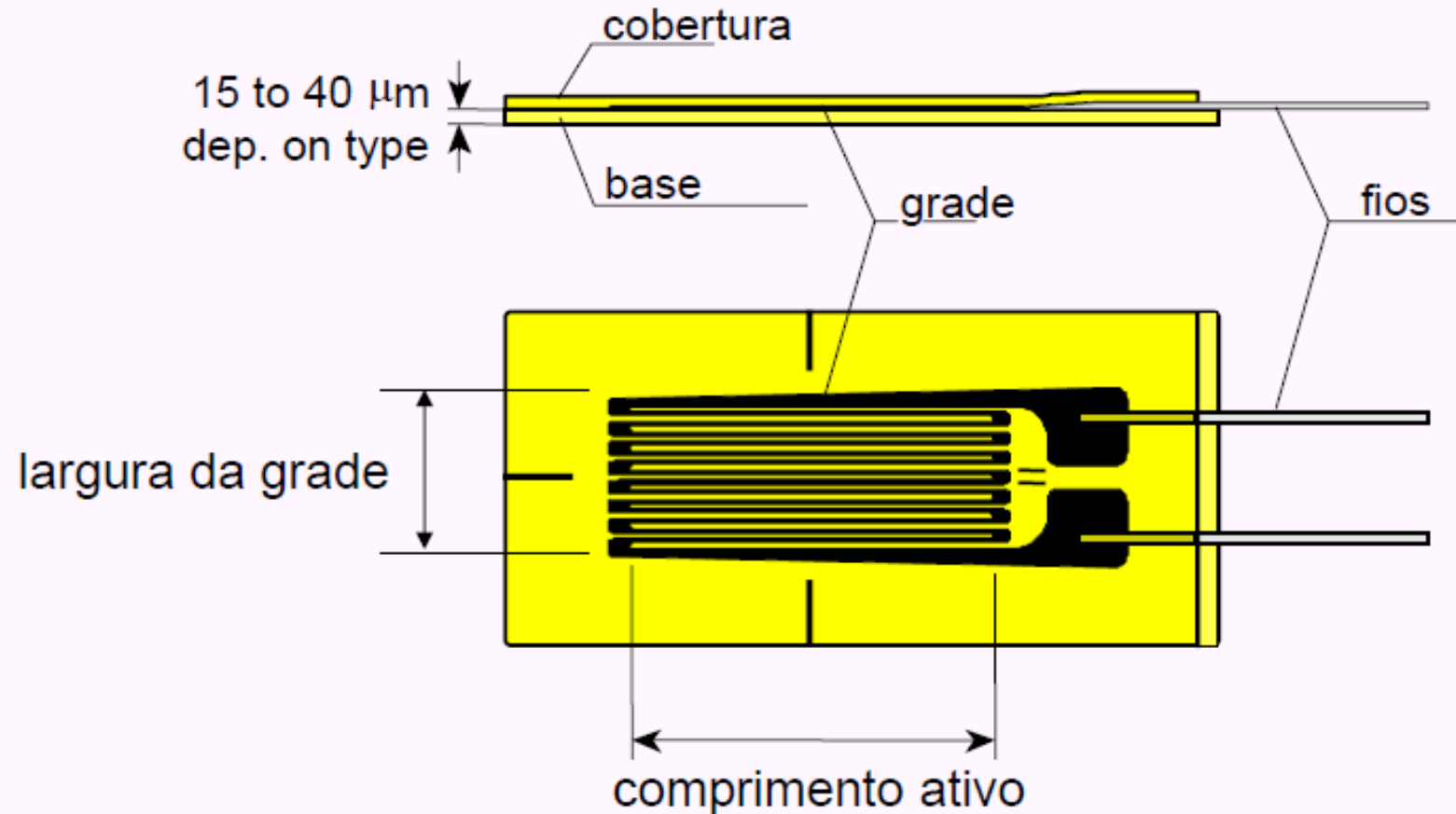
EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

Efeito do Coeficiente de Poisson
(Relação entre a deformação transversal e a longitudinal)



EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

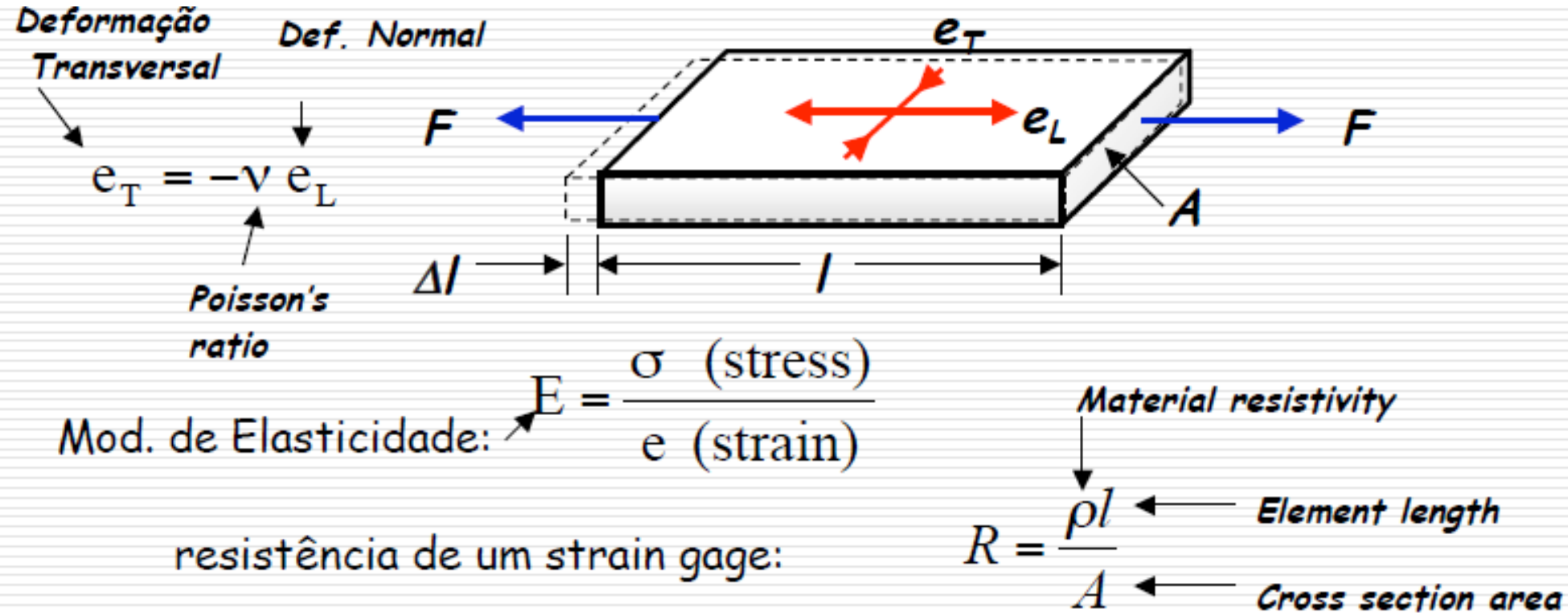
O strain gage



BASE: (polímeros)
 poliamida, epóxi, fibra de vidro,
 poliéster, papel, etc;
FIO (elemento resistivo)
 Constantan, Advance, Nicromo V,
 Karma, Isoelástico, etc;
SEMICONDUCTORES (sensores
 piezoresistivos-mudança de
 resistência e piezoelétricos-geram
 tensões): silício, germânio.

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

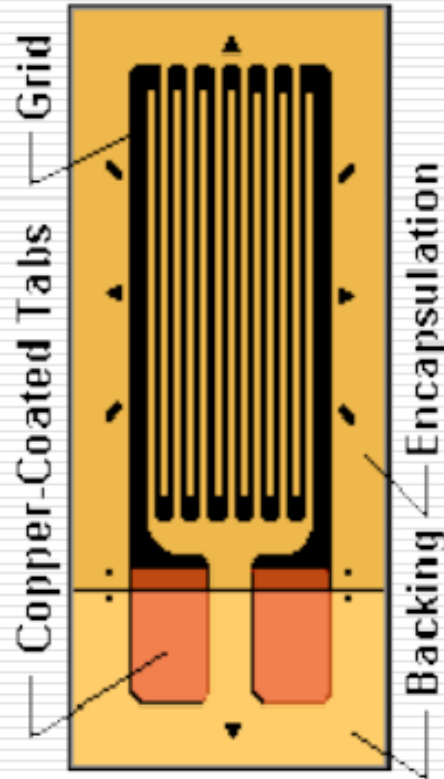
FUNDAMENTOS DOS SG



Quando um strain gage é deformado, a variação de resistência será:

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial l} \right) \Delta l + \left(\frac{\partial R}{\partial A} \right) \Delta A + \left(\frac{\partial R}{\partial \rho} \right) \Delta \rho$$

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES



Variação relativa de resistienciã:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

porque: $\frac{\Delta l}{l} = e_L$; $\frac{\Delta A}{A} = 2 \frac{\Delta D}{D} = 2 e_T = 2 (-\nu e_L)$

Poisson's ratio

logo: $\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu)e_L + \frac{\Delta \rho}{\rho}$

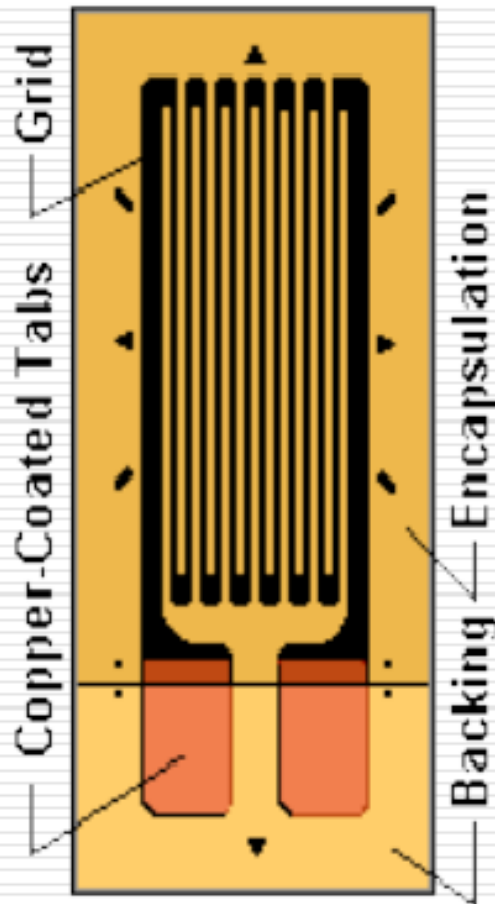
Define-se o **Gage factor** K:

$$K = \frac{\Delta R/R}{e_L}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = ke_L$$

Gage factor of a strain gage: $K = G = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho}{e\rho}$

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES



Características:

- 1) Capazes de medir deformações de $\pm 1\%$ - 5%
- 2) Pequenos e leves
- 3) Capazes de responder a sinais em altas freqüências (500kHz)
- 4) Ampla faixa de resposta linear
- 5) Constante de calibração muito estável (gage factor aprox. 2)
- 6) Flexível e ajustável para diversas aplicações
- 7) Custo baixo (R\$10)

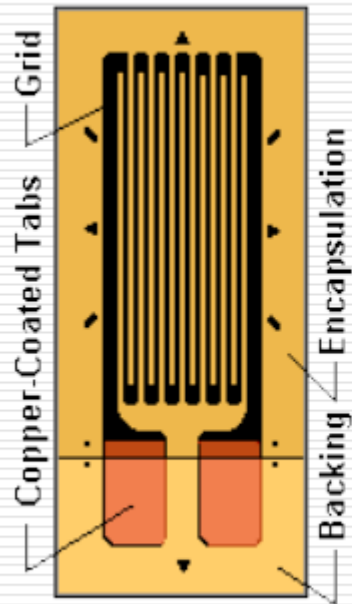
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

São determinadas pelo sistema de aquisição:

- Valor da resistência: tipicamente 120 ou 350 ohms;
- Alimentação de 1,5V a 40V;
- Tipo de Conexão em ponte;

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

Valores Típicos de Especificação

*Faixa de Temperatura*

Normal: -73 to $+180^{\circ}\text{C}$

Short-Term: -190 to $+200^{\circ}\text{C}$

Faixa de Deformação

+3% for gage lengths under 3,2mm

+5% for 3,2mm e acima

Fadiga

10^5 cycles at +1500 microstrain

10^6 cycles at +1500 microstrain

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

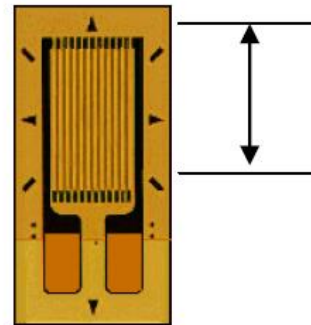
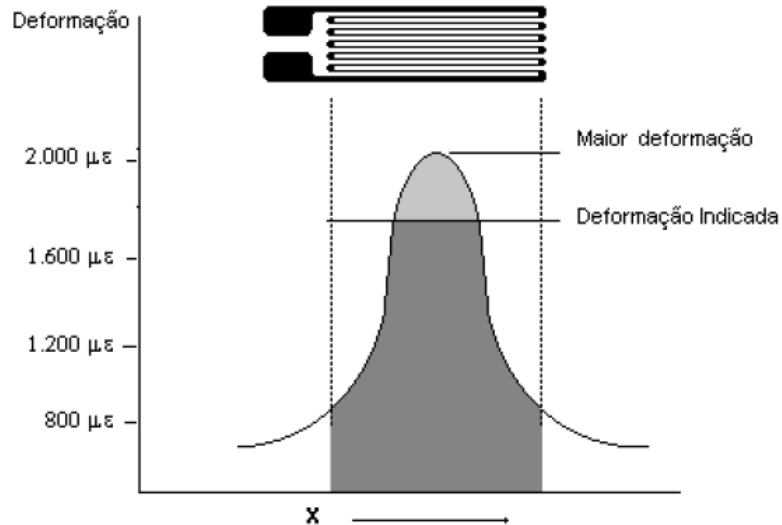
Tabela 1 - Características de alguns strain gauges comerciais.

Composição química	Fabricante	Fator Gauge K	Resistência $\mu\Omega.cm$	Coefficiente de temperatura	Máxima temperatura $^{\circ}C$
55% Cu, 45%Ni	Advance Constanten Copel	2,0	49	11	< 360
4%Ni, 12%Mn, 84%Cu	Manganin	0,47	44	20	
80%Ni, 20%Cu	Nichrome V	2,0	108	400	800
36Ni, 8%Cr, 0.5%Mo, 55,5%Fe	Isoelastic	3,5	110	450	300
66%Ni, 33%Cu	Monel	1,9	400	1900	750
74%Ni, 20%Cr, 3%Al, 3%Fe	Karma	2,4	125	20	

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

A escolha correta

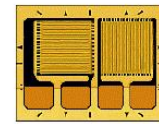
- Dimensão do extensômetro
 - Geometria da grade
 - Tipo de extensômetro



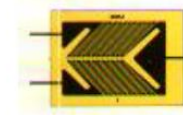
Dimensão do extensômetro

(Consideração mais importante)

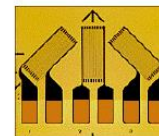
Para pontos de medição muito pequenos



Roseta "retangular" com dois extensômetros dispostos a 90°, para uso geral.



Roseta com dois extensômetros dispostos a 90°, para medição de torque ou cisalhamento.



Roseta "retangular" com três extensômetros dispostos a 45°

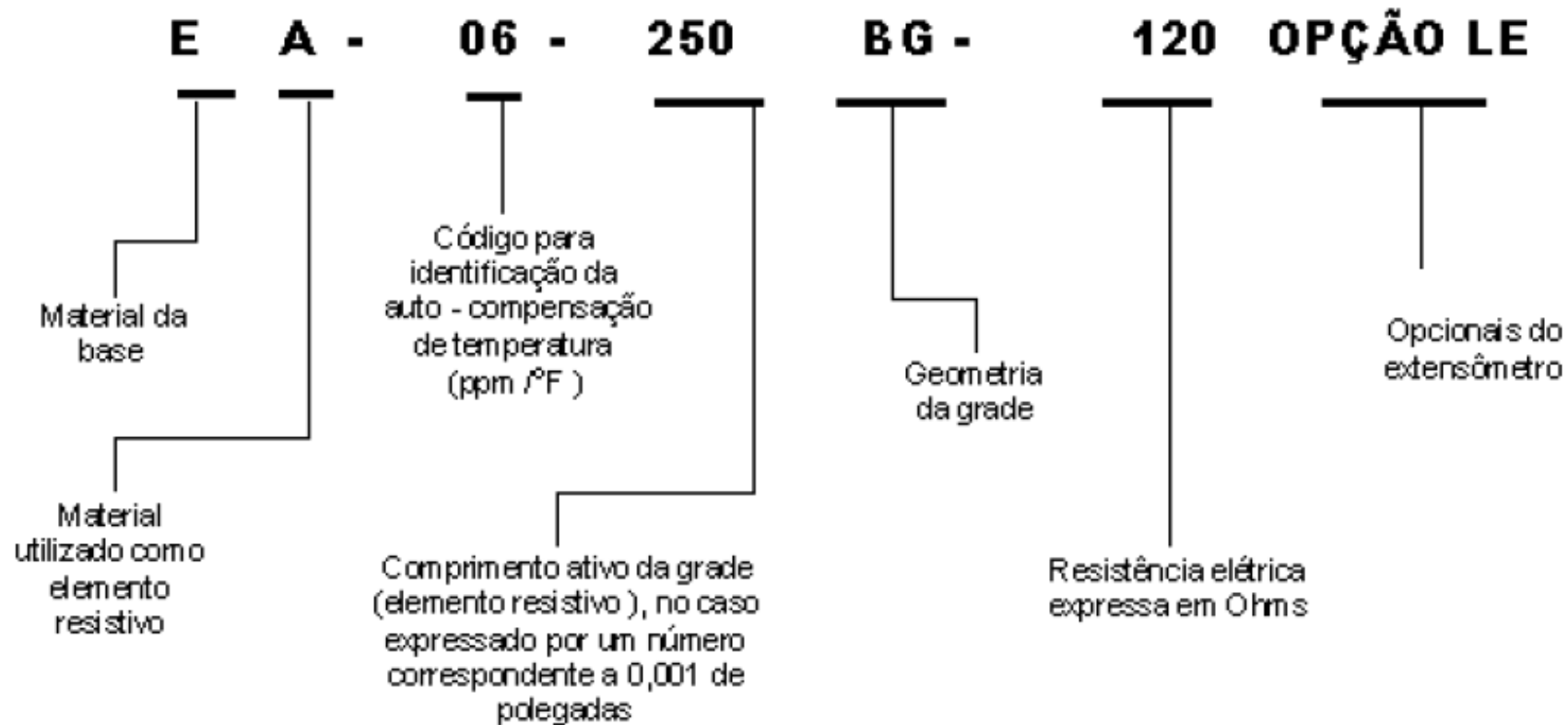


Roseta com três extensômetros para medição de tensão residual

Ex. de erro por ter sido escolhido um SG de dimensão maior do que o da região concentração de tensão.

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

- Os catálogos dos fabricantes (MM;Kyowa; HBM) são bem detalhados, possuem toda informação para a escolha correta.



HBM

Hottinger Baldwin
Messtechnik.

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

SERIES G

Constantan on fibre reinforced phenolic resin

1 grid strain gauges

LG 11	0,6/120	1,5/120	3/120	6/120	10/120
for steel			3/350	6/350	10/350
LG 13				6/120	
for aluminium			3/350	6/350	10/350

2 grid strain gauges

XG 11		1,5/120	3/120	6/120
for steel			3/350	6/350

XG 21		1,5/120	3/120	6/120
for steel				6/350

SERIES C

CrNi on Polyimide

1 grid strain gauges

LC 11	3/120	6/120	10/120
for steel	3/350	6/350	10/350

2 grid strain gauges

XC 11	3/350	6/350
for steel		

3 grid strain gauges

RC 11	4/350	6/350
for steel		

Strain gauges for Residual Stress Measurement

„High Speed Drilling“

rectangular hole-drilling rosette
0°/45°/90°

RY 61 K	1,5/120
for Steel	

Hole-drilling method according to the integral procedure

hole-drilling rosette
0°/45°/90°

RY 21	3/120
for steel	

0°/45°/90° hole-drilling rosette for application with HBM drilling device (see page 47)

RY 61	1,5/120
for steel	

Ring core method

ring core rosette
0°/90°

XY 51	5/350
for steel	

ring core rosette
0°/45°/90°

RY 51	5/350
for steel	

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

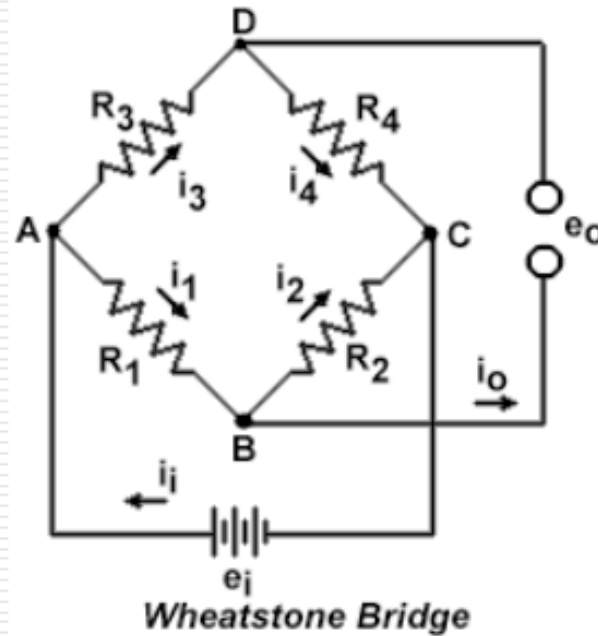
De acordo com o estado de tensões

- Medição de tensão numa única direção (ou na principal): LINEAR;
- Direções Principais conhecidas: 90° ;
- Medição de Torque: 45° (com referência ao eixo de simetria);
- Direções Principais Desconhecidas: usa-se rosetas. $0/45^\circ/90^\circ$ são usadas quando se tem uma estimativa das direções principais. Caso contrário usa-se: $0/60^\circ/120^\circ$.

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

A medição com Strain Gage

CIRCUITO TIPO PW PARA MEDIDA DE DEFORMAÇÕES

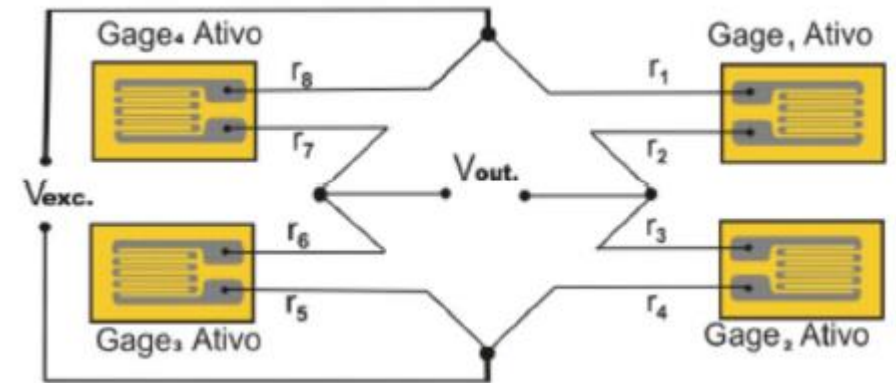
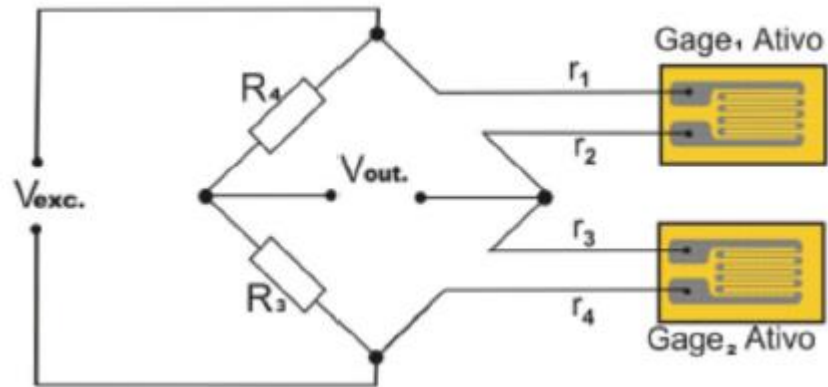
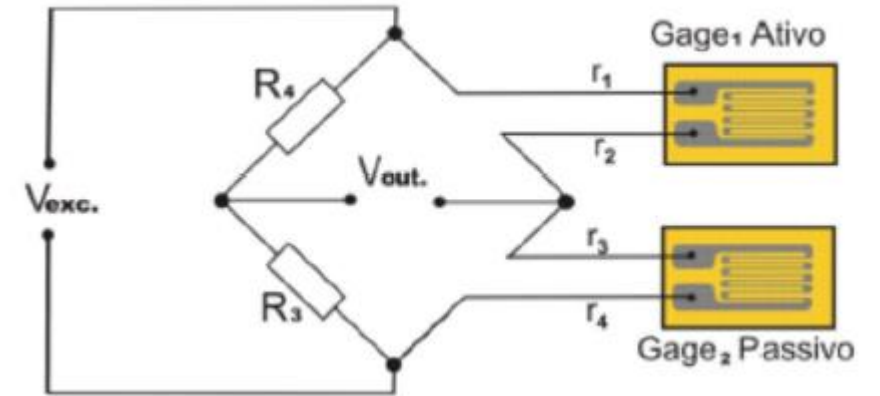
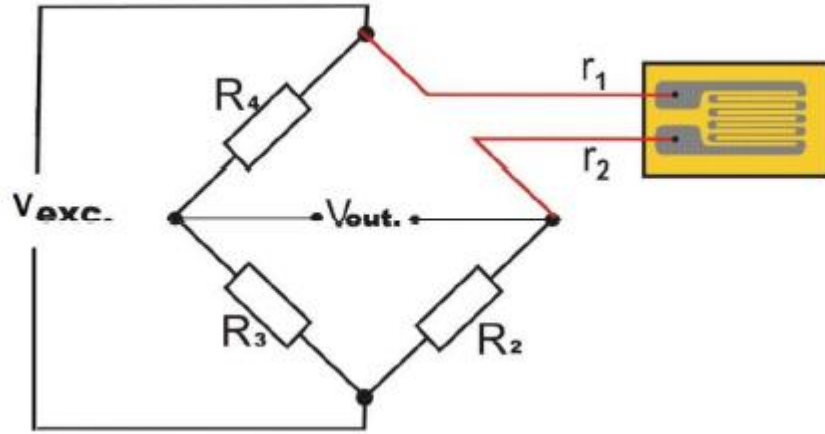


Sensitive instrumentation is required to measure the small changes in resistance produced by strain gauges.

Wheatstone bridge is typically used to measure resistances accurately and dynamically over a very large range (1 to 1,000,000 Ω).

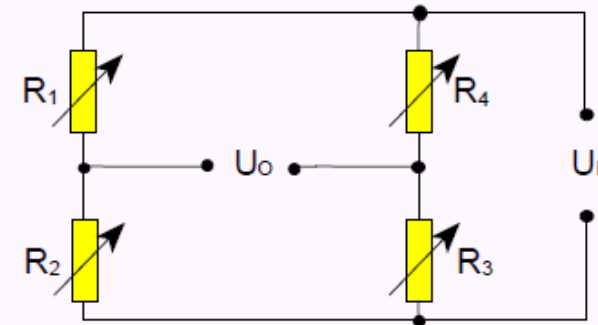
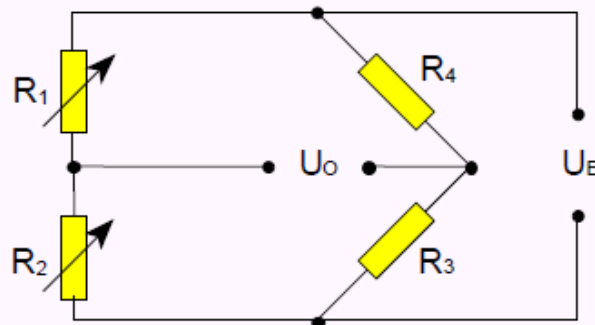
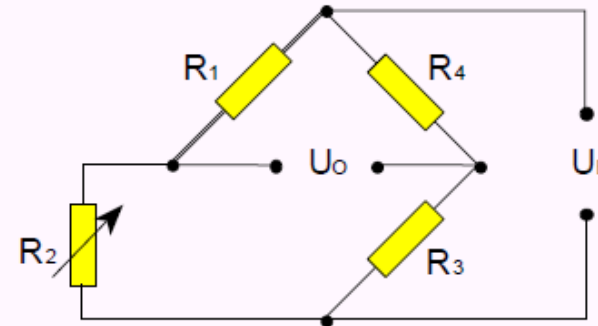
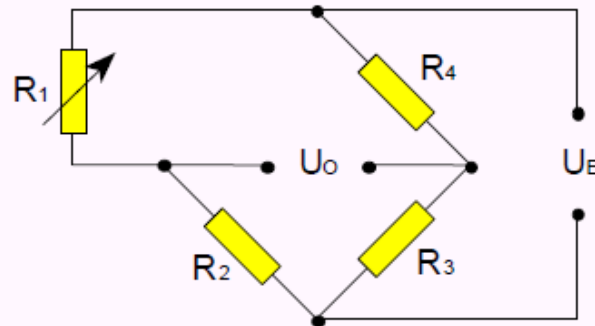
- As ligações em PW são feitas substituindo seus braços pelos S.G's, chamados ativos:
- Conforme o número de braços teremos ligações ou montagens em $\frac{1}{4}$ de ponte, $\frac{1}{2}$ ponte e ponte completa.

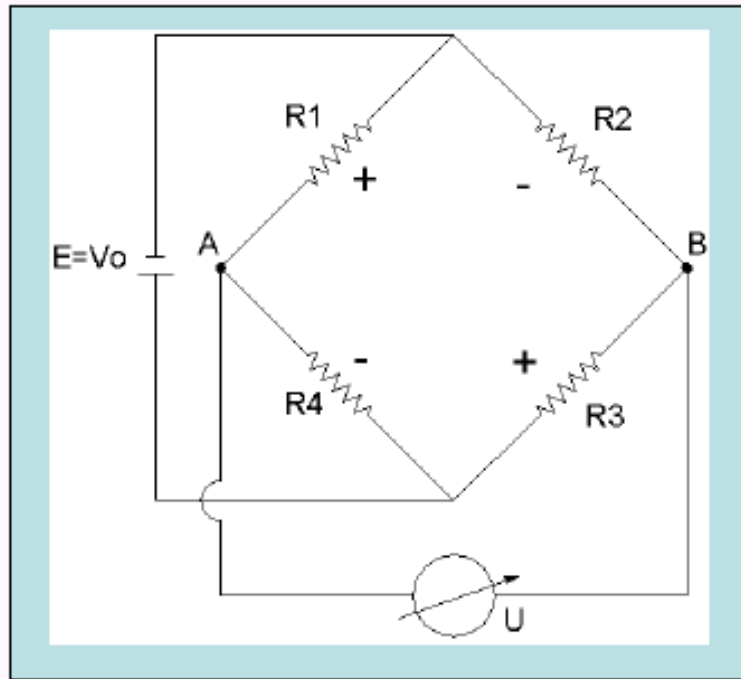
EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES



EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

Tipos de circuito de Ponte de Wheatstone





Caso Geral – Ponte completa: 4 strain-gages

$$R_1 \rightarrow R_1 + \Delta R_1$$

$$R_2 \rightarrow R_2 + \Delta R_2$$

$$R_3 \rightarrow R_3 + \Delta R_3$$

$$R_4 \rightarrow R_4 + \Delta R_4$$

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon$$

$$K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = K$$

$$U = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)} \cdot V_0$$

$$\frac{\Delta U}{V_0} \cong \frac{1}{4} \cdot \left(+ \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Ponte em equilíbrio (balanceada)

$$U = 0 \quad R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$$

$$\frac{\Delta U}{V_0} \cong \frac{K}{4} \cdot (+\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

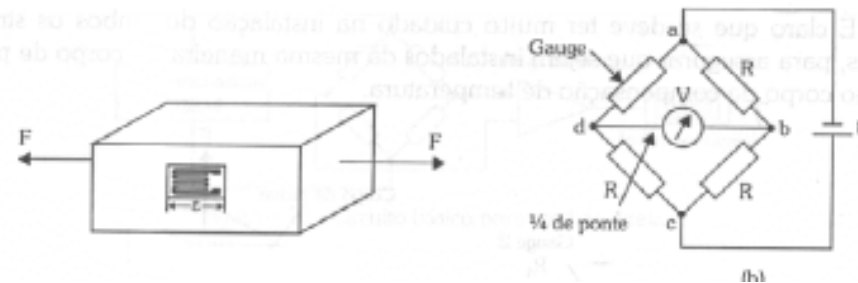
“Montagem” de medidas com pontes extensométricas:

Dependendo do tipo de solicitação no material formas diferentes de montagem para os extensômetros devem ser utilizadas na ponte de Wheatstone.

CASO I : BARRA PRISMÁTICA DE EIXO RETO, SUBMETIDA A ESFORÇO DE TRAÇÃO SIMPLES

- ❑ Para este caso podemos apresentar duas montagens diferenciadas do sistema:
- ❑ Um gauge ativo, alinhado na direção da força
- ❑ Circuito 1: $\frac{1}{4}$ de ponte, alimentado com tensão constante
- ❑ Sem compensação de temperatura

EXEMPLOS



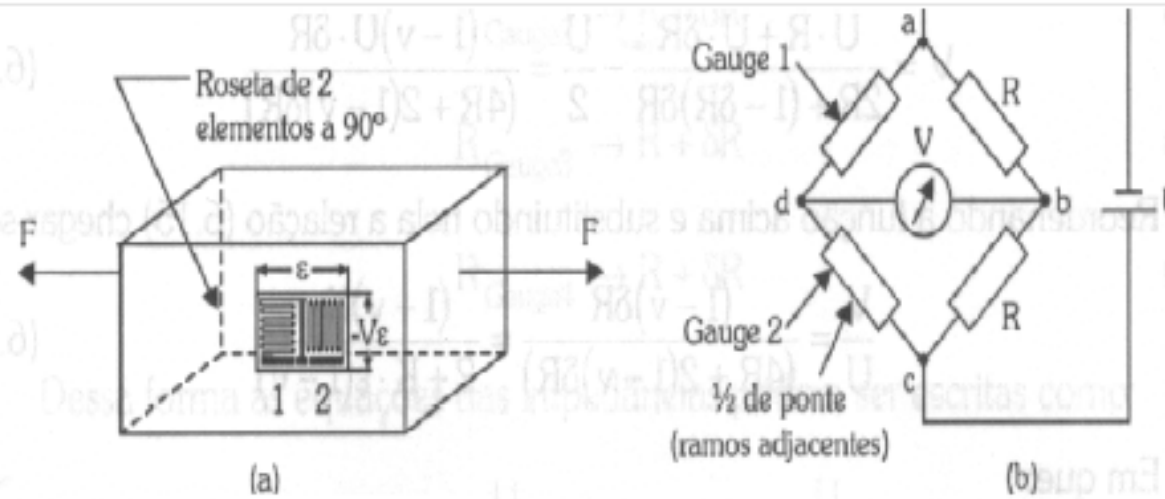
EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

Segunda montagem:

Dois gages ativos, em ramos adjacentes da ponte; um deles alinhado na direção da força aplicada e o outro em direção perpendicular utilizando o efeito de Poisson para aumentar a sensibilidade.

Circuito: $\frac{1}{2}$ ponte.

Sem compensação de temperatura.

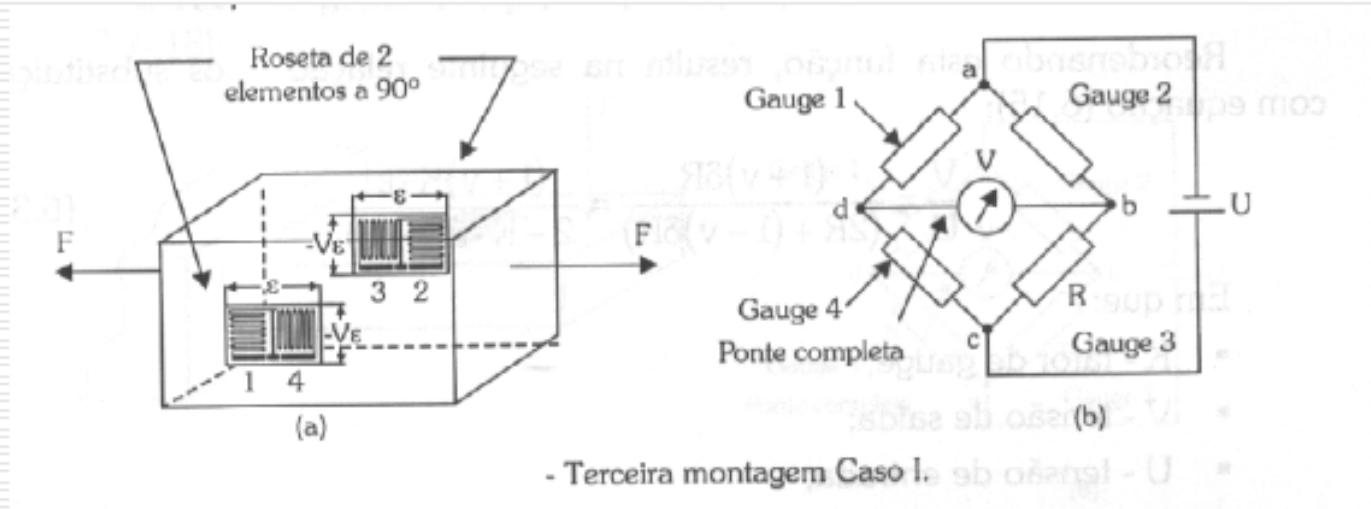


Segunda montagem Caso I.

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

Terceira montagem:

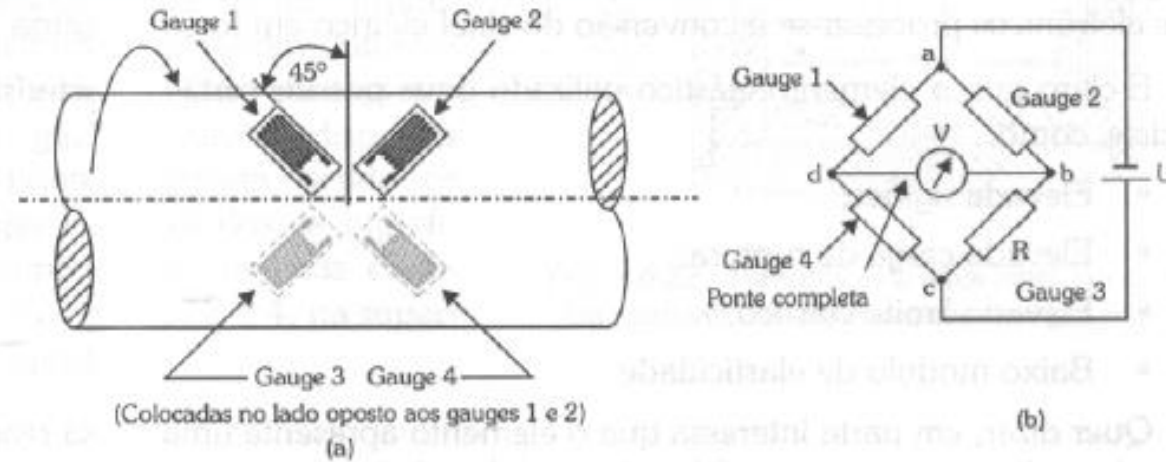
- ❑ Quatro gauges ativos, dois de ramos opostos para a direção da força aplicada e os dois restantes na direção perpendicular ao efeito Poisson.
- ❑ Circuito: ponte completa, alimentado com tensão constante.
- ❑ Com compensação de temperatura (resposta linear).



EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

- Neste caso os strain-gauges são solicitados à máxima deformação, e por isso são montados a 45° com as geratrizes.

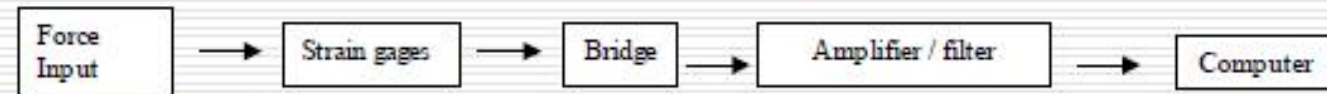
**TORÇÃO
EIXO-ÁRVORE**



• Montagem dos strain gauges em árvores de transmissão.

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

Practical Implementation of Strain Gages



Preparation:

- lixar a superfície
- limpar com um solvente
- **colar** = cianocrilato + agente de cura

Most critical step!



INSTALAÇÃO DOS
SG

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

METAIS

- 1 Desengravar ←
- 2 Condicionar
- 3 Lixar ←
- 4 Neutralizar
- 5 Riscar ←
- 6. Posicionar o gage ←
- 7 Condicionar
- 8 Neutralizar
- 9 Limpeza Fina ←

NÃO METAIS

- CONCRETO
- VIDRO
- PLÁSTICO
- MADEIRA
- BORRACHA

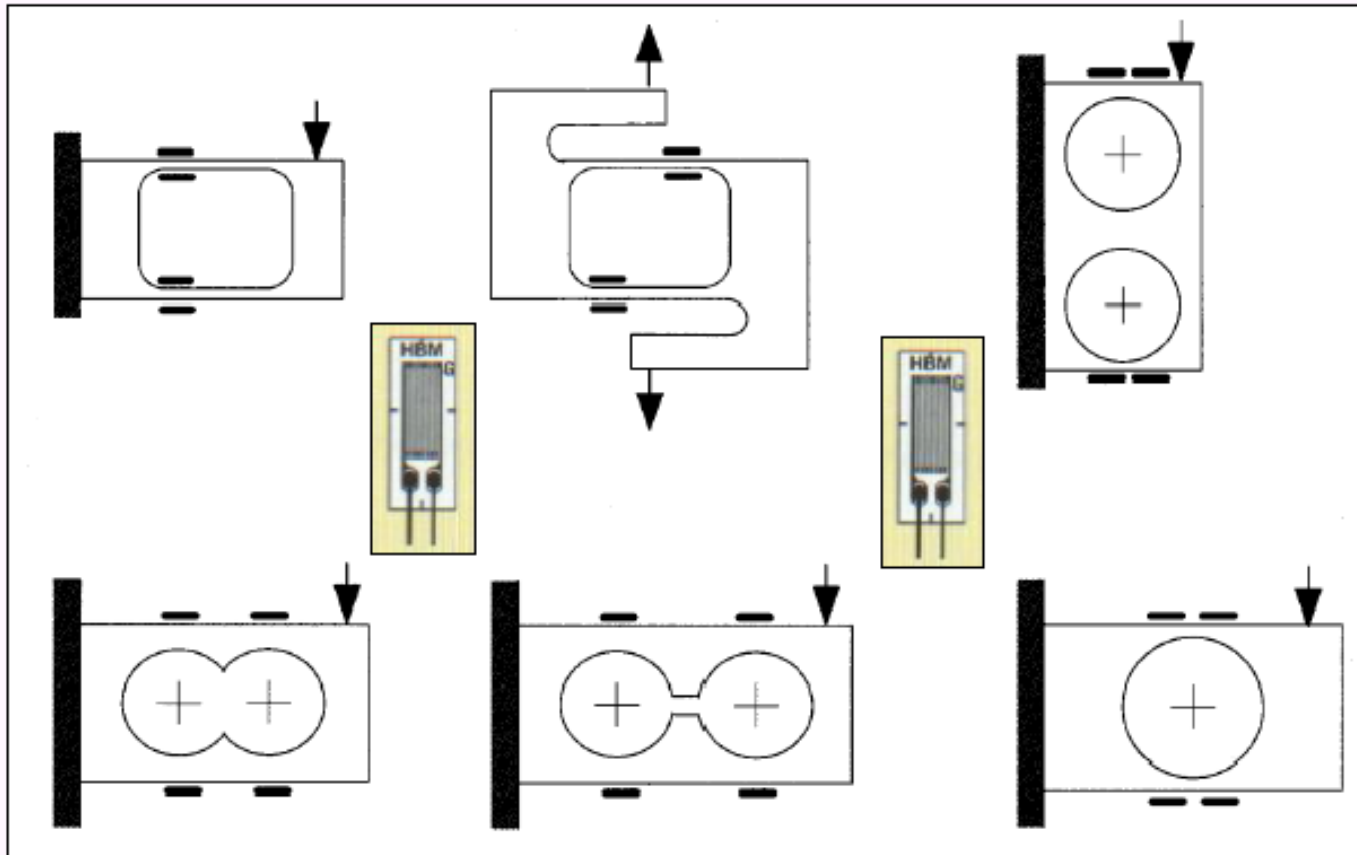
Células de Carga

- Aplicado na medição de força e peso;
- Medição de forças compressivas estáticas e dinâmicas;
- São tipicamente construídas com strain gage e/ou sensores piezoelétricos;
- Abrangem faixas desde poucos kN a 700kN típicos;

EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES



VIGA - flexão



EXTENSOMETRIA-STRAIN GAUGES

OBRIGADO

STZ