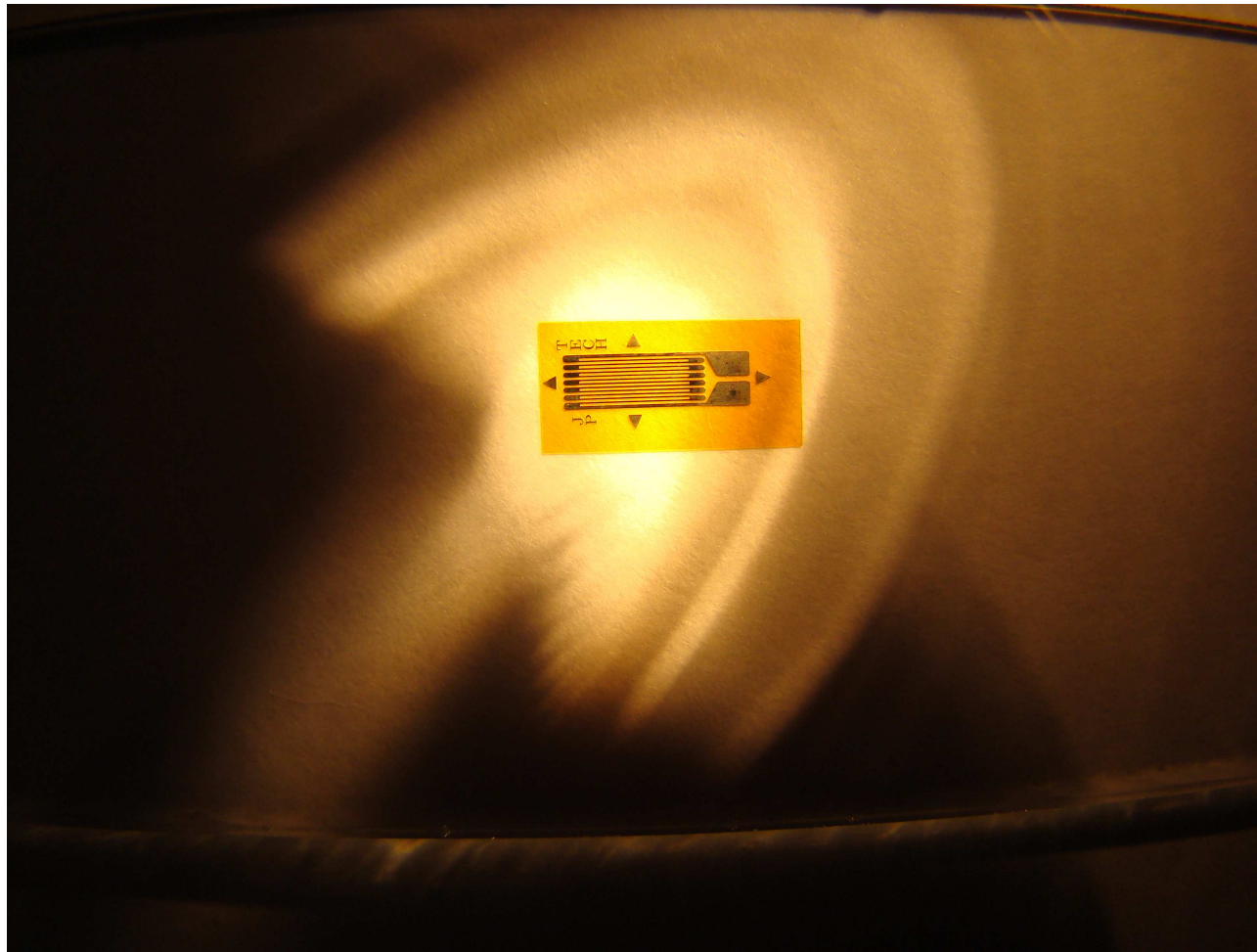


EXTENSOMETRIA



Prof. Edison da Rosa

Abril 2009

GRANTE / EMC / CTC / UFSC

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

EXTENSOMETRIA

PROGRAMAÇÃO DO CURSO

1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

2 - REVISÃO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

3 - PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

4 - EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA VARIÁVEL

5 - USO DE SG NA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

6 - USO DE SG EM TRANSDUTORES

7 - APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

CARGA HORÁRIA	QUINTA	SEXTA	SÁBADO
2 h	AULA 1	AULA 3	AULA 5
2 h	AULA 2	AULA 4	AULA 6
2 h			AULA 7

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 – INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

Métodos para a análise de tensões

- Métodos analíticos
 - Métodos numéricos
 - Métodos experimentais
-

Métodos para a análise experimental de tensões

- Definição
 - Métodos de campo
 - Métodos pontuais
-

Métodos de campo

- Foto-elasticidade
 - Moiré
 - Holografia
 - Revestimentos frágeis
 - Emissão térmica
 - Outros
-

Métodos pontuais

- Extensometria
 - Emissão térmica
-

Aplicações

- Análise de tensões
 - Transdutores de carga
 - Transdutores de deslocamento
 - Acoplamento ESA com FEA
 - Outras aplicações
-

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 2 – REVISÃO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

Definição de deformação

- Definição da teoria de pequenos deslocamentos
 - Deformação nominal, de engenharia
 - Deformação real
-

Relações entre os campos de tensões e deformações

- Solução elástica para deformações
 - Solução elástica para tensões
 - Círculo de Mohr para tensão e deformação
-

Estado plano de deformações

- Solução para deformações
 - Solução para tensões
-

Estado plano de tensões

- Solução para deformações
 - Solução para tensões
 - Círculo de Mohr
-

Efeito de concentração de tensão

- Definição elástica
 - Gradiente de tensões
 - Solução no campo plástico
-

Efeito de deformações plásticas

- Definição de deformação plástica
 - Modelos de curvas tensão-deformação
 - Modelos de tensão residual
-

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 3 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

Histórico e princípios da extensometria

Tipos de extensômetros

Medida de alongamento

Extensômetros mecânicos

Extensômetros óticos

Extensômetros pneumáticos

Extensômetros capacitivos

Extensômetros indutivos

Extensômetros de fio vibrante

Medida de deformação

Extensômetros elétricos

Extensômetros piezoresistivos

Extensômetros óticos

Extensômetros "surface acoustic waves"

Outros tipos de extensômetros

Tipos de extensômetros de resistência elétrica

Metálico de fio

Metálico de lâmina, foil

Semicondutor

Depositado

Micro / nano fabricado

Aplicações

Análise de tensões

Transdutores de carga

Transdutores de deslocamento

Acelerômetros

Outras aplicações

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Resistência elétrica e resistividade

Definição

Lei de Ohm

Efeitos sobre a resistência elétrica

Dados de resistividade TCR e TCL para alguns materiais

Efeitos sobre o TCR para o cobre e constantan

Medida de resistência a dois fios

Medida de resistência a quatro fios, Kelvin

Circuitos R série, paralelo

Divisor de tensão

Extensômetro elétrico de resistência variável

Princípio de funcionamento

Modelos fabricados

Tipos de SG elétricos

Características elétricas e mecânicas de um SG

Efeito da temperatura

Ponte de Wheatstone

Equação geral da PW

Linearização para pequenas perturbações

Tipos de PW, 1/4, 1/2, 1/4 + 1/4, 4/4

Compensação de temperatura

Dummy

Auto compensação

Compensação campo magnético

Alimentação DC, AC, V, I, Anderson loop

Capacidade de dissipação térmica

Circuitos de zeragem

Calibração shunt

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG NA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

Campo de tensões e deformações

- Solução elástica para deformações
 - Solução elástica para tensões
 - Círculo de Mohr para tensão e deformação
-

Estado plano de tensões

- Solução para deformações
 - Solução para tensões
 - Círculo de Mohr
 - Casos de tensões ou deformações proporcionais
-

Deformações em direções arbitrárias

- Formulação geral
 - Direção de deformação zero, estado uniaxial de tensões
 - Direção de deformação zero, estado biaxial de tensões
-

Estudo de casos

- Formulação para $1/4$, $1/2$, $1/4 + 1/4$, $4/4$
 - Tração
 - Flexão
 - Cisalhamento
 - Torção
-

Análise de rosetas

- Roseta 0-90
 - Roseta ± 45
 - Roseta 0-45-90
 - Roseta 0-60-120
 - Exemplo
-

Estudo de tensões residuais

- Método do furo cego
 - Controle de qualidade
-

Planejamento do ensaio de AExT

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

Requisitos para transdutores

- Tipos de SG
 - Tipos de adesivos
 - Fiação
 - Calibração
-

Transdutores de carga, célula de carga

- Requisitos específicos
 - Tipos de célula de carga, geometria
 - Tração / compressão
 - Flexão
 - Cisalhamento
 - Torção
-

Transdutores de deslocamento, clip gages

- Requisitos específicos
 - Formulação
 - Tipos de clip gages
-

Circuitos de compensação

- Compensação de zero
 - Compensação de span
-

Tipos de célula de carga, circuito da ponte

- Tração / compressão
 - Flexão
 - Cisalhamento / Torção
 - Célula de carga de seis eixos
-

Outros tipos de transdutores

- Aceleração
 - Temperatura
 - Fadiga
-

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – INSTRUMENTAÇÃO E APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

Instrumentação

- Configuração geral de um SCAD
- Circuitos de zeragem
- Amplificação
- Multiplexação
- Conversão AD
- Padrões de comunicação
- Sistemas comerciais de hardware e software

Análise de erro

- Fiação a 2, 3, 4 e 6 fios
- Alimentação
- Outros efeitos
- Metodologia de análise de erros

Seleção do SG e da instrumentação

- Escolha do tipo de SG para uma dada aplicação
- Escolha das características da ponte
- Escolha da fiação, tabela AWG

Aplicação de SG

- Escolha do local e orientação do SG
- Preparo do SG para aplicação
- Preparo do local de aplicação
- Preparo da fiação
- Aplicação do SG
- Proteção da aplicação
- Verificação da qualidade da aplicação

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 – INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

Métodos para a análise de tensões

- Métodos analíticos
 - Métodos numéricos
 - Métodos experimentais
-

Métodos para a análise experimental de tensões

- Definição
 - Métodos de campo
 - Métodos pontuais
-

Métodos de campo

- Foto-elasticidade
 - Moiré
 - Holografia
 - Revestimentos frágeis
 - Emissão térmica
 - Outros
-

Métodos pontuais

- Extensometria
 - Emissão térmica
-

Aplicações

- Análise de tensões
 - Transdutores de carga
 - Transdutores de deslocamento
 - Acoplamento ESA com FEA
 - Outras aplicações
-

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.1 - MÉTODOS PARA A ANÁLISE DE TENSÕES

A análise de tensões está baseada nas hipóteses:

Equilíbrio entre as cargas externas e solicitações internas
Equilíbrio entre solicitações internas e resultante das tensões
Relações entre o campo de deslocamentos e as deformações
Relações entre deformações e as tensões no material

Métodos analíticos da análise de tensões

Teoria da elasticidade
Solução exata

Métodos numéricos da análise de tensões

Colocação
Diferenças finitas
Elementos finitos
Volumes finitos
Outros

Métodos experimentais de análise de tensões

Foto-elasticidade
Moiré
Holografia
Revestimentos frágeis
Emissão térmica
Extensometria
Outros

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 – INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.2 – MÉTODOS PARA A ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

Definição

Uso de um modelo ou protótipo da peça, ou equipamento, para realizar medidas de grandezas que podem ser relacionadas com o nível de tensão no material.

Segundo Durelli:

“A experiência mostra que nos casos práticos, com muito poucas exceções, os esforços máximos ocorrem na superfície do material.”

Métodos de campo

Fornecem informações gerais sobre o problema.
Facilitam a visualização.
Podem ser usados em conjunto com métodos pontuais.

Métodos pontuais

Os dados são localizados. Podem ter maior precisão.
Em geral de operação mais simples que os métodos de campo.
Necessita conhecimento prévio dos pontos a instrumentar.

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

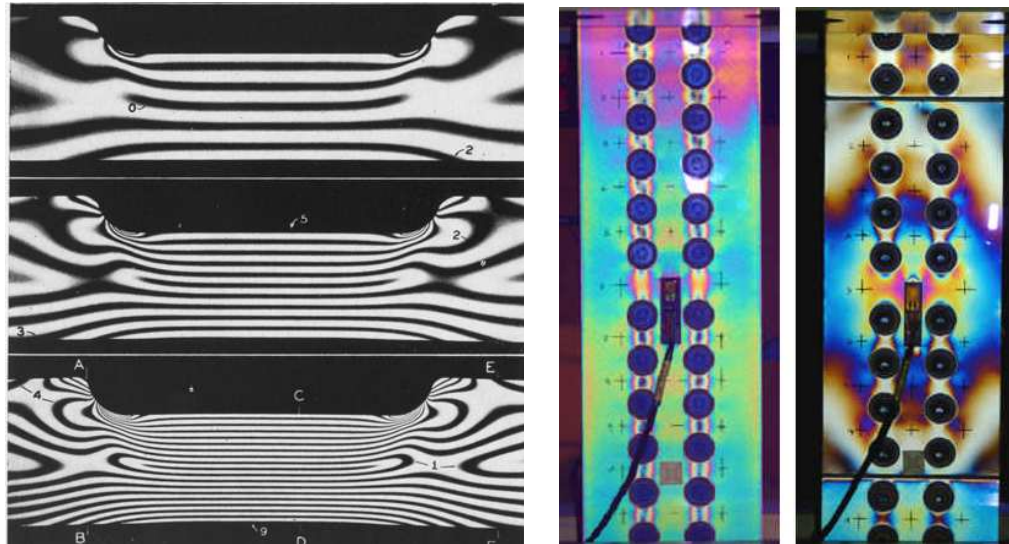
1.3 - MÉTODOS DE CAMPO

Foto-elasticidade

Método por transmissão.

Método por reflexão.

Sensibilidade à tensão cisalhante.



Ensaio de modelo sob flexão.

Comparação de estrutura em compósito e metálica.

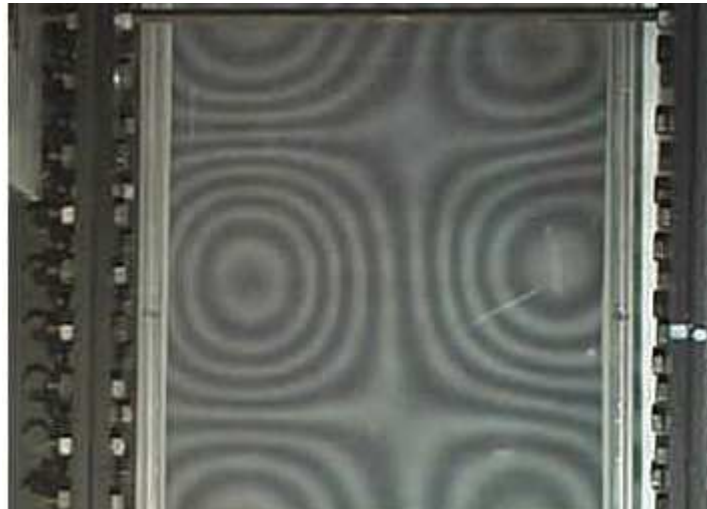
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.3 - MÉTODOS DE CAMPO

Moiré

Franjas de interferência como lugar geométrico de pontos com igual deslocamento.



Holografia

Princípio similar ao método de Moiré, porém com maior resolução.

Revestimentos frágeis

Ruptura do revestimento com um valor crítico de deformação. Sensibilidade à tensão principal máxima.

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.3 - MÉTODOS DE CAMPO

Emissão térmica

Medida do campo de temperatura na superfície.
Calor gerado pela histerese do material.
Sensibilidade à tensão equivalente.

Equipamento foto-elasticidade de reflexão

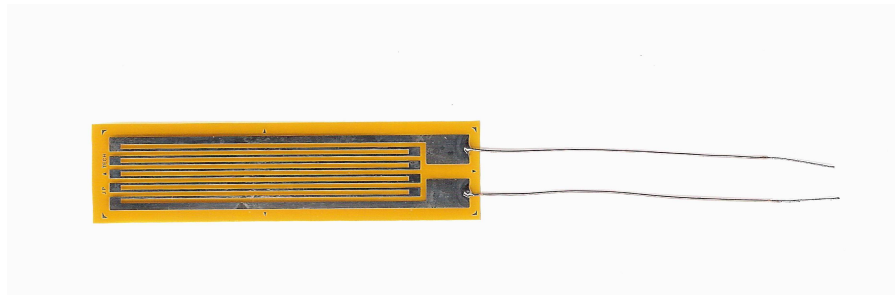


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

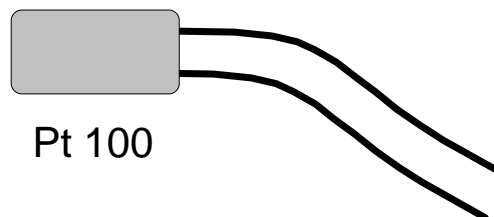
AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.4 - MÉTODOS PONTUAIS

Extensometria



Emissão térmica



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.5 - APLICAÇÕES

Acompanhamento de ensaio destrutivo



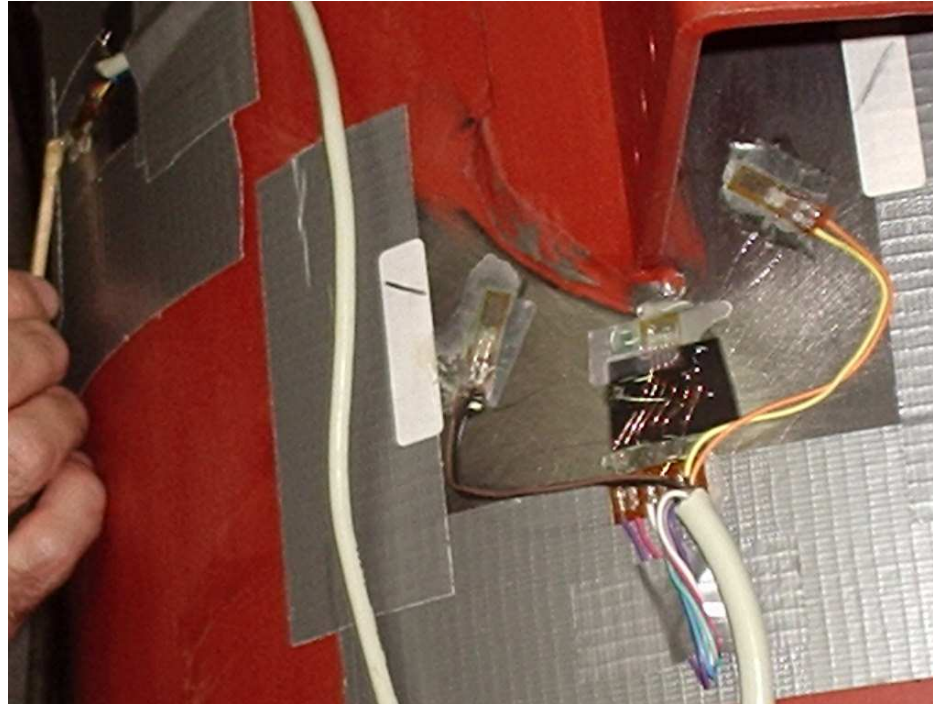
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.5 - APLICAÇÕES

Continuação

Análise de tensões



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.5 - APLICAÇÕES

Continuação

Análise de tensões



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.5 - APLICAÇÕES

Continuação

Transdutores de carga



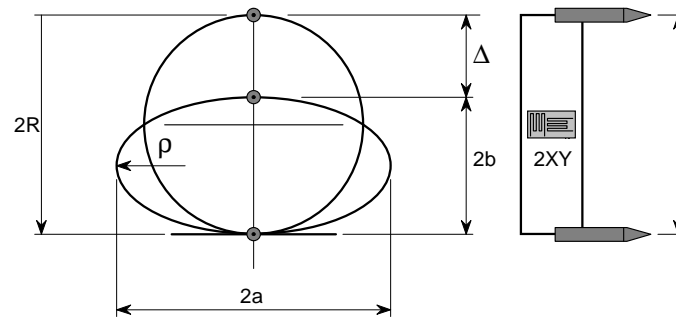
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.5 - APLICAÇÕES

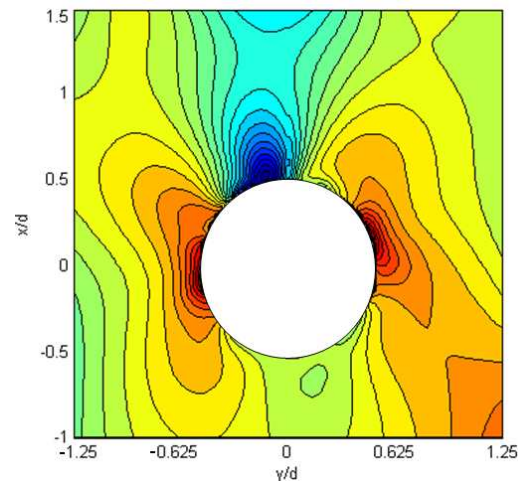
Continuação

Transdutores de deslocamento



$$\varepsilon = \frac{h}{2R} \cdot \frac{6x - x^2}{4 - 4x + x^2} = \frac{h}{2R} \cdot f(x); \quad x = \frac{\Delta}{R}$$

Acoplamento ESA com FEA



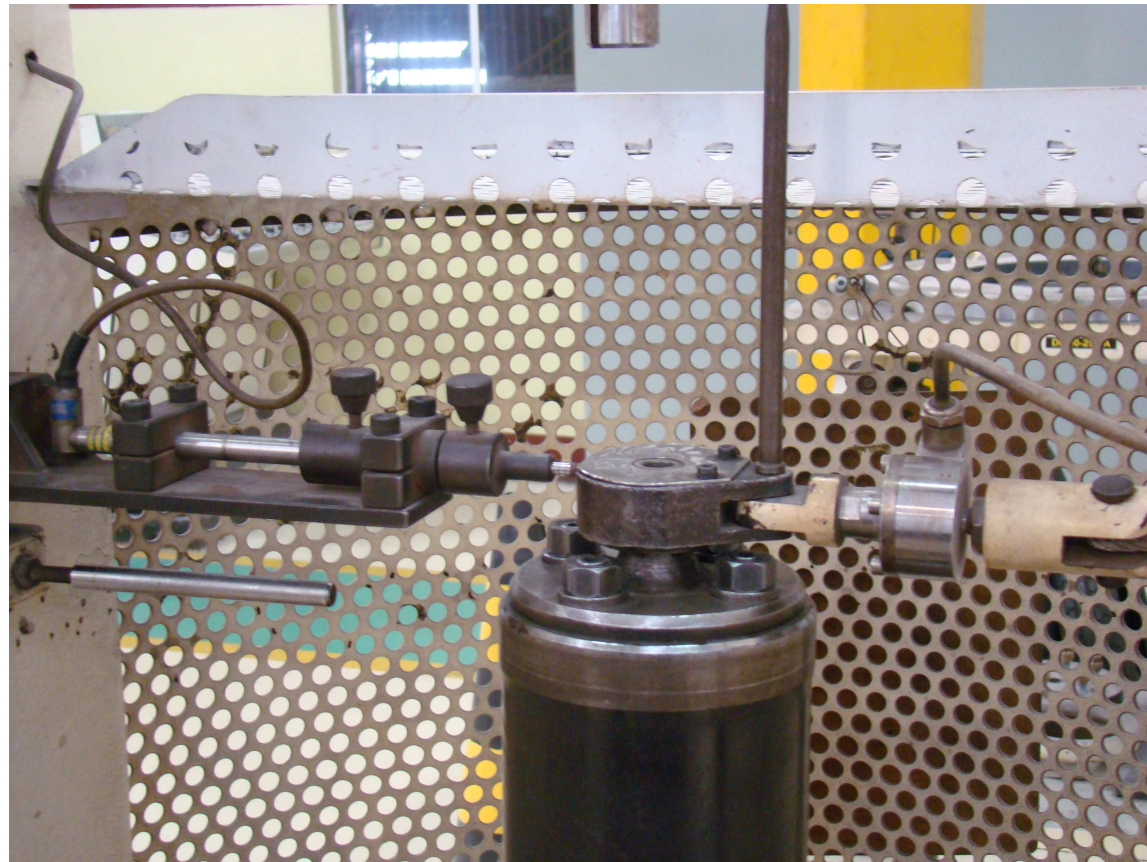
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.5 - APLICAÇÕES

Continuação

Outras aplicações



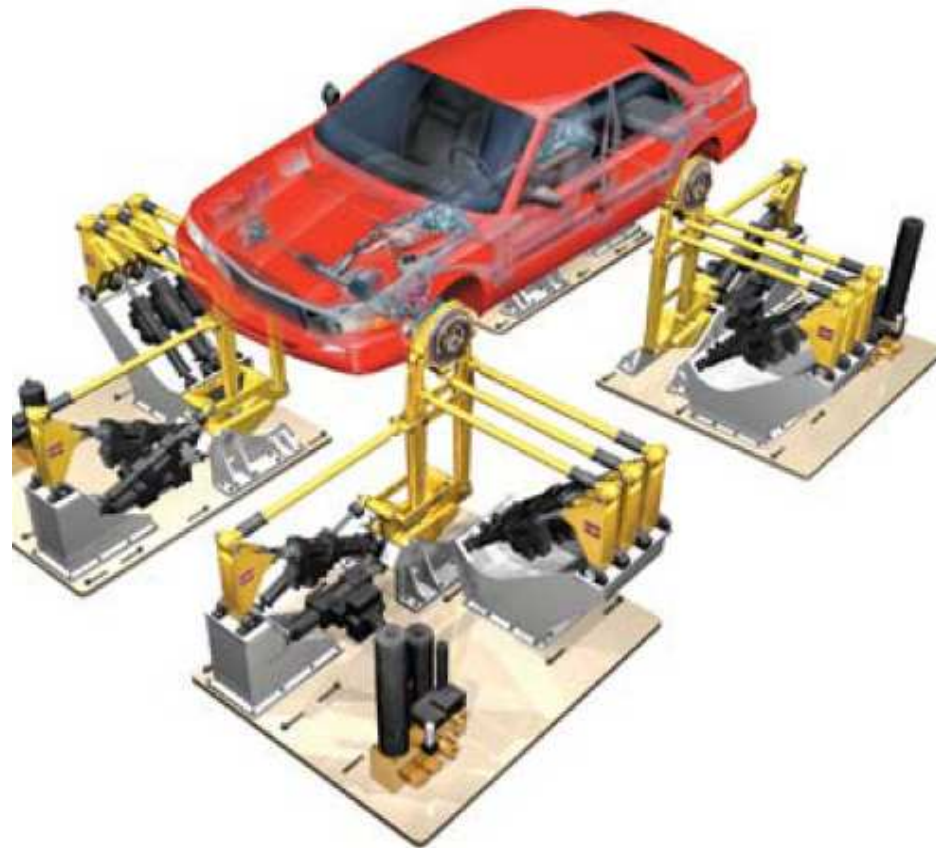
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 1 - INTRODUÇÃO À ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

1.5 - APLICAÇÕES

Continuação

Outras aplicações



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 2 – REVISÃO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

Definição de deformação

- Definição da teoria de pequenos deslocamentos
- Deformação nominal, de engenharia
- Deformação real

Relações entre os campos de tensões e deformações

- Solução elástica para deformações
- Solução elástica para tensões
- Círculo de Mohr para tensão e deformação

Estado plano de deformações

- Solução para deformações
- Solução para tensões

Estado plano de tensões

- Solução para deformações
- Solução para tensões
- Círculo de Mohr

Efeito de concentração de tensão

- Definição elástica
- Gradiente de tensões
- Solução no campo plástico

Efeito de deformações plásticas

- Definição de deformação plástica
- Modelos de curvas tensão-deformação
- Modelos de tensão residual

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 2 - REVISÃO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

2.1 - DEFINIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

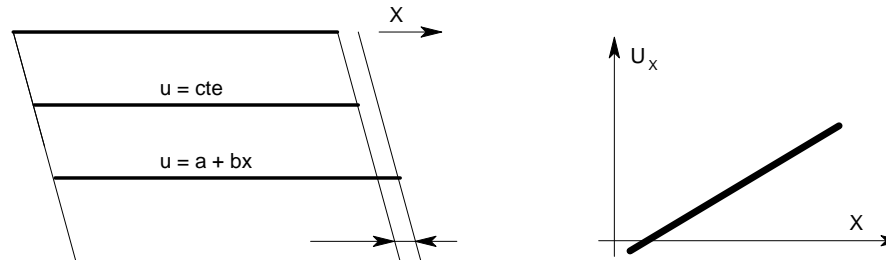
Definição da teoria de pequenos deslocamentos

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]; \quad \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right] = \frac{1}{2} \gamma_{xy}$$

$$de = \frac{dV}{V}; \quad e = \ln \frac{V}{V_0}; \quad e = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$$

Caso uniaxial para a teoria de pequenos deslocamentos



$$u_x = a + bx$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} 2 \frac{\partial u_x}{\partial x} = b$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 2 - REVISÃO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

2.1 - DEFINIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

Continuação

Deformação nominal, de engenharia

Para pequenos deslocamentos:

$$d\varepsilon_0 = \frac{d\ell}{\ell_0}; \quad \varepsilon_0 = \int_{\ell_0}^{\ell} d\varepsilon_0 = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0}$$

Deformação real

Para grandes deslocamentos:

$$d\varepsilon = \frac{d\ell}{\ell}; \quad \varepsilon = \int_{\ell_0}^{\ell} d\varepsilon = \ln(\ell/\ell_0)$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 2 - REVISÃO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

2.2 - RELAÇÕES ENTRE OS CAMPOS DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES

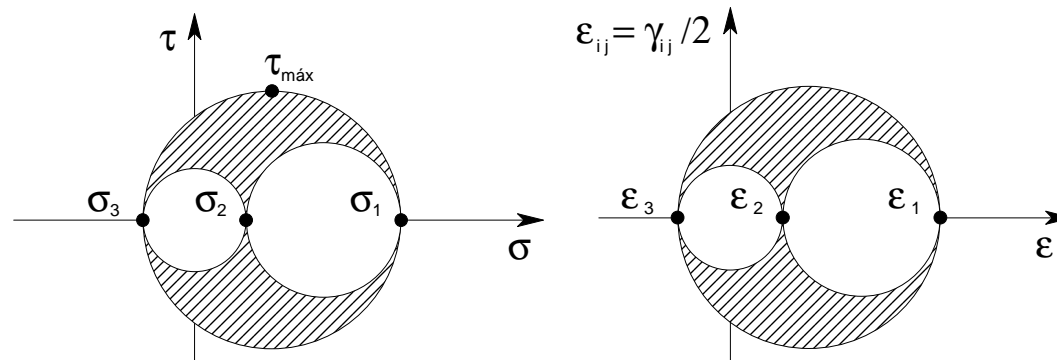
Solução elástica para deformações

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E} [\sigma_i - \nu (\sigma_j + \sigma_k)]; \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \sigma_{ij} (1 + \nu)$$

Solução elástica para tensões

$$\sigma_i = \frac{E}{1 + \nu} \left[\varepsilon_i + \nu \frac{\varepsilon_j + \varepsilon_k}{1 - 2\nu} \right]; \quad \sigma_{ij} = \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon_{ij}$$

Círculo de Mohr para tensão e deformação



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 2 - REVISÃO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

2.3 - ESTADO PLANO DE DEFORMAÇÕES

Solução para tensões

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [\varepsilon_x + \nu (\varepsilon_y - \varepsilon_x)]$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [\varepsilon_y + \nu (\varepsilon_x - \varepsilon_y)]$$

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y)$$

Solução para deformações

$$\varepsilon_z = 0; \quad \gamma_{xz} = 0; \quad \gamma_{yz} = 0$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu \sigma_y] \quad ; \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu \sigma_x] \quad ; \quad e = \varepsilon_x + \varepsilon_y$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 2 - REVISÃO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

2.4 - ESTADO PLANO DE TENSÕES

Estado plano de tensões

É o estado de tensões que ocorre na grande maioria dos problemas de análise experimental de tensões. No caso da extensometria é a totalidade dos casos.

$$\sigma_z = 0; \quad \sigma_{xz} = 0; \quad \sigma_{yz} = 0$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_z + e \frac{\nu}{1-2\nu} \right] = 0$$

Solução para deformações

$$\varepsilon_z = -e \frac{\nu}{1-2\nu}$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y)$$

$$e = \frac{1-2\nu}{1-\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y)$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 2 - REVISÃO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

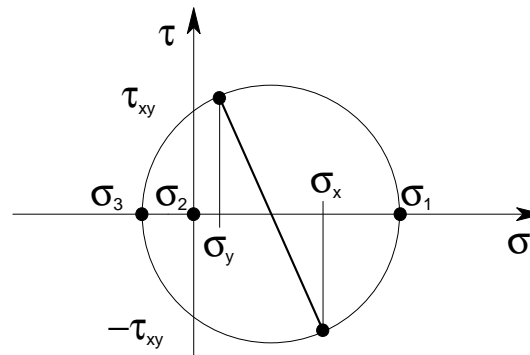
2.4 - ESTADO PLANO DE TENSÕES

Solução para tensões

$$\sigma_i = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_i + \nu \epsilon_j)$$

$i, j = X, Y$ ou $i, j = 1, 2$

Círculo de Mohr



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 2 - REVISÃO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

2.5 - EFEITO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

Definição elástica

$$\sigma_{MÁX} = \sigma_0 K_t$$

Gradiente de tensões

$$G = \frac{1}{\sigma_{MÁX}} \frac{\partial \sigma_Y}{\partial X}$$

$$G = \frac{C}{\rho} = \frac{1}{X_0}$$

$$X_0 \approx \frac{\rho}{3}$$

Solução no campo plástico

Regra de Neuber generalizada

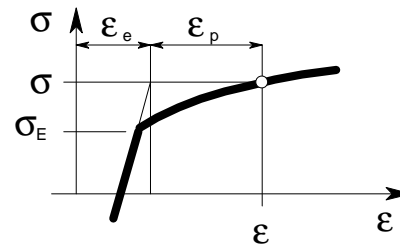
$$\left(\frac{K_\sigma}{K_t} \right)^n \left(\frac{K_\epsilon}{K_t} \right) = 1$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

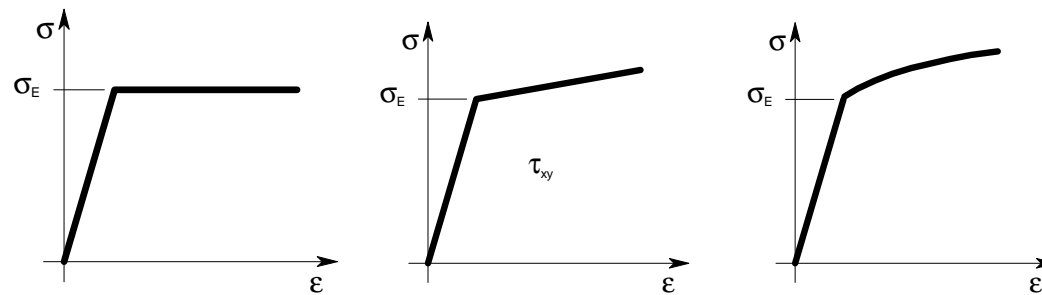
AULA 2 - REVISÃO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

2.6 - EFEITO DE DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS

Definição de deformação plástica



Modelos de curvas tensão-deformação



Modelos de tensão residual

$$\sigma_r \approx \sigma_E - \sigma_{elástico}; \quad \sigma_{elástico} \leq 2\sigma_E$$

$$\sigma_r = \sigma_0(K_\sigma - K_t); \quad K_\sigma \leq K_t$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_0(K_\varepsilon - K_t); \quad K_\varepsilon \geq K_t$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 3 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

Histórico e princípios da extensometria

Tipos de extensômetros

Medida de alongamento

Extensômetros mecânicos

Extensômetros óticos

Extensômetros pneumáticos

Extensômetros capacitivos

Extensômetros indutivos

Extensômetros de fio vibrante

Medida de deformação

Extensômetros elétricos

Extensômetros piezoresistivos

Extensômetros óticos

Extensômetros "surface acoustic waves"

Outros tipos de extensômetros

Tipos de extensômetros de resistência elétrica

Metálico de fio

Metálico de lâmina, foil

Semicondutor

Depositado

Micro / nano fabricado

Aplicações

Análise de tensões

Transdutores de carga

Transdutores de deslocamento

Acelerômetros

Outras aplicações

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

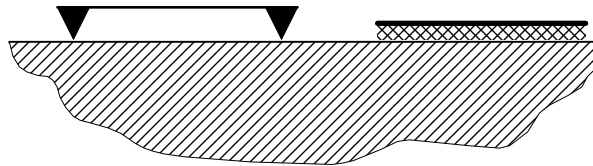
AULA 3 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

3.1 – HISTÓRICO E PRINCÍPIOS DA EXTENSOMETRIA

Tipos de extensômetros

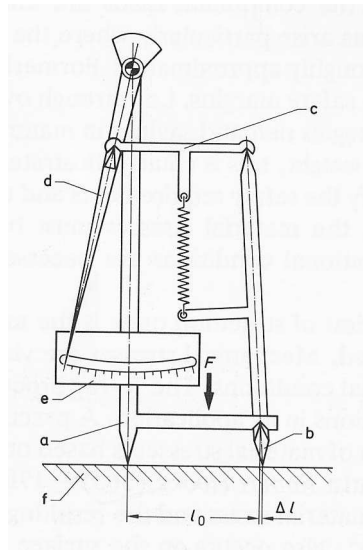
Baseados na medida do deslocamento relativo entre dois pontos.

Baseados na deformação de um elemento sensível, aderente à superfície do material.



Medida de alongamento

Extensômetros mecânicos



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 3 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

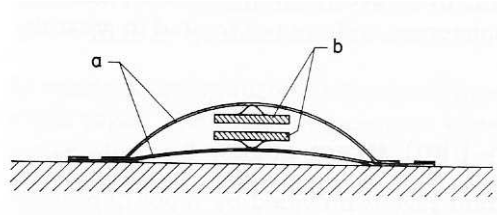
3.1 – HISTÓRICO E PRINCÍPIOS DA EXTENSOMETRIA

Medida de alongamento

Extensômetros óticos

Extensômetros pneumáticos

Extensômetros capacitivos



Extensômetros indutivos

Extensômetros de fio vibrante

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 3 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

3.1 – HISTÓRICO E PRINCÍPIOS DA EXTENSOMETRIA

Medida de deformação

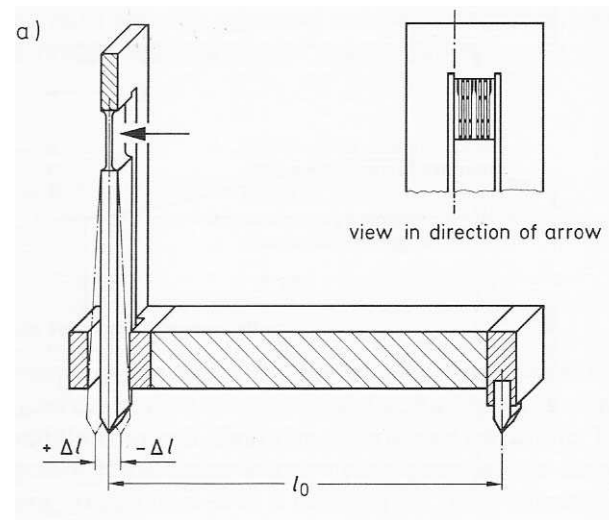
Extensômetros elétricos

Extensômetros piezoresistivos

Extensômetros óticos

Extensômetros "surface acoustic waves", RFID

Outros tipos de extensômetros

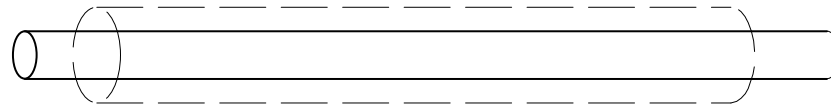


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 3 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

3.2 – TIPOS DE EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

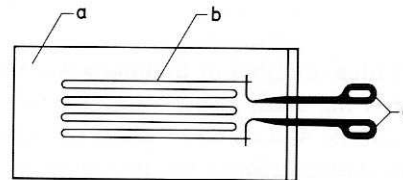
Princípio de operação



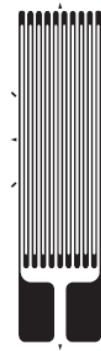
$$R = \frac{\rho l}{A}; \quad \frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\frac{dR}{R} = \epsilon (1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho}$$

Metálico de fio



Metálico de lâmina, foil

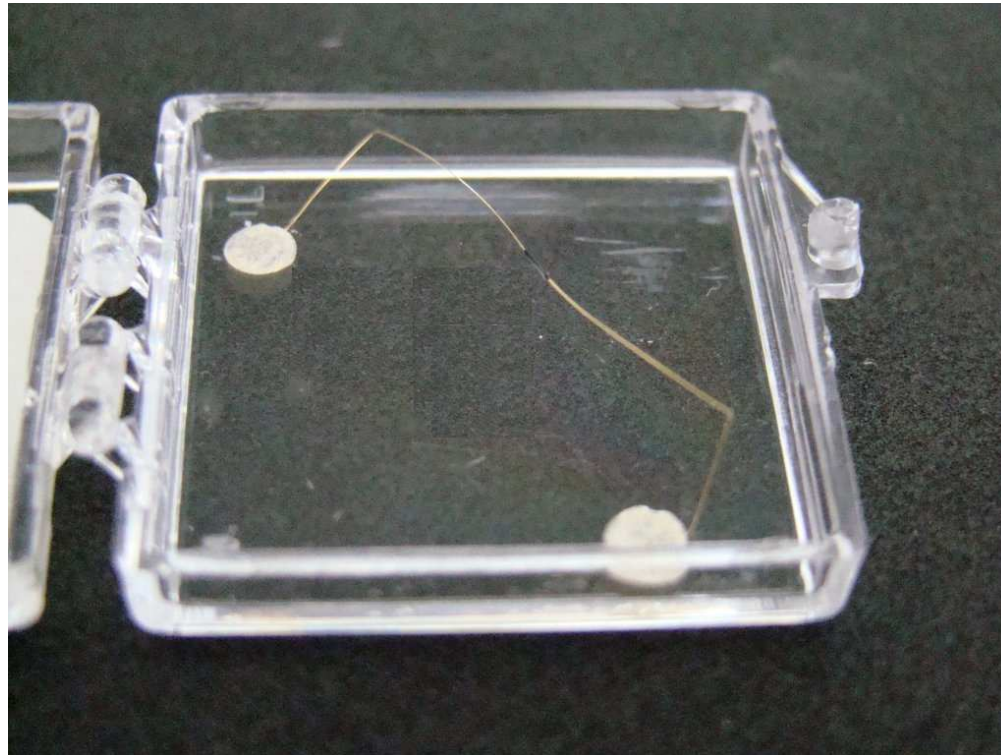


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 3 - PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

3.2 - TIPOS DE EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Semicondutor



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

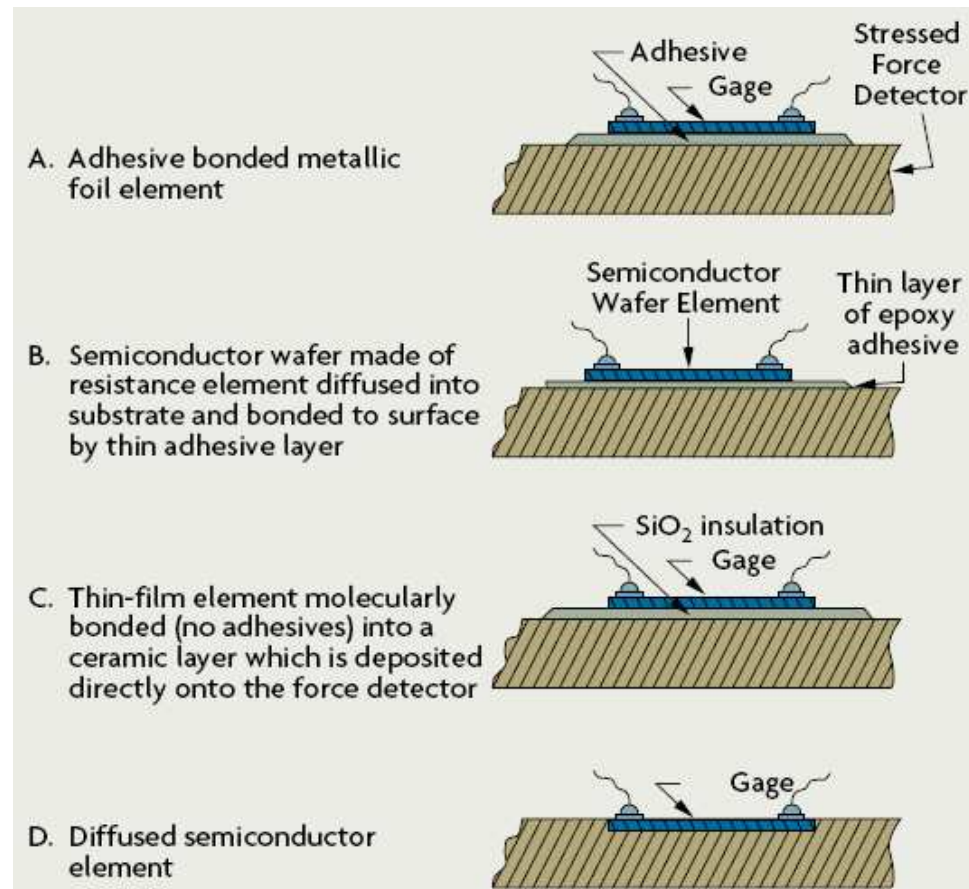
AULA 3 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

3.2 – TIPOS DE EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Outros

Depositado

Micro / nano fabricado

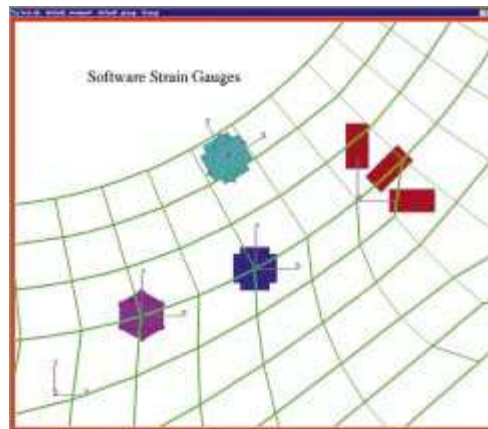


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

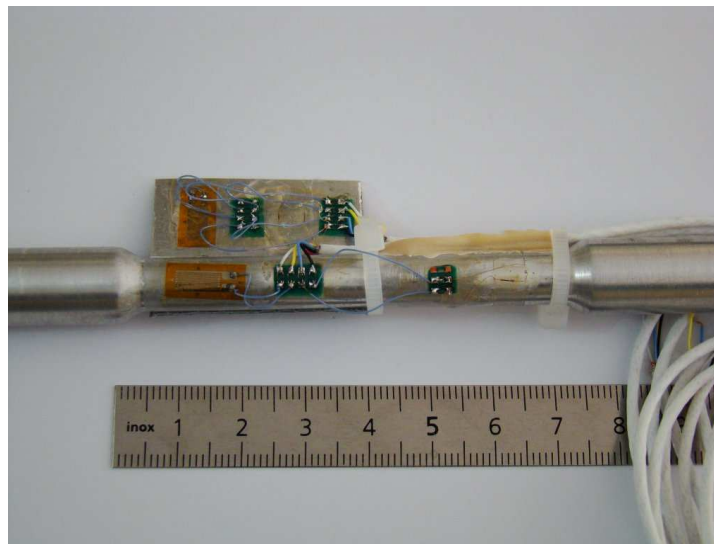
AULA 3 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

3.3 – APLICAÇÕES

Análise de tensões



Ensaio mecânicos

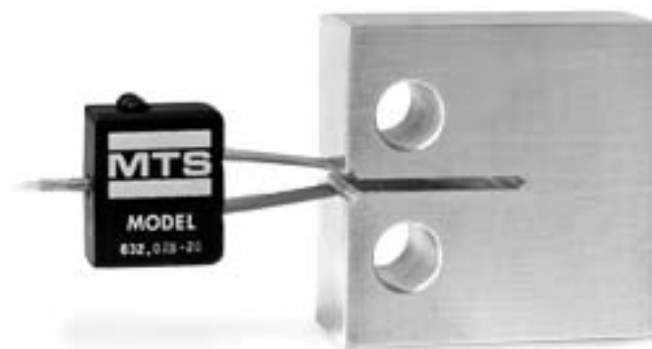


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 3 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

3.3 – APLICAÇÕES

Transdutores de deslocamento



Outras aplicações

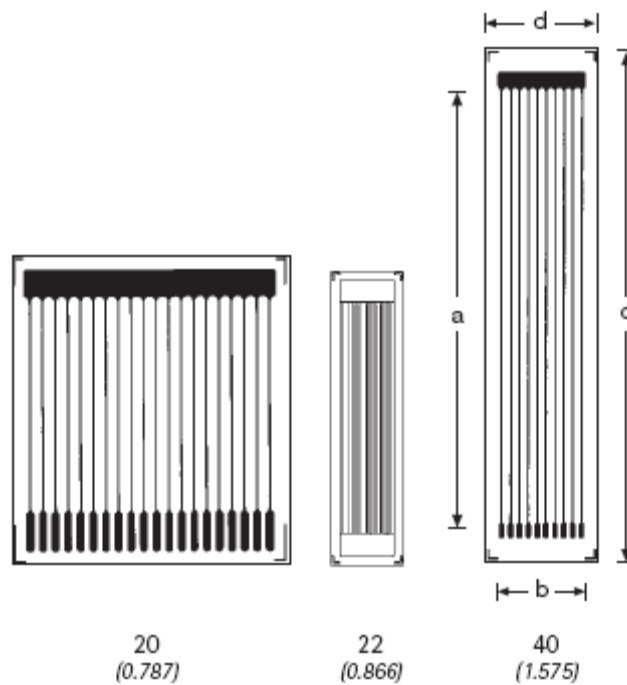


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 3 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

3.3 – APLICAÇÕES

Outras aplicações



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Resistência elétrica e resistividade

Definição

Lei de Ohm

Efeitos sobre a resistência elétrica

Exemplo para o cobre

Dados de resistividade TCR e TCL para alguns materiais

Efeitos sobre o TCR para o constantan

Medida de resistência a dois fios

Medida de resistência a quatro fios, Kelvin

Circuitos R série, paralelo

Divisor de tensão

Extensômetro elétrico de resistência variável

Princípio de funcionamento

Modelos fabricados

Tipos de SG elétricos

Características elétricas e mecânicas de um SG

Efeito da temperatura

Ponte de Wheatstone

Equação geral da PW

Linearização para pequenas perturbações

Tipos de PW, 1/4, 1/2, 1/4 + 1/4, 4/4

Compensação de temperatura

Dummy

Auto compensação

Compensação campo magnético

Alimentação DC, AC, V, I, Anderson loop

Capacidade de dissipação térmica

Circuitos de zeragem

Calibração shunt

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE

Resistividade:

$$R = \frac{\rho \ell}{A}; \quad \rho = \frac{R A}{\ell}$$

Referência, cobre a 20°C, 100% IACS

$$\rho_{20} = 0,017241 \quad [\Omega \text{ mm}^2/\text{m}]$$

Lei de Ohm

$$R = \frac{V}{I}; \quad V = I R; \quad I = \frac{V}{R}$$

Efeitos sobre a resistência elétrica

Temperatura

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \approx \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T}$$

Deformação

$$\frac{\Delta R}{R} = k \varepsilon; \quad k = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta R}{R}; \quad k \approx (2; 100)$$

Radiação

Campo magnético

Pressão hidrostática

Intensidade luminosa (semicondutor)

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE Continuação

Efeitos da temperatura sobre a resistência

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \approx \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T}$$

Exemplo para o cobre

$$\alpha_R = 0,003930 \text{ [K}^{-1}\text{]} ; 3930 \text{ ppm}$$

$$\rho_{20} = 0,017241 ; \quad \alpha_R = 3930 \text{ ppm}$$

$$\Delta T = 100 \text{ K}, \Delta R = 4\%$$

Fio típico para fiação de instrumentação.

Bitola AWG 22, diâmetro 0,64 mm, tem 0,053 Ω /m de resistência elétrica.

Aplicação com 10 m de distância, logo $R = 1,06 \Omega$.

Com 50°C de variação de temperatura, (7:00 AM / 1:00 PM), aumenta a resistência para $R = 1,08 \Omega$.

Isto corresponde a uma deformação aparente de 8,8E-5, ou uma tensão aparente de 17,7 MPa.

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE Continuação

Dados de resistividade TCR e TCL para alguns materiais

MATERIAL	ρ [Ω mm ² /m]	α_L - TCL [10E-6/K]	α_R - TCR [10E-6/K]	α_E - TCE [10E-6/K]
Aço		11,7		- 230
Aço Inox		17,3		
Alumínio		23,5		- 540
Cobre	0,0174	16,9	3930	
Níquel	0,11		5900	
Platina	0,10		3850	
Constantan	0,48	14,9	5	
Manganina	0,43		10	
NiCr 8020	1,30		100	

Efeitos sobre o TCR para o constantan

$$\alpha_R = 5 \text{ ppm}$$

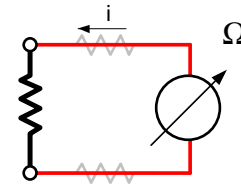
Com 50°C de variação de temperatura, aumenta a resistência de 0,025%, contra 2% para o caso do cobre.

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

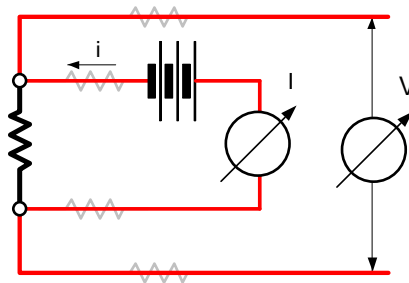
AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE Continuação

Medida de resistência a dois fios, ohmímetro, multímetro.

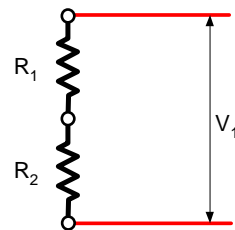


Medida de resistência a quatro fios, Kelvin

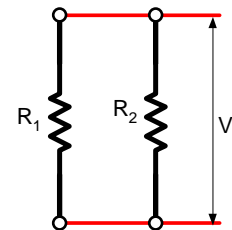


$$R = \frac{V}{I}$$

Circuitos R série, paralelo



$$R = R_1 + R_2$$



$$R^{-1} = R_1^{-1} + R_2^{-1}; \quad R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

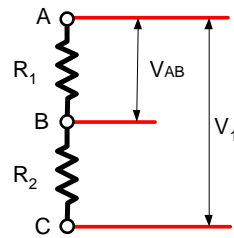
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

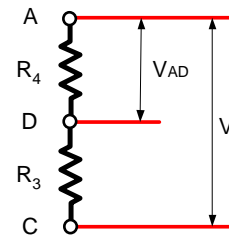
4.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE

Continuação

Divisor de tensão

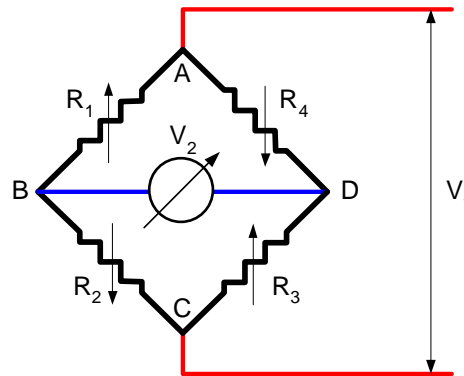


$$V_{AB} = V_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



$$V_{AD} = V_1 \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Ponte de Wheatstone



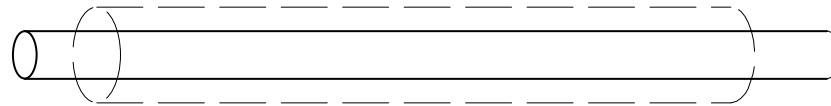
$$V_2 = V_{AB} - V_{AD} \quad V_2 = V_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_1 \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.2 – EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA VARIÁVEL

Princípio de funcionamento



$$R = \frac{\rho \ell}{A}; \quad \frac{dR}{R} = \frac{d\ell}{\ell} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\frac{dA}{A} = -2\nu \frac{d\ell}{\ell} + \nu^2 \left(\frac{d\ell}{\ell} \right)^2$$

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon (1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho}$$

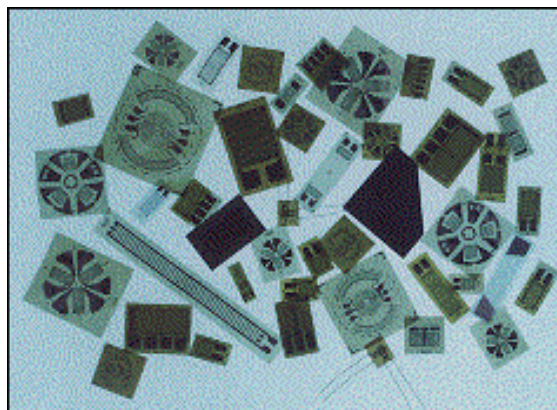
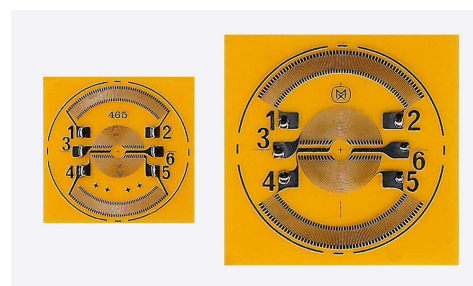
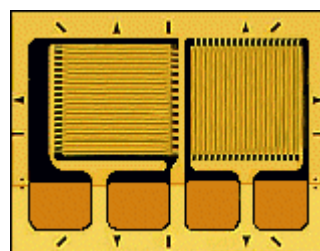
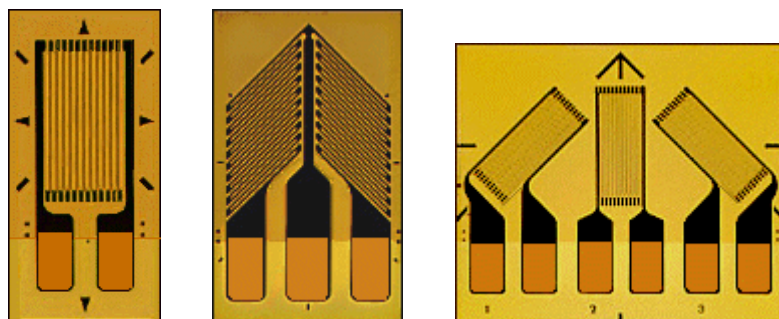
$$\frac{dR}{R} = k\varepsilon; \quad k = (1 + 2\nu) + \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\rho}{\rho}$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.2 – EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA VARIÁVEL

Modelos fabricados

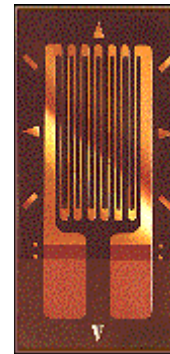
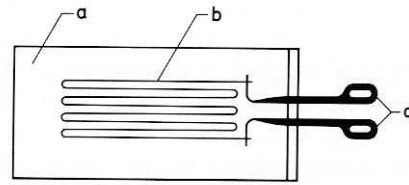


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

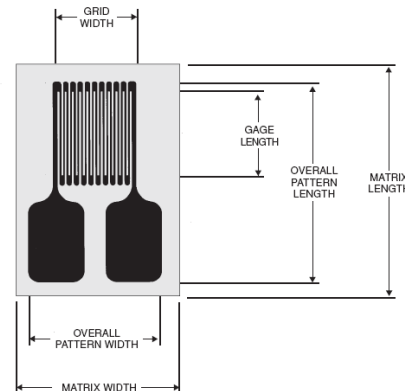
4.2 – EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA VARIÁVEL

Tipos de SG elétricos



Características elétricas e mecânicas de um SG

Dimensões e geometria



008CL			
		1X	6X
GAGE LENGTH	OVERALL LENGTH	GRID WIDTH	OVERALL WIDTH
0.008	0.080	0.010	0.068
0.20	2.03	0.25	1.73
MATRIX SIZE	0.20L x 0.13W		5.1L x 3.3W

Gage factor

Auto-compensação

Sensibilidade transversal

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Equação geral da PW

$$V_2 = V_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_1 \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Linearização para pequenas perturbações

$$R_i = R_g + \Delta R_i ; \quad \Delta R_i \cdot \Delta R_j \ll R_i$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right]$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{k}{4} [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4]$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

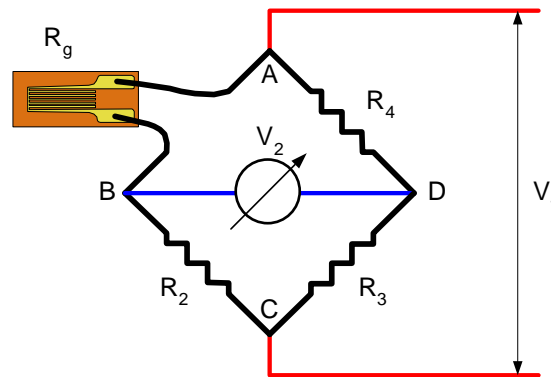
AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

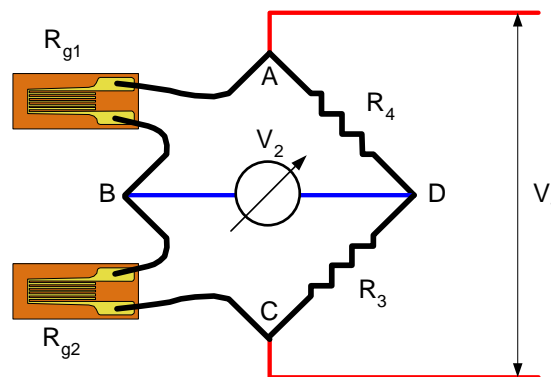
Continuação

Tipos de PW, 1/4, 1/2, 1/4 + 1/4, 4/4

Um quarto de ponte



Meia ponte



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

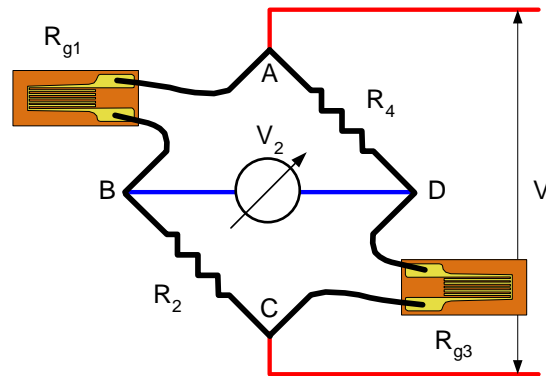
AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

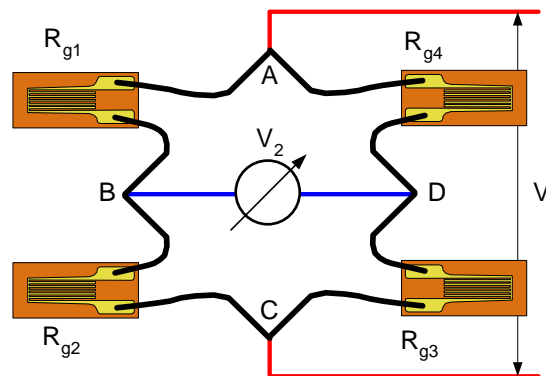
Continuação

Tipos de PW, 1/4, 1/2, 1/4 + 1/4, 4/4

Meia ponte diagonal ou 1/4 + 1/4



Ponte completa



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

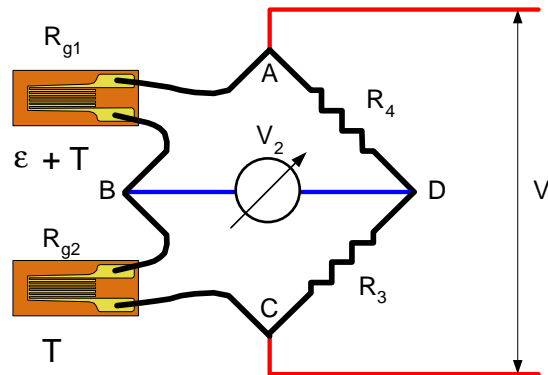
4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Continuação

Compensação de temperatura

Dummy

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{k}{4} [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4]$$



Para uma compensação perfeita os dois extensômetros devem ser idênticos, mesmo lote, bem como devem estar sujeitos à mesma temperatura, montado sobre uma parte não tensionada do material.

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

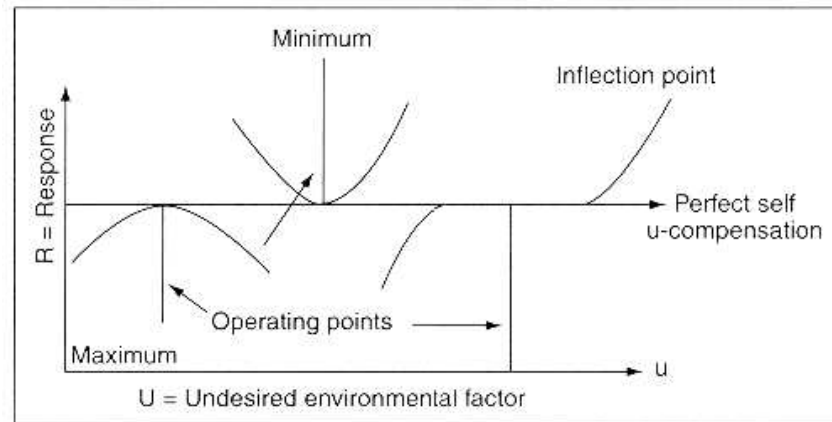
4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Continuação

Compensação de temperatura

Auto compensação

$$\left. \frac{dR}{R} \right|_{\Delta T} = (\alpha_{material} - \alpha_{gage}) k \Delta T + \alpha_R \Delta T$$



1	for ferritic steel	with $\alpha = 10.8 \cdot 10^{-6}/K$
3	for aluminum	with $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}/K$
5	for austenitic steel	with $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}/K$
6	for quartz	with $\alpha = 0.5 \cdot 10^{-6}/K$
7	for titanium/gray cast iron	with $\alpha = 9 \cdot 10^{-6}/K$
8	for plastic material	with $\alpha = 65 \cdot 10^{-6}/K$
9	for molybdenum	with $\alpha = 5.4 \cdot 10^{-6}/K$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

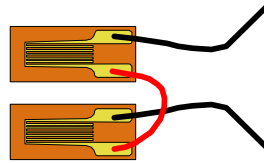
AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Continuação

Compensação campo magnético

Uso de dois extensômetros com sentido contrário da corrente.



A corrente induzida em um é anulada pelo outro.

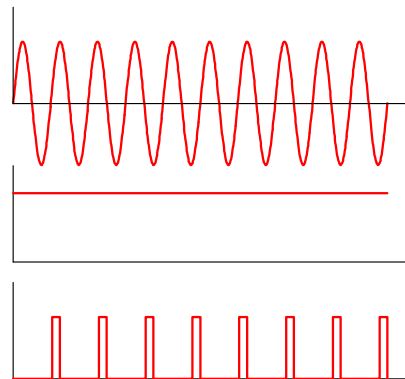
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

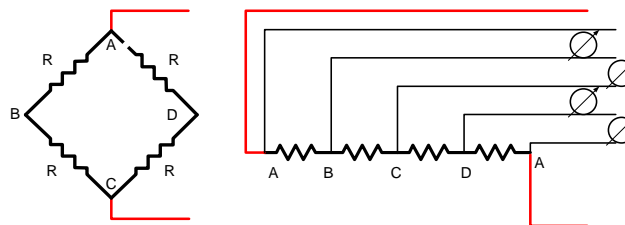
4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Continuação

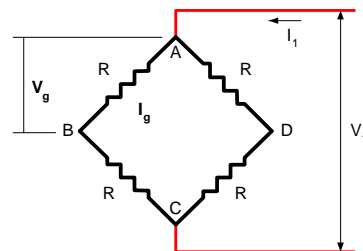
Alimentação: DC, AC, pulso de onda, V, I



Alimentação: laço de corrente (Anderson loop)



Efeito Joule no extensômetro



$$P = I \cdot V$$
$$P = I^2 \cdot R$$
$$P = V^2 / R$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

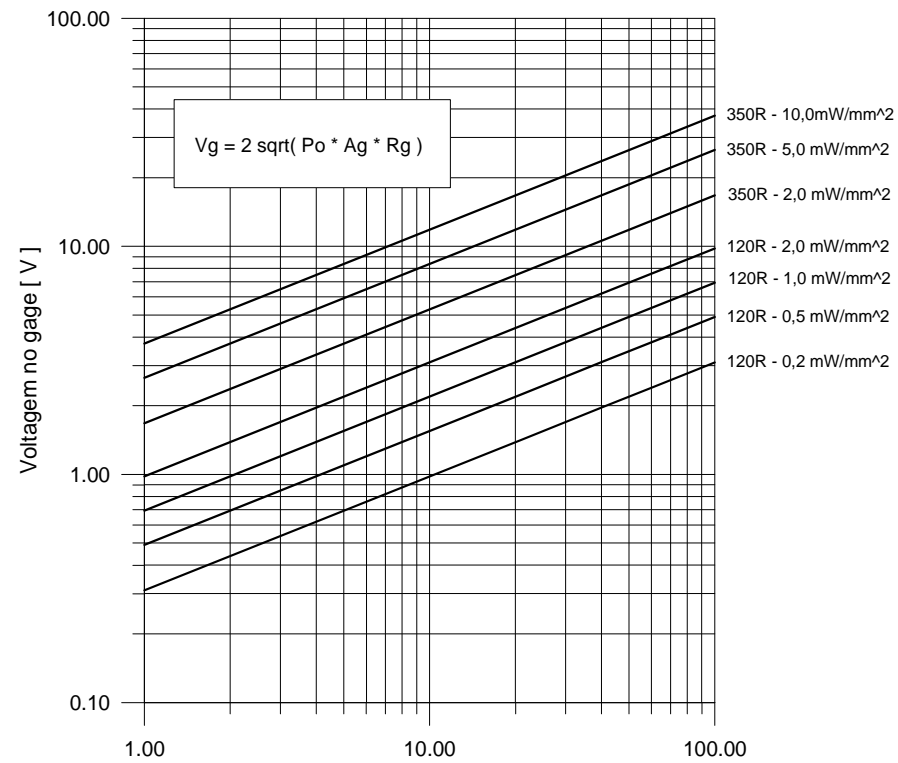
AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Continuação

Capacidade de dissipação térmica

$P_0: (0,01; 50,0) \text{ [mW / mm}^2\text{]}$



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Continuação

Capacidade de dissipação térmica

VALORES RECOMENDADOS DE POTÊNCIA DISSIPADA NA ÁREA DA GRADE.

CAPACIDADE DE DISSIPÇÃO TÉRMICA	EXEMPLO	POTÊNCIA DISSIPADA [mW / mm ²]
Excelente	Alumínio, cobre	3,0 a 8,0
Bom	Aço espesso	1,5 a 3,0
Razoável	Aço fino, titânio	0,5 a 1,0
Ruim	Plástico reforçado	0,15 a 0,30
Muito ruim	Plástico sem carga	0,016 a 0,03

Referência: Micro Measurements TN 502

Os valores tabelados são para medidas estáticas. Se forem solicitações dinâmicas, a potência pode ser até 5 vezes maior.

Os valores são para medidas de precisão, com alta estabilidade térmica. Para medidas de moderada precisão, multiplicar por 2. Para medidas de baixa precisão, os valores tolerados de potência dissipada pode ser 5 vezes maior que o tabelado.

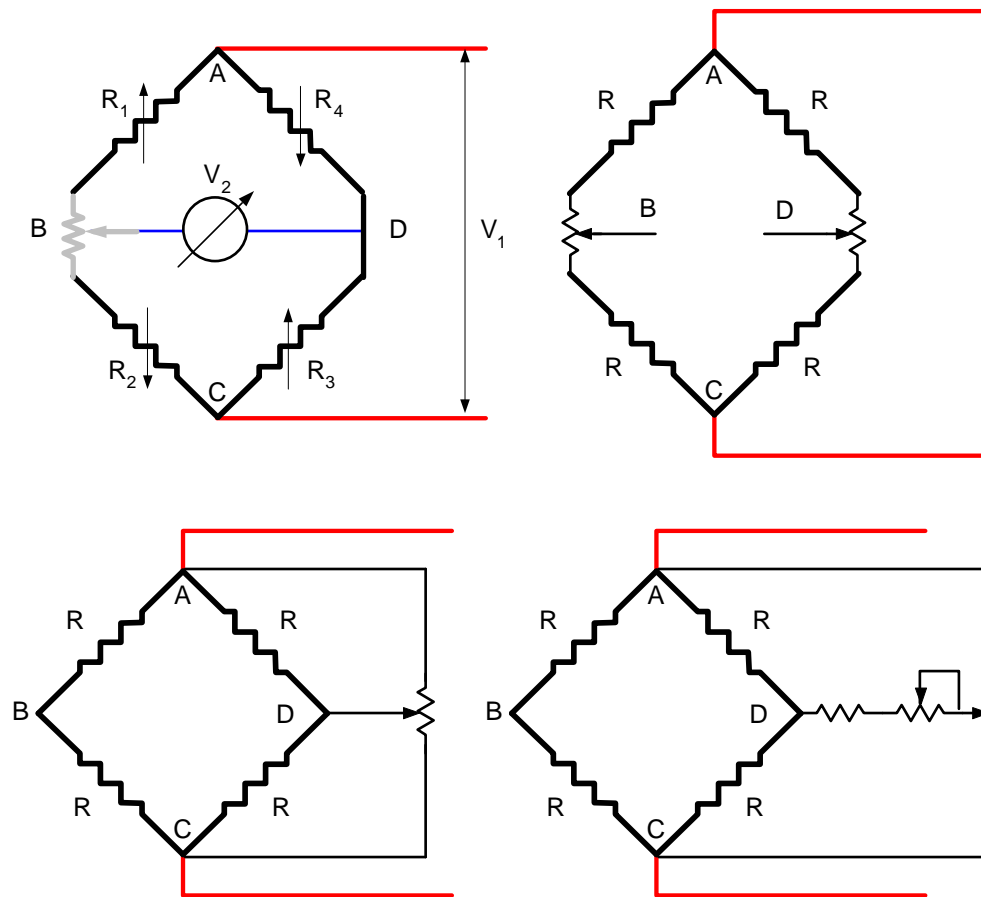
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Continuação

Circuitos de zeragem



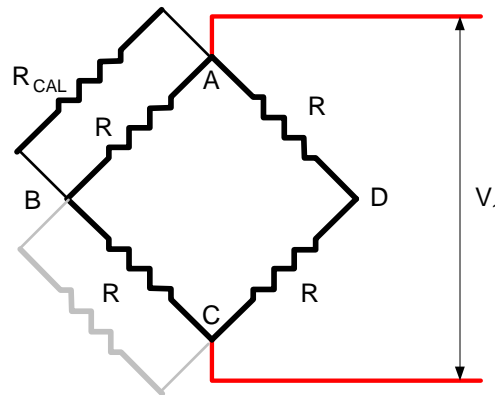
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Continuação

Calibração shunt



$$R = \frac{R_g R_{CAL}}{R_g + R_{CAL}}; \quad \Delta R = R - R_g$$

$$\frac{\Delta R}{R_g} = \frac{R_{CAL}}{R_g + R_{CAL}} - 1 = -\frac{R_g}{R_g + R_{CAL}}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon = -\frac{R_g}{R_g + R_{CAL}}; \quad \varepsilon = -\frac{1}{k} \frac{1}{1 + R_{CAL}/R_g}$$

Exemplo:

$$R_{CAL} = R_g \left[\frac{1}{k\varepsilon} - 1 \right]; \quad k = 2; \quad \varepsilon = 10^{-3}; \quad R_{CAL} = 499 \cdot R_g$$

$$R_g = 120 \, \Omega; \quad R_{CAL} = 59\,880 \, \Omega \quad R_g = 350 \, \Omega; \quad R_{CAL} = 174\,650 \, \Omega$$

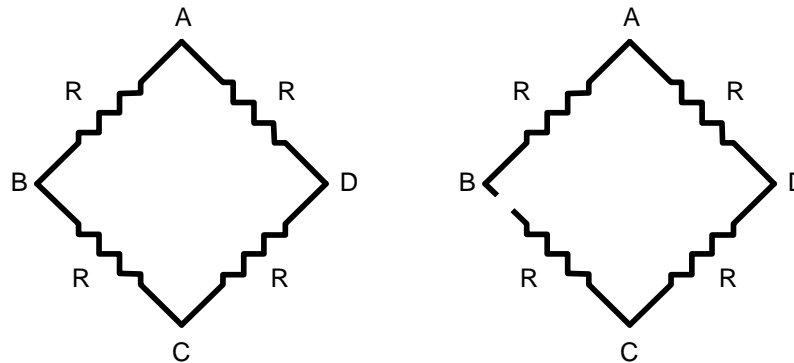
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 4 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

4.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Continuação

Verificação da ponte



Ponte fechada

$$R_{AC} = R_{BD} = R_g ; R_{AB} = R_{BC} = R_{CD} = R_{DA} = \frac{3}{4}R_g$$

Ponte aberta

$$R_{AC} = R_{BD} = 2R_g ; R_{IJ} = 3R_g ; R_{IJ} = R_g$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

Campo de tensões e deformações

- Solução elástica para deformações
 - Solução elástica para tensões
 - Círculo de Mohr para tensão e deformação
-

Estado plano de tensões

- Solução para deformações
 - Solução para tensões
 - Círculo de Mohr
 - Casos de tensões ou deformações proporcionais
-

Deformações em direções arbitrárias

- Formulação geral
 - Direção de deformação zero, estado uniaxial de tensões
 - Direção de deformação zero, estado biaxial de tensões
-

Estudo de casos

- Formulação para $1/4$, $1/2$, $1/4 + 1/4$, $4/4$
 - Tração
 - Flexão
 - Cisalhamento
 - Torção
-

Análise de rosetas

- Roseta 0-90
 - Roseta ± 45
 - Roseta 0-45-90
 - Roseta 0-60-120
 - Exemplo
-

Estudo de tensões residuais

- Método do furo cego
 - Controle de qualidade
-

Planejamento do ensaio de AExT

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.1 - CAMPO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES

Solução elástica para deformações

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E} [\sigma_i - \nu (\sigma_j + \sigma_k)]$$

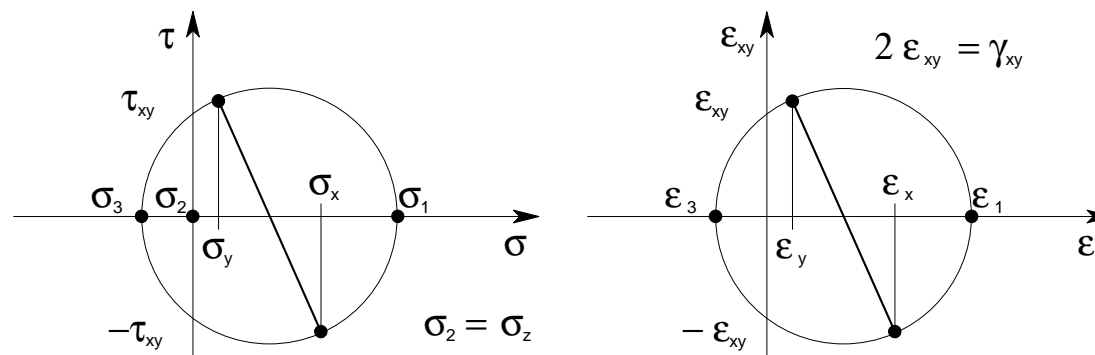
$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \sigma_{ij} (1 + \nu)$$

Solução elástica para tensões

$$\sigma_i = \frac{E}{1 + \nu} \left[\varepsilon_i + \nu \frac{\varepsilon_j + \varepsilon_k}{1 - 2\nu} \right]$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon_{ij}$$

Círculo de Mohr para tensão e deformação



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.2 - ESTADO PLANO DE TENSÕES

Solução para deformações

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y)$$

$$e = \frac{1-2\nu}{1-\nu}(\varepsilon_x + \varepsilon_y)$$

Solução para tensões

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_z + e \frac{\nu}{1-2\nu} \right] = 0$$

$$\varepsilon_z = -e \frac{\nu}{1-2\nu}$$

$$\sigma_i = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_i + \nu \varepsilon_j)$$

$$i, j = X, Y \quad \text{ou} \quad i, j = 1, 2$$

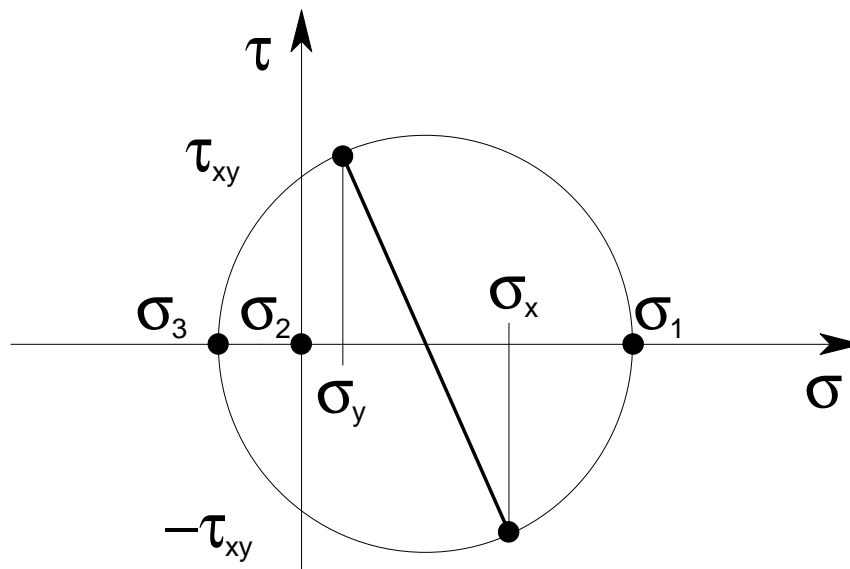
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.2 - ESTADO PLANO DE TENSÕES

Continuação

Círculo de Mohr



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.2 - ESTADO PLANO DE TENSÕES

Continuação

Casos de tensões proporcionais

$$\sigma_y = \alpha_\sigma \sigma_x$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\alpha_\sigma \sigma_x - \nu \sigma_x] = \frac{\sigma_x}{E} [\alpha_\sigma - \nu]$$

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \frac{1}{1 - \alpha_\sigma \nu}$$

Exemplo, para Poisson de 1/3:

α_σ	ESTADO	σ_x
0	UNIAXIAL	1,00 $E \varepsilon_x$
1/2	CILÍNDRICO	1,20 $E \varepsilon_x$
1	ESFÉRICO	1,50 $E \varepsilon_x$
-1	ANTI-ESFÉRICO	0,75 $E \varepsilon_x$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.2 - ESTADO PLANO DE TENSÕES

Continuação

Casos de deformações proporcionais

$$\varepsilon_y = \alpha_\varepsilon \varepsilon_x$$

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y]$$

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \frac{1 + \alpha_\varepsilon \nu}{1 - \nu^2}$$

Exemplo, para Poisson de 1/3:

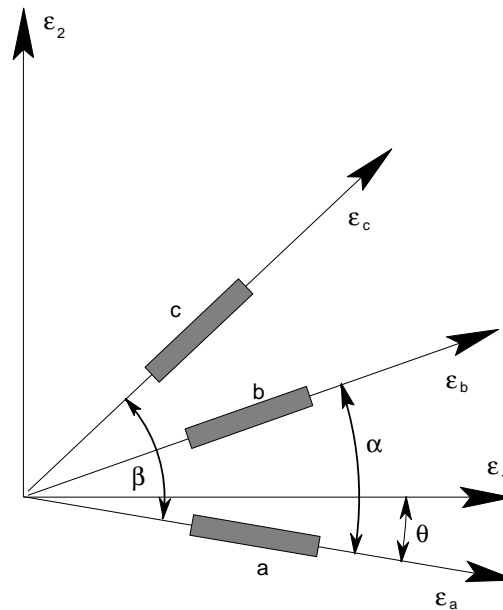
α_ε	ESTADO	σ_x
- ν	UNIAXIAL	1,00 $E \varepsilon_x$
1	ESFÉRICO	1,50 $E \varepsilon_x$
-1	ANTI-ESFÉRICO	0,75 $E \varepsilon_x$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.3 - DEFORMAÇÕES EM DIREÇÕES ARBITRÁRIAS

Formulação geral



$$\epsilon_a = \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \epsilon_2) + \frac{1}{2}(\epsilon_1 - \epsilon_2)\cos 2\theta$$

$$\epsilon_b = \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \epsilon_2) + \frac{1}{2}(\epsilon_1 - \epsilon_2)\cos 2(\alpha - \theta)$$

$$\epsilon_c = \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \epsilon_2) + \frac{1}{2}(\epsilon_1 - \epsilon_2)\cos 2(\beta - \theta)$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.3 – DEFORMAÇÕES EM DIREÇÕES ARBITRÁRIAS

Direção de deformação zero, estado biaxial de tensões

Para o caso de deformações quaisquer, nas direções principais, a direção de deformação zero, em relação à direção 1,

$$\cos 2\beta_0 = -\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}$$

Direção de deformação zero, estado uniaxial de tensões

No caso de um estado uniaxial de tensões é gerado um estado biaxial de deformações, e o ângulo para direção de deformação zero,

$$\varepsilon_y = -\nu \varepsilon_x$$

$$\cos 2\beta_0 = -\frac{1-\nu}{1+\nu}$$

Para este caso a direção de deformação zero é:

ν	0,20	0,25	0,30	0,333	0,35	0,40	0,50
β_0	65,90°	63,43°	61,29°	60,12°	59,39°	57,70°	54,74°

Resumindo, a indicação é $60^\circ \pm 3^\circ$.

Para uma orientação qualquer,

$$\varepsilon_\beta = \varepsilon_1 \frac{1}{2} [(1-\nu) + (1+\nu)\cos 2\beta]$$

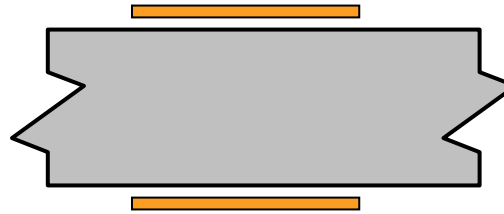
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.4 - ESTUDO DE CASOS

Formulação para 1/4, 1/2, 1/4 + 1/4, 4/4

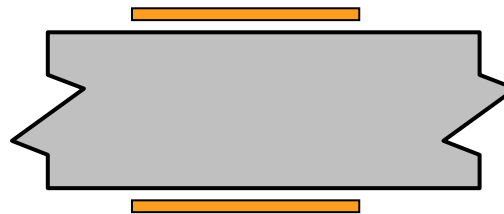
Tração



Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros.

Formulação para 1/4, 1/2, 1/4 + 1/4, 4/4

Flexão



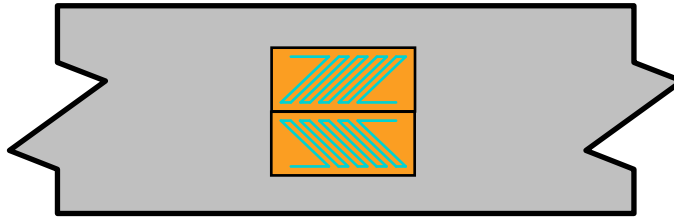
Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros.

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

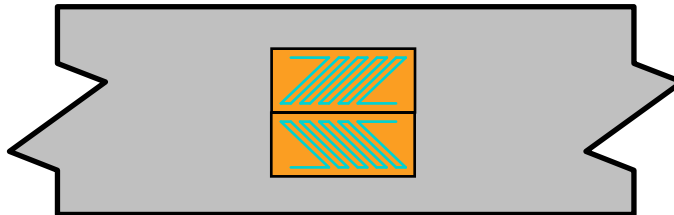
5.4 - ESTUDO DE CASOS

Formulação para $1/4$, $1/2$, $1/4 + 1/4$, $4/4$
Cisalhamento



Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros.

Formulação para $1/4$, $1/2$, $1/4 + 1/4$, $4/4$
Torção



Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros.

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.5 – ANÁLISE DE ROSETAS

Roseta 0-90

Usada quando as direções principais são bem estabelecidas.
São determinadas diretamente as deformações principais.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)$$

Roseta ± 45

Tipicamente usada para medidas envolvendo tensões tangenciais,
como cisalhamento em vigas, ou esforços de torção.

$$\gamma_{XY} = 2\varepsilon_{XY}$$

$$\varepsilon_{XY} = \varepsilon_1 = -\varepsilon_2$$

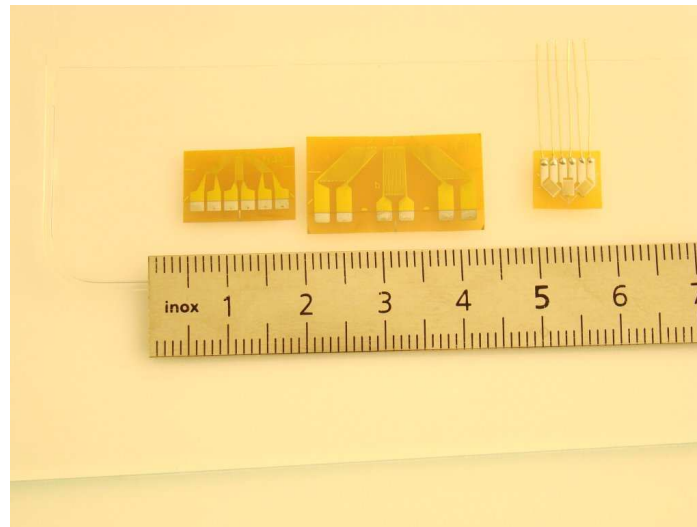
$$\tau_{XY} = \gamma_{XY} \cdot G$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.5 - ANÁLISE DE ROSETAS

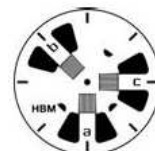
Roseta 0-45-90



$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2}(\varepsilon_a + \varepsilon_c) \pm \sqrt{\frac{1}{2}[(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]}$$

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{\varepsilon_a - \varepsilon_c}$$

$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}$$



0°/45°/90° rosette,
e.g. RY3x

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.5 - ANÁLISE DE ROSETAS

Roseta 0-60-120

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{3}(\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c) \pm \frac{1}{3}\sqrt{2[(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_a)^2]}$$

$$\operatorname{tg}2\theta = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - (\varepsilon_b + \varepsilon_c)}$$

$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}$$



0°/60°/120° rosette,
e.g. RY7x

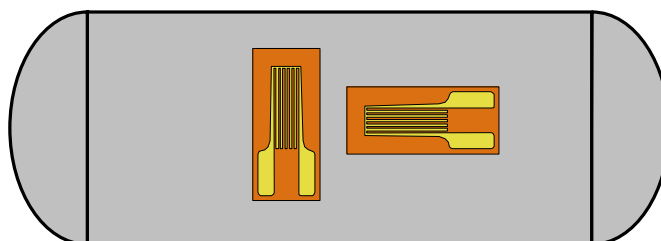
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.5 - ANÁLISE DE ROSETAS

Continuação

Exemplo



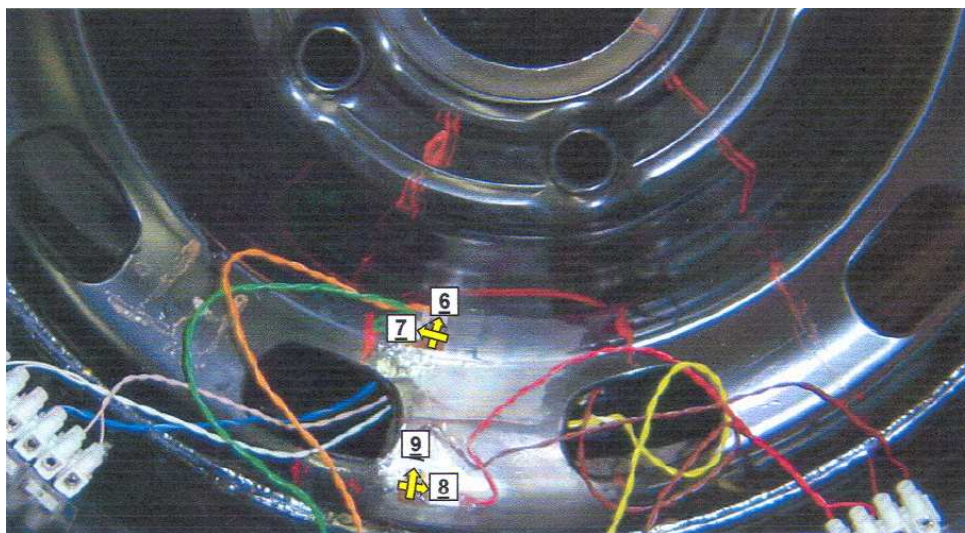
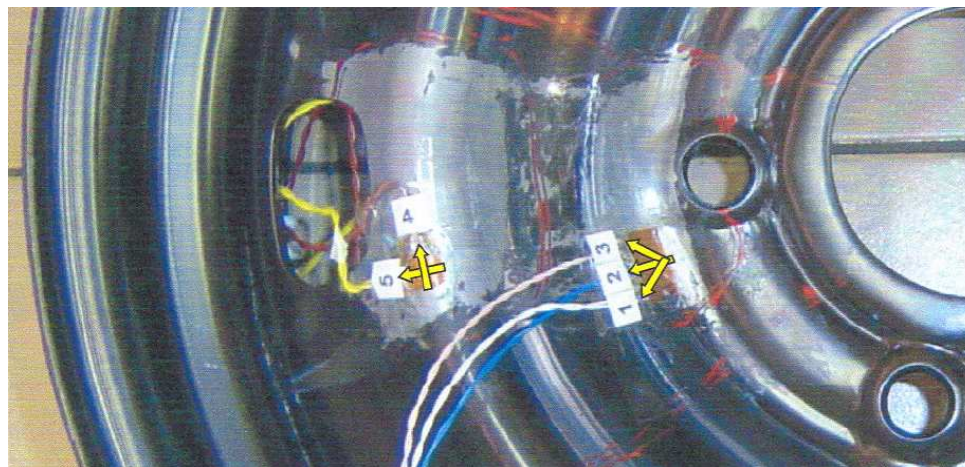
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.5 - ANÁLISE DE ROSETAS

Continuação

Exemplo



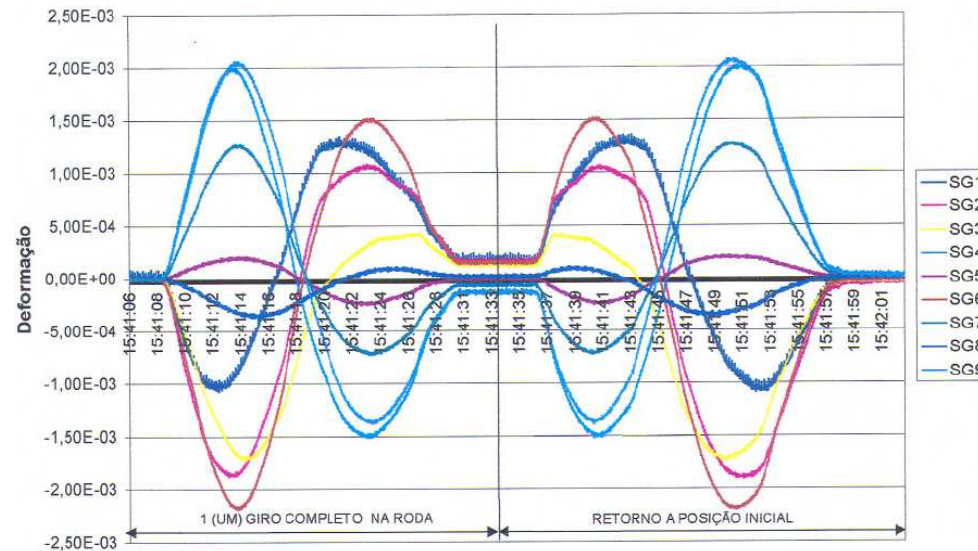
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.5 – ANÁLISE DE ROSETAS

Continuação

Exemplo



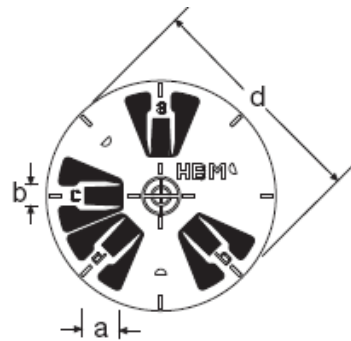
MOMENTO DE FLEXÃO - 7046N.m								
SENSOR	DEFORMAÇÃO (ϵ)				TENSÃO (N/m^2)			
	$\epsilon_{min.}$	$\epsilon_{max.}$	$\Delta\epsilon$	ϵ_a	$\sigma_{min.}$	$\sigma_{max.}$	$\Delta\sigma$	σ_a
SG1	-1,1E-3	1,4E-3	2,5E-3	1,2E-3	-229,7E+6	285,1E+6	514,7E+6	257,4E+6
SG2	-1,9E-3	1,1E-3	3,0E-3	1,5E-3	-400,6E+6	227,0E+6	627,6E+6	313,8E+6
SG3	-1,7E-3	430,6E-6	2,2E-3	1,1E-3	-363,4E+6	90,4E+6	453,8E+6	226,9E+6
SG4	-1,5E-3	2,0E-3	3,5E-3	1,8E-3	-318,5E+6	421,9E+6	740,4E+6	370,2E+6
SG5	-259,1E-6	213,4E-6	472,4E-6	236,2E-6	-54,4E+6	44,8E+6	99,2E+6	49,6E+6
SG6	-2,2E-3	1,5E-3	3,7E-3	1,9E-3	-460,8E+6	319,8E+6	780,5E+6	390,3E+6
SG7	-733,3E-6	1,3E-3	2,0E-3	1,0E-3	-154,0E+6	268,3E+6	422,3E+6	211,1E+6
SG8	-373,4E-6	112,0E-6	485,4E-6	242,7E-6	-78,4E+6	23,5E+6	101,9E+6	51,0E+6
SG9	-1,4E-3	2,1E-3	3,5E-3	1,7E-3	-292,1E+6	434,9E+6	727,0E+6	363,5E+6

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

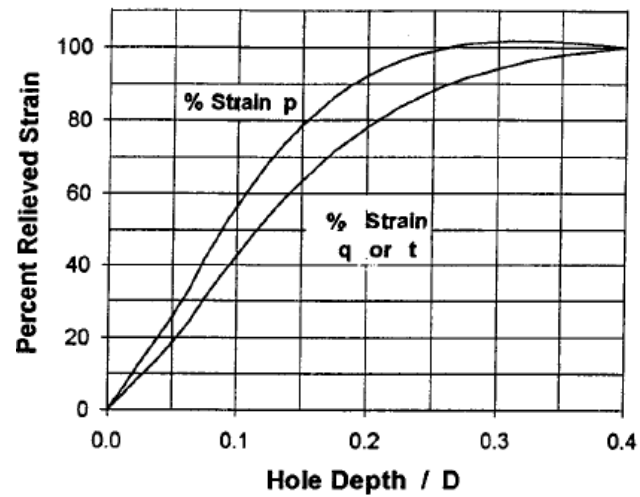
AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.6 - ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS

Método do furo cego



Type A Rosette

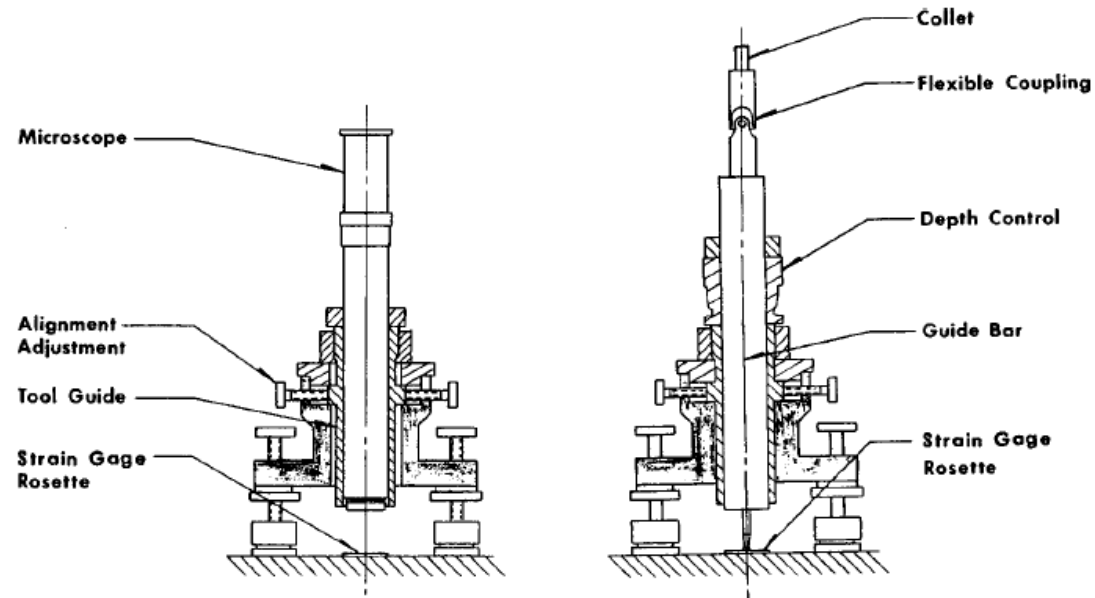


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.6 - ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS

Método do furo cego



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 5 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5.6 -ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS

Controle de qualidade

Uso de extensômetro mais usual, quando já existe uma larga base de conhecimento dos pontos relevantes quanto à tensão residual, quanto à direção e ao valor admissível de deformação.

É usado numa base comparativa, dentro de limites definidos previamente.



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

Requisitos para transdutores

- Materiais para transdutores
- Tipos de SG
- Tipos de adesivos
- Fiação
- Calibração

Transdutores de carga, célula de carga

- Requisitos específicos
- Tipos de célula de carga, geometria
 - Tração / compressão
 - Flexão
 - Cisalhamento
 - Torção

Transdutores de deslocamento, clip gages

- Requisitos específicos
- Formulação
- Clip gage axial
- Clip gage diametral

Circuitos de compensação

- Compensação de zero
- Compensação de spam

Tipos de célula de carga, circuito da ponte

- Tração / compressão
- Flexão
- Cisalhamento
- Torção
- Célula de carga de seis eixos

Outros tipos de transdutores

- Aceleração
- Temperatura
- Fadiga

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.1 – REQUISITOS PARA TRANSDUTORES

Requisitos gerais

Estabilidade da calibração ao longo do tempo.

Fatores que podem prejudicar:

- Aquecimento do SG
- Aquecimento do material do transdutor
- Aquecimento da fiação

Materiais para transdutores

Os materiais devem apresentar boa estabilidade no tempo, com elevado limite elástico, de forma a permitir trabalhar com tensões elevadas e assim aumentar a sensibilidade do sistema.

Ver tabela no apêndice

Tipos de SG

Extensômetros fabricados com materiais mais estáveis, como por exemplo a base em resina epóxi reforçada com fibra de vidro.

Grade em constantan ou karna.

Resistência de grade elevada, 350 Ω ou mais.
Definir a excitação da ponte tal que a potência dissipada no SG seja menos de 5 mW/mm², no caso de metal.

Para reduzir o efeito de creep no adesivo, usar o maior tamanho que seja possível, para a geometria do transdutor.

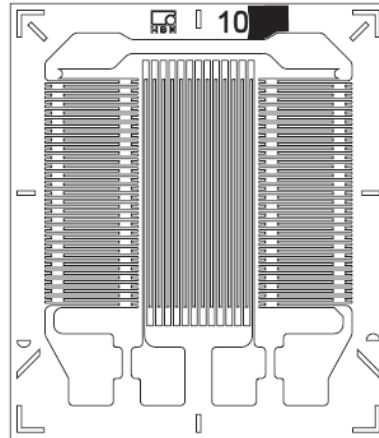
O tipo de SG depende do projeto do transdutor.

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.1 – REQUISITOS PARA TRANSDUTORES

Tipos de SG



Column-type strain gage 1000 Ω

Dimensions:

- grid 1 length 1.3 mm - overall length 9.7 mm
- grid 1 width 5.1 mm - overall width 8.4 mm
- grid 2 length 5.1 mm
- grid 2 width 2.5 mm

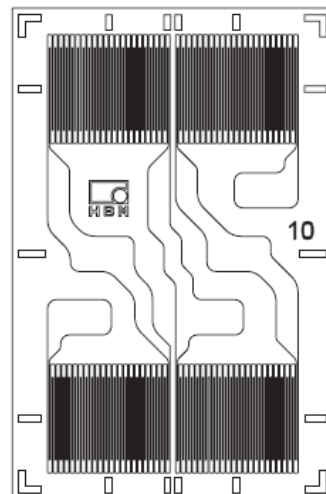
Technical data

Measuring grid

- material: Modco
- thickness: 5 μm

Carrier

- material: phenolic resin, glass-fiber reinforced
- base thickness: 35 $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$
- cover thickness: 25 $\mu\text{m} \pm 8 \mu\text{m}$



Full-bridge strain gage 350 Ω , grid distance 7.5 mm

Dimensions:

- grid length 1.9 mm
- grid width 2.8 mm
- overall length 11.2 mm
- overall width 7.3 mm

Technical data

Measuring grid

- material: Constantan
- thickness: 5 μm

Carrier

- material: phenolic resin, glass-fiber reinforced
- base thickness: 35 $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$
- cover thickness: 25 $\mu\text{m} \pm 8 \mu\text{m}$

Connections

- integrated solder pads

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.1 – REQUISITOS PARA TRANSDUTORES

Tipos de adesivos

Uso de adesivos especiais, de alta estabilidade, de cura a quente.

Camada de adesivo o mais fina possível.

Fiação

A fiação interna à ponte sempre em fio rígido, bitola compatível com os pads, terminais, dos SG.

Fiação externa ao transdutor sempre em fio flexível. Bitola compatível com o comprimento, de modo a não ter resistência maior que 1% da resistência do SG.

Usar sempre fiação com comprimentos simétricos.

Calibração

Shunt para análise experimental de tensões.
Célula de carga padrão para transdutor de força.
Torre de calibração para sensores de deslocamento.

Ajuste de zero

Ajusta a saída para entrada zero, em não mais de 1% do fundo de escala, em geral com sensibilidade da ordem de 2 mV/V.

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.2 – TRANSDUTORES DE FORÇA, CÉLULAS DE CARGA

Requisitos específicos

Estabilidade no tempo. Material, SG, adesivo, fiação
Alta rigidez, mínimo efeito sobre o sistema a ser monitorado.
Estabilidade com efeitos outros que a grandeza a medir.
Estabilidade do ponto de zero, drift, e span, no tempo.
Certificada para fadiga

Materiais para células de carga

Metálicos:

Aço 4140, 4340, 15-5 PH
Alumínio 2020 T81, 6061 T6
Cobre - berílio

Não metálicos:

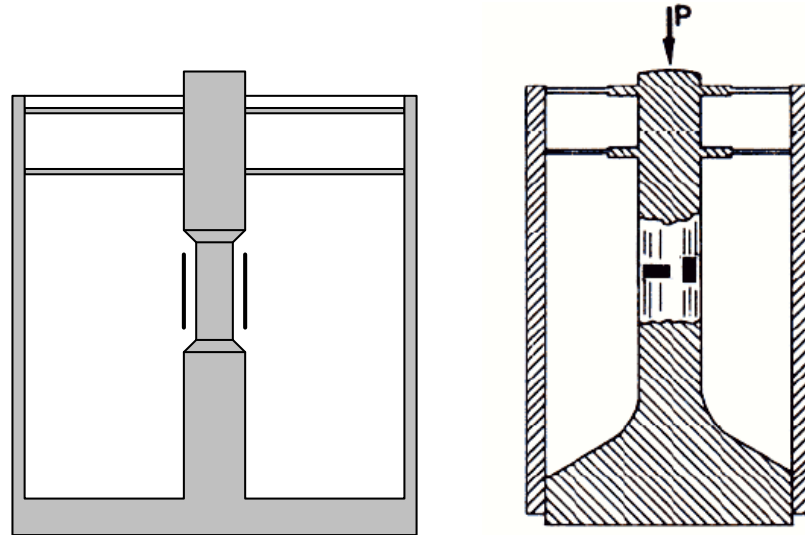
Cerâmicas, Al_2O_3
Compostos, fibra de carbono com epoxi
Outros, Si, micro-manufaturados

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.2 – TRANSDUTORES DE FORÇA, CÉLULAS DE CARGA

Tipos de célula de carga, geometria
Tração / compressão

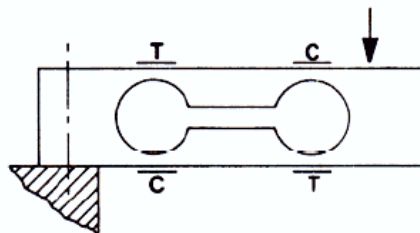
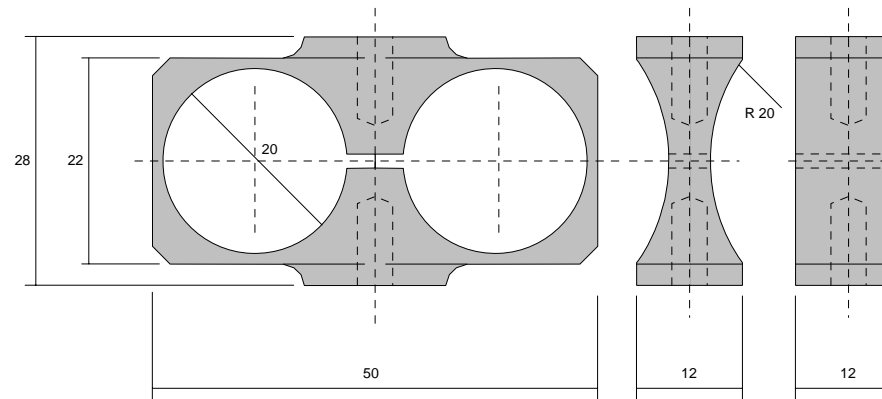


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.2 – TRANSDUTORES DE FORÇA, CÉLULAS DE CARGA

Tipos de célula de carga, geometria
Flexão

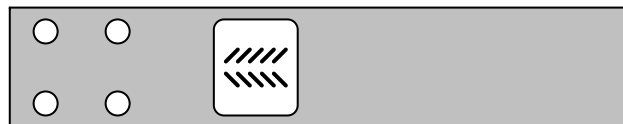


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

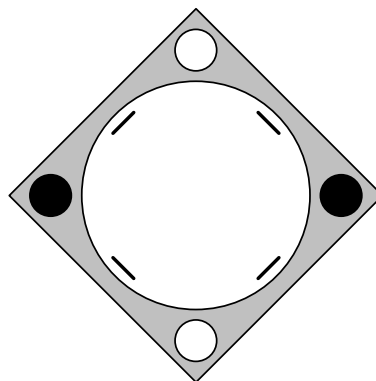
AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.2 – TRANSDUTORES DE FORÇA, CÉLULAS DE CARGA

Tipos de célula de carga, geometria
Cisalhamento



Tipos de célula de carga, geometria
Torção



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

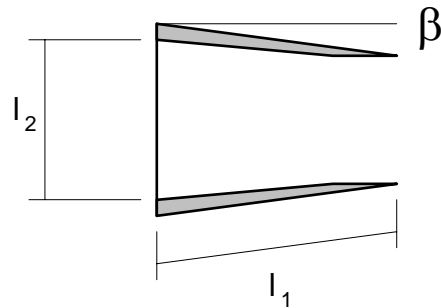
6.3 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CLIP-GAGES

Requisitos específicos

Baixa rigidez, mínimo efeito no sistema.
Estabilidade com efeitos outros que a grandeza a medir.
Estabilidade do ponto de zero, drift, e span, no tempo.
Comportamento linear

Formulação

Viga em flexão pura



$$\varepsilon = \frac{h\delta}{2l_1l_2 \cos \beta}$$

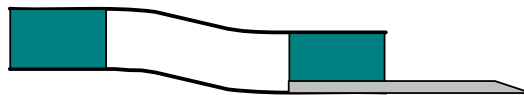
$$k = \frac{EI}{(l_1 \cos \beta)^2 l_2}$$

Viga biengastada



$$\delta = \frac{1}{12} \frac{F l^3}{EI}$$

$$\varepsilon = 3 \frac{h\delta}{l^2}$$



$$k = 12 \frac{EI}{l^3}$$

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES


AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

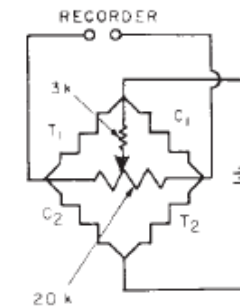
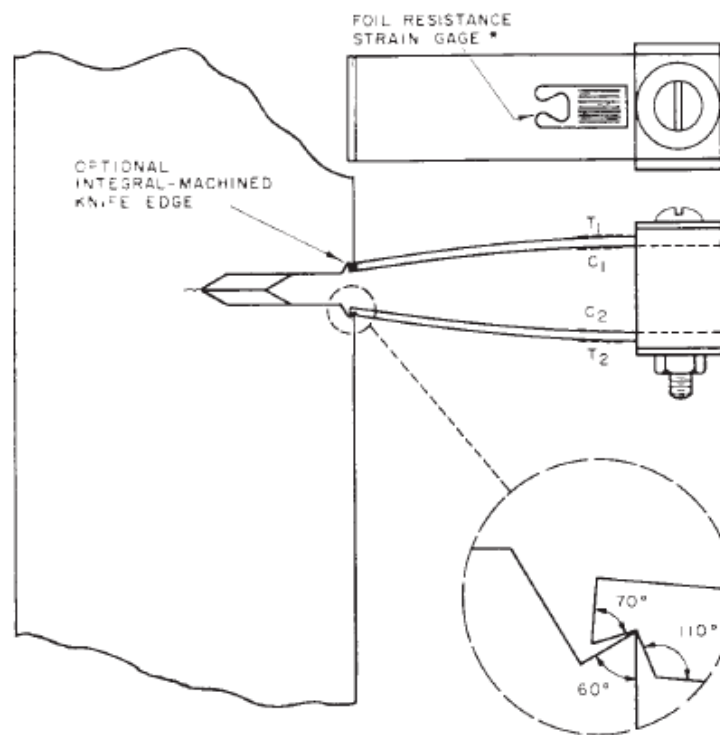
6.3 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CLIP-GAGES



Designation: E 399 – 90 (Reapproved 1997)

Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials¹

 E 399 – 90 (1997)



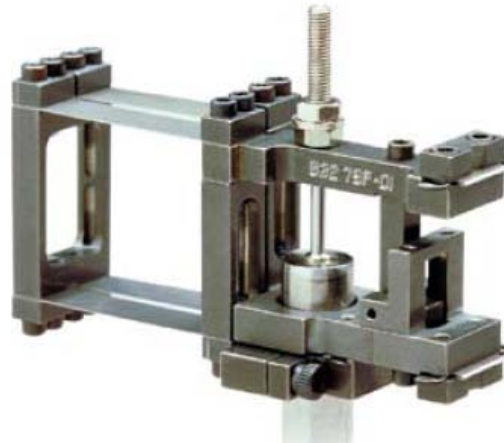
* 500 OHM GAGES WILL PROVIDE GREATER SENSITIVITY THAN 120 OHM GAGES

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.3 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CLIP-GAGES

Clip gage axial



Clip gage diametral



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.3 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CLIP-GAGES

Calibração de clip-gages



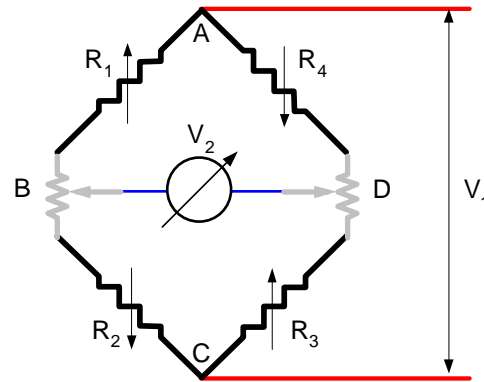
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO

Compensação de zero

O ajuste do ponto de zero é feito em duas partes, uma do zero na temperatura ambiente, com um resistor ajustável de pequeno TCR, e outra para compensar o efeito da temperatura com outro resistor, este com alto TCR.



Resistor ajustável

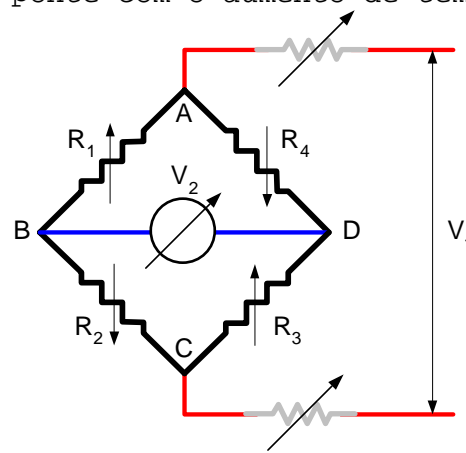
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO

Compensação de spam

Nas células de carga o efeito da temperatura sobre o módulo de elasticidade do material deve ser compensado. São usados resistores com TCR elevado, reduzindo assim a tensão de alimentação da ponte com o aumento de temperatura.



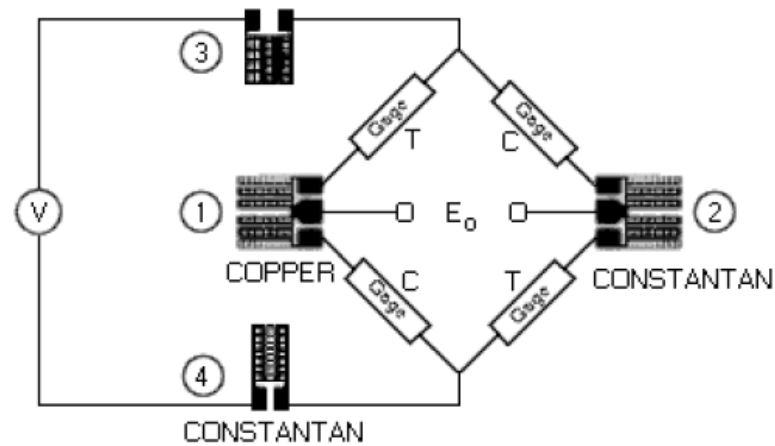
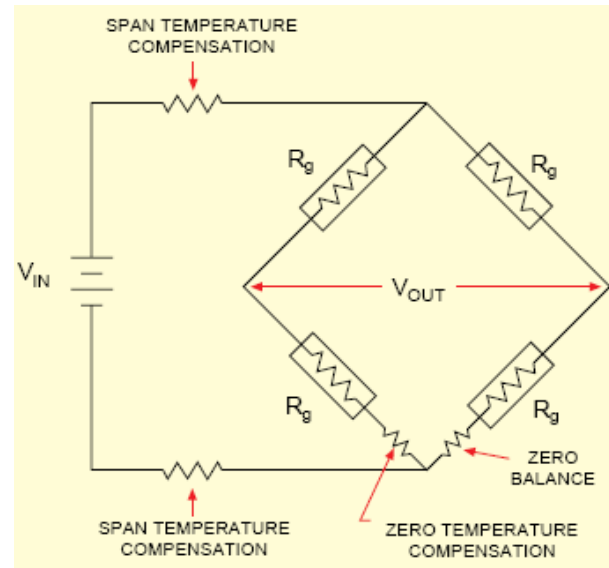
Dados de TCE e TCR em ppm / K

	Al	CuBe	Steel	17.4PH	Ni	Cu	Balco	CuNi	Mang.
TCE	-540	-450	-230	-270					
TCR					5900	3930	4300	5, 90	20

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

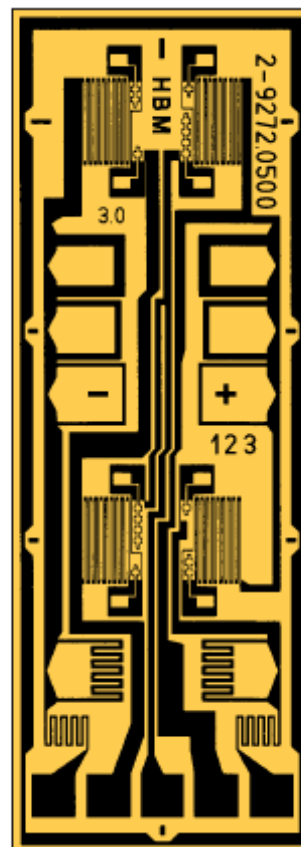
6.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.5 – TIPOS DE CÉLULAS DE CARGA, CIRCUITO DA PONTE

Tração / compressão

Circuito a 2X e 2Y, com ponte completa.
Circuito com 4X e 4 Y, ponte completa com 2 SG por braço.
Circuito com 4X em meia ponte diagonal.

Flexão

Ponte completa com 2X e 2Y, em um mesmo lado da viga.
Ponte completa com 4X, dois em cada lado da viga.
Ponte completa com 2 SG por braço, usando 8X.

Cisalhamento

Meia ponte com SG $\pm 45^\circ$.
Ponte completa com 2 SG $\pm 45^\circ$.

Torção

Meia ponte com SG $\pm 45^\circ$.
Ponte completa com 2 SG $\pm 45^\circ$.

Referência

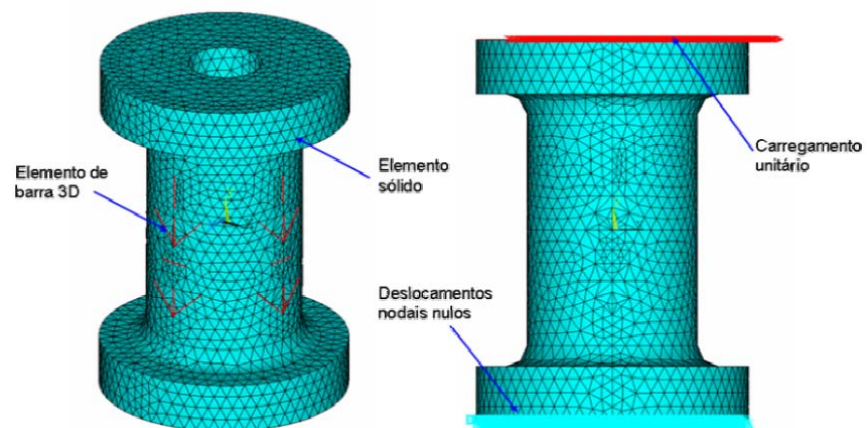
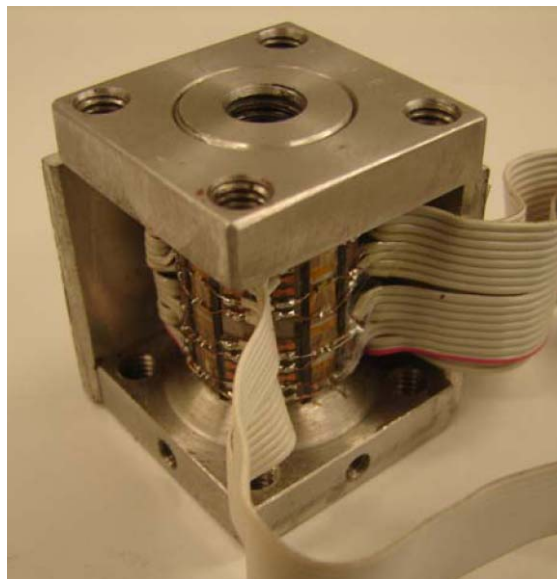
Bridge Conections, Kyowa

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.5 – TIPOS DE CÉLULAS DE CARGA, CIRCUITO DA PONTE

Célula de carga de seis eixos

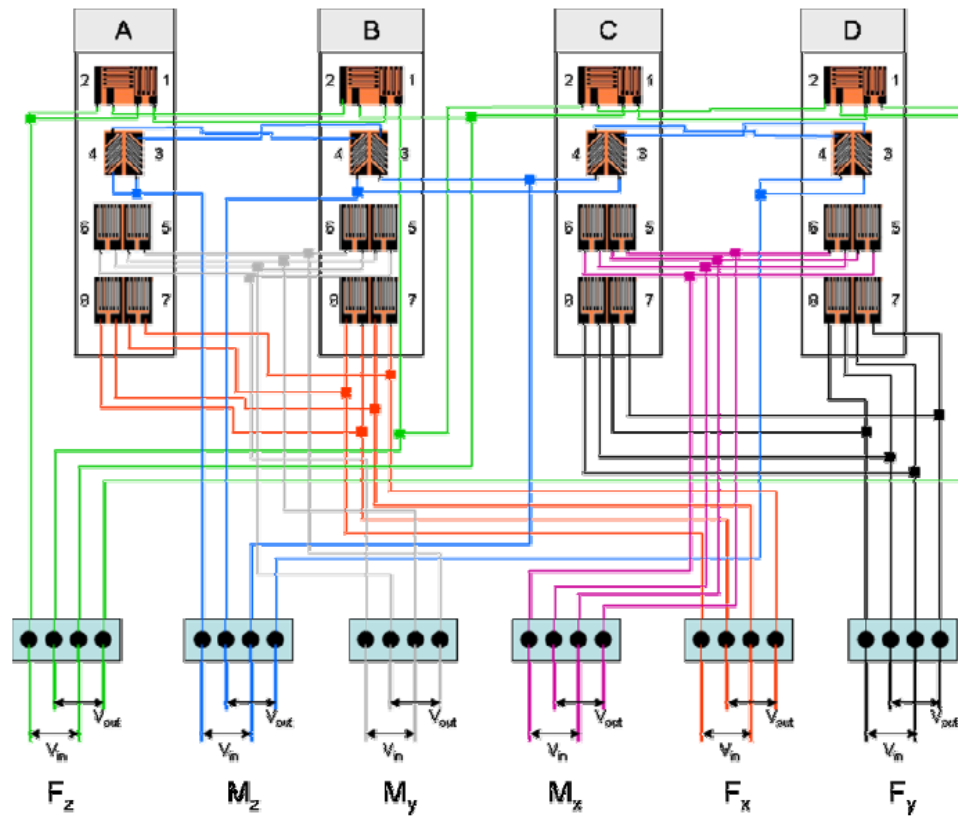


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.5 – TIPOS DE CÉLULAS DE CARGA, CIRCUITO DA PONTE

Célula de carga de seis eixos
Circuito interno

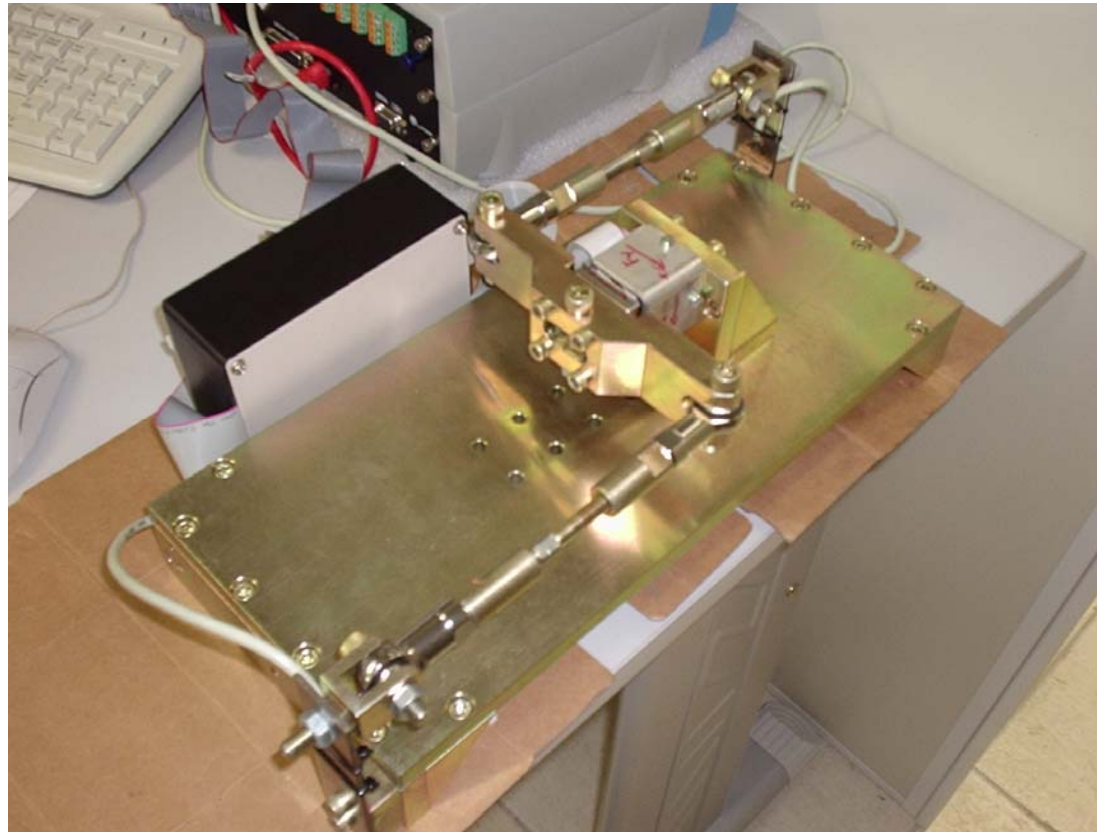


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.5 – TIPOS DE CÉLULAS DE CARGA, CIRCUITO DA PONTE

Célula de carga de seis eixos
Calibração



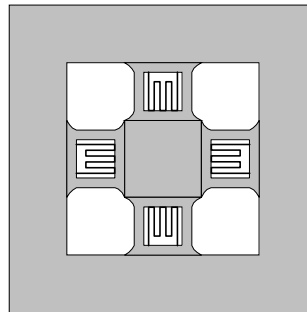
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.6 – OUTROS TIPOS DE TRANSDUTORES

Aceleração

Acelerômetro micro fabricado com vigas suportando uma massa sísmica, com SG gerados por deposição direta sobre as superfícies. Ajuste da ponte por remoção seletiva a laser.



Medida indireta

- Standard strain ring
- Simple strain measurements on shafts, axles and cylinders
- Installation without surface preparation
- 1% Accuracy
- For tension, compression, bending or torque measurements
- For cyclical applications only, i.e. clamping force on presses



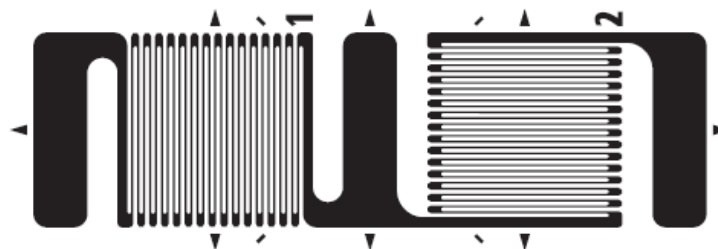
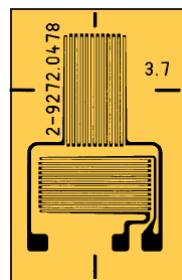
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

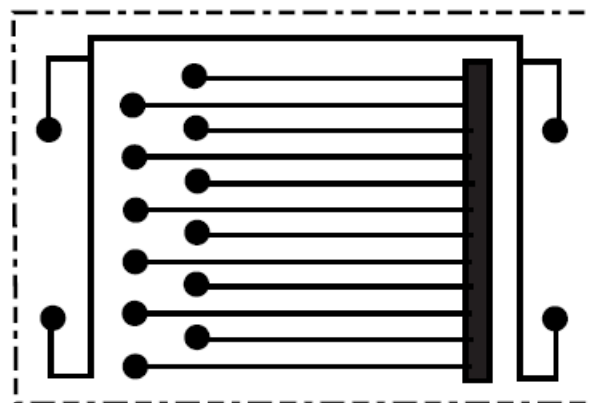
6.6 – OUTROS TIPOS DE TRANSDUTORES

Fadiga

Nucleação, cálculo do dano acumulado.



Propagação, acompanhamento do tamanho da trinca.



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 6 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

6.6 – OUTROS TIPOS DE TRANSDUTORES

Medida de esforços em pontes, viadutos, barragens, em tempo real



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

Instrumentação

- Configuração geral de um SCAD
- Circuitos de zeragem
- Amplificação
- Multiplexação
- Conversão AD
- Padrões de comunicação

Análise de erro

- Fiação a 2, 3, 4 e 6 fios
- Alimentação
- Outros efeitos
- Metodologia de análise de erros

Seleção do SG e da instrumentação

- Escolha do tipo de SG para uma dada aplicação
- Escolha das características da ponte
- Escolha da fiação, tabela AWG

Aplicação de SG

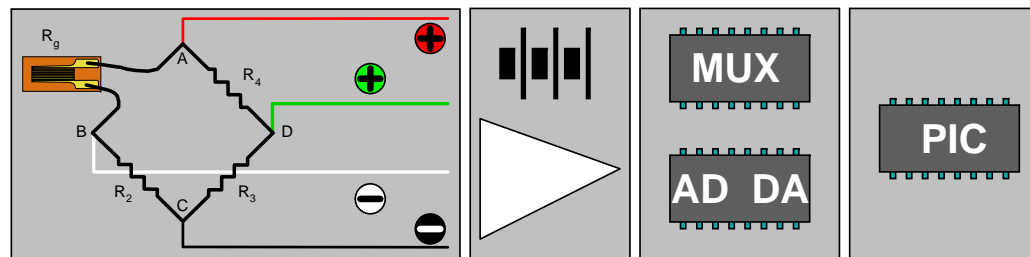
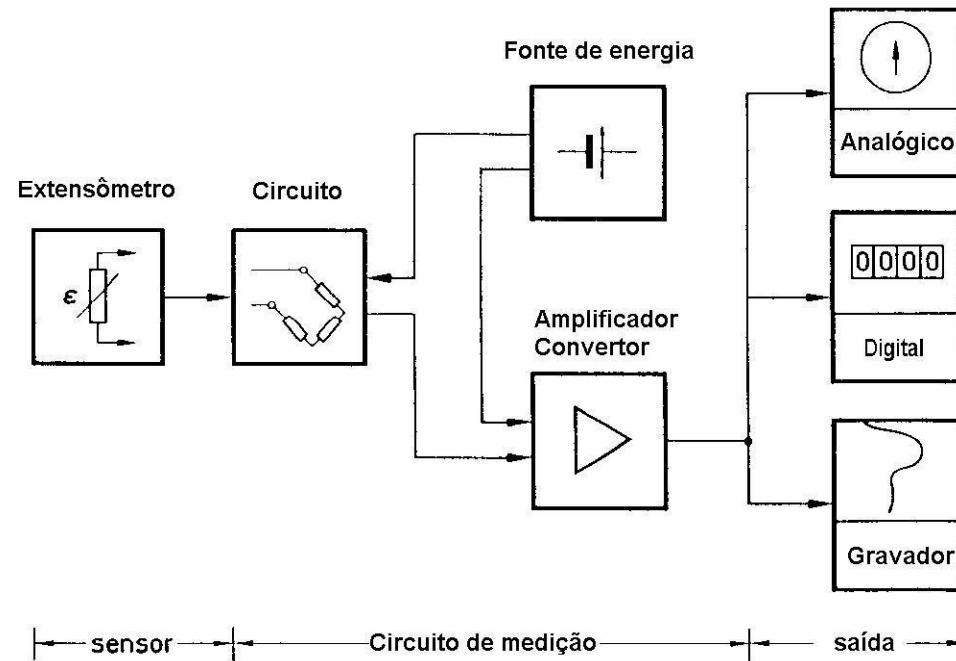
- Escolha do local e orientação do SG
- Preparo do SG para aplicação
- Preparo do local de aplicação
- Preparo da fiação
- Aplicação do SG
- Proteção da aplicação
- Verificação da qualidade da aplicação

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Configuração geral de um SCAD



SINAL ANALÓGICO

SINAL DIGITAL

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

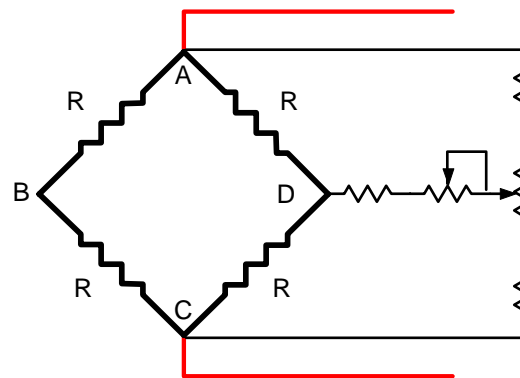
AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Compensação de temperatura

TC	MATERIAL	α VALUE	
01	quartz	0.50	$\cdot 10^{-6}/K$
05	molybdenum	5.40	$\cdot 10^{-6}/K$
09	titanium	9.00	$\cdot 10^{-6}/K$
09	gray cast iron	9.00	$\cdot 10^{-6}/K$
11	ferritic steel	10.8	$\cdot 10^{-6}/K$
15	austenitic steel	16.0	$\cdot 10^{-6}/K$
23	aluminum	23.0	$\cdot 10^{-6}/K$
65	plastic material	65.0	$\cdot 10^{-6}/K$

Circuitos de zeragem

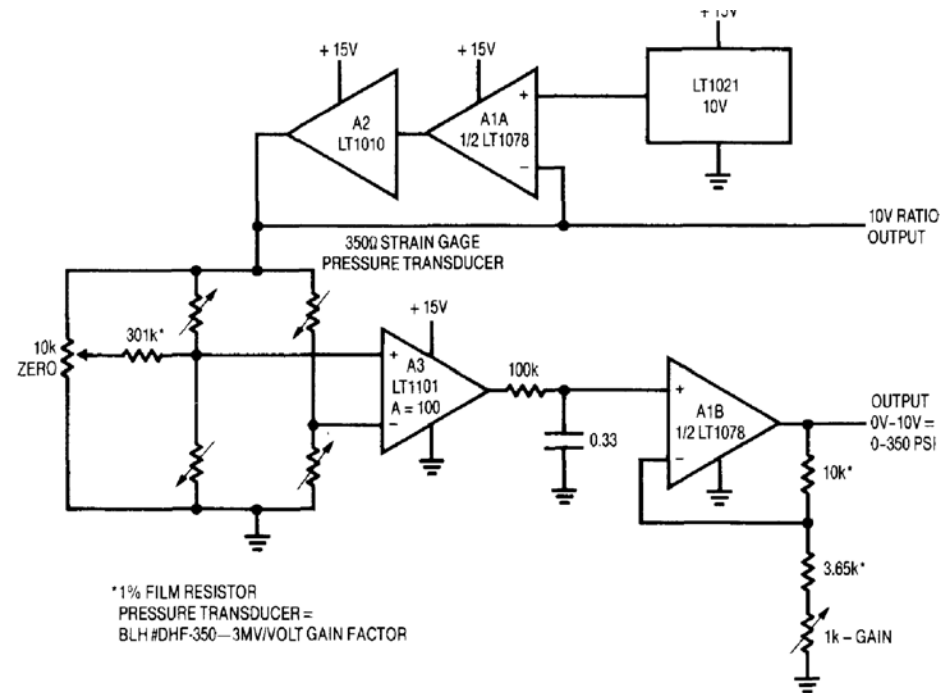


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Amplificação



Multiplexação

Permite a aquisição de vários canais, pela leitura seqüencial das informações, usando um único conversor AD, em geral o componente de maior custo do sistema.

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Conversão AD

Converte o sinal analógico já amplificado em sinal digital. Importante estabelecer o número de bits nesta conversão. Define a resolução que se tem no sinal digital

Número de bits	Resolução
10	1:1 024
12	1:4 096
14	1:16 384
16	1:65 536

Padrões de comunicação

Comunicação com sinal analógico amplificado.

Simple, mas sujeito a interferências.

Padrões 0/5 V; 0/10 V, $\pm 10V$, 0/20 mA, 4/20 mA,...

Comunicação com sinal digital.

Requer o conversor AD e circuito de comunicação.

Padrões RS 232, USB 2.0, ...

Comunicação sem fio.

Usa sinal de radio frequência, típico de telemetria.

Padrões a 900 MHz, 2.4 GHz, Zig Bee, Bluetooth, ...

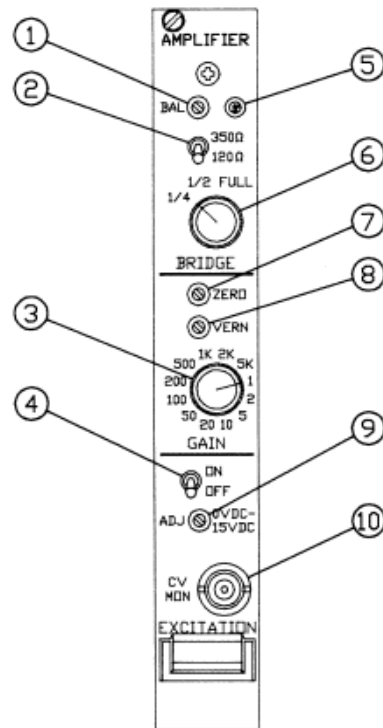
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Exemplo de sistema comercial

Omega DMD-519



DMD-519 Single Channel High Performance Strain Gage Amplifier

- 1 - Manual bridge balance trimpot
- 2 - Bridge completion resistor value
120 / 350 ohms
- 3 - Fixed gain selector switch
1x / 5kx
- 4 - Bridge excitation On/Off switch
- 5 - Autobalance LED indicator
- 6 - Bridge configuration switch
1/4, 1/2, full bridge
- 7 - Amplifier zero trimpot
- 8 - Fixed gain attenuator
- 9 - Bridge excitation adjustment trimpot
0 to 15 V
- 10 - BNC bridge excitation monitor

Frequency response DC to 100 kHz (-3dB)
Output $\pm 10V$ @ 100 mA.

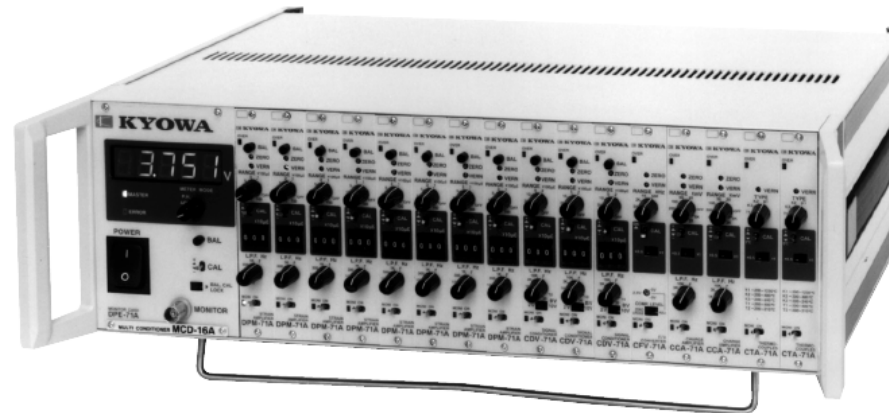
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Exemplo de sistema comercial

Kyowa MCD 16A



HBM Spider 8

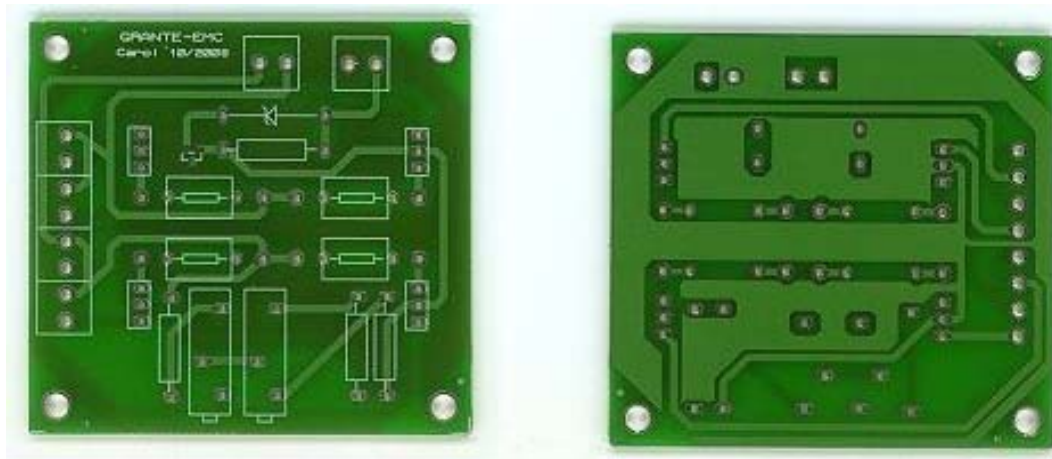


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Exemplo de placa de condicionamento



Funcionalidades:

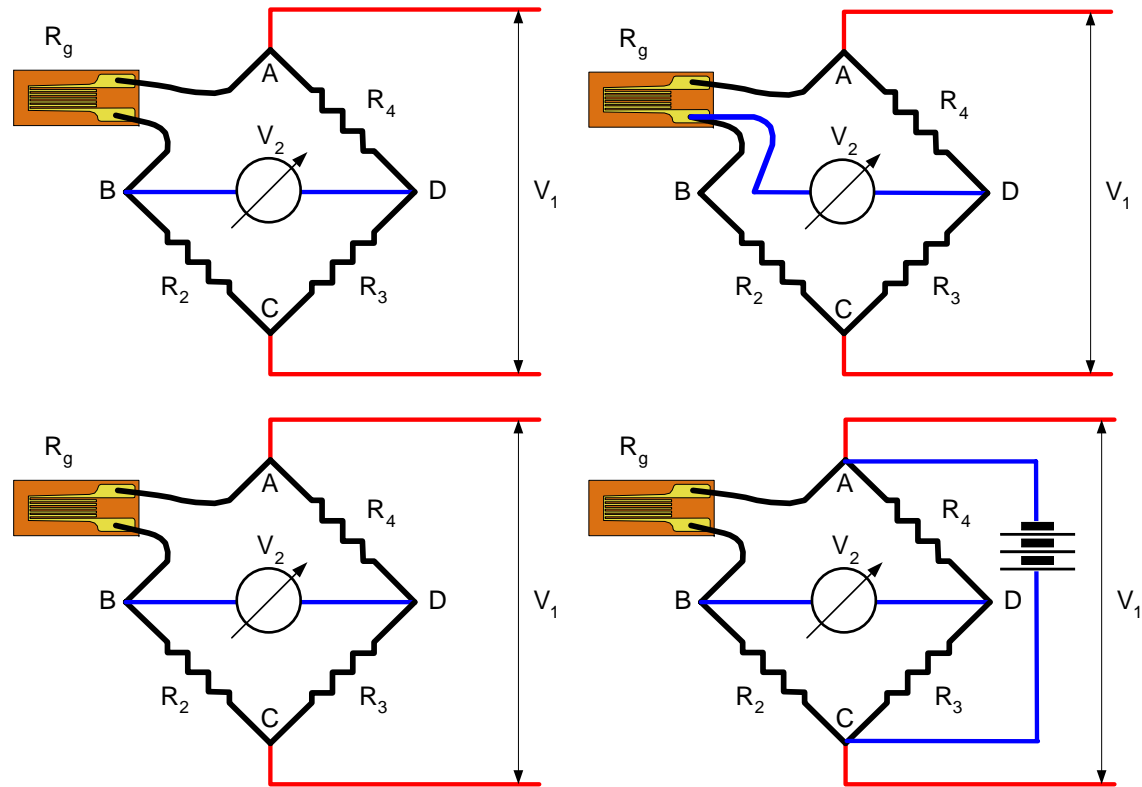
- Complementa a ponte para as configurações
1/4, 1/2, 1/4 + 1/4, completa
- Alimentação de precisão
- Circuito de zeragem

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.2 – ANÁLISE DE ERROS

Fiação a 2, 3, 4 e 6 fios



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.2 – ANÁLISE DE ERROS

Alimentação

Alimentação DC.

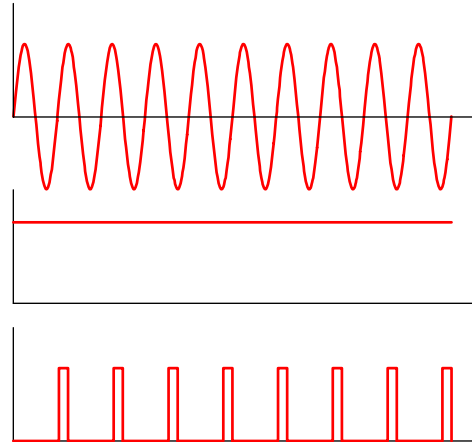
Leitura com sinais de alta
freqüência
Sensível a interferências
eletromagnéticas

Alimentação AC.

Usa freqüência portadora
Mais imune a interferência
Limite na freqüência do sinal

Alimentação pulsada.

Para sinais de baixa freqüência
Permite uma maior tensão na ponte,
sem provocar muito aquecimento



Outros efeitos

Na ponte:

Interferência eletromagnética
Interferência eletrostática

Na fiação

Aquecimento desigual de braços da fiação
Interferência eletromagnética
Interferência eletrostática

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

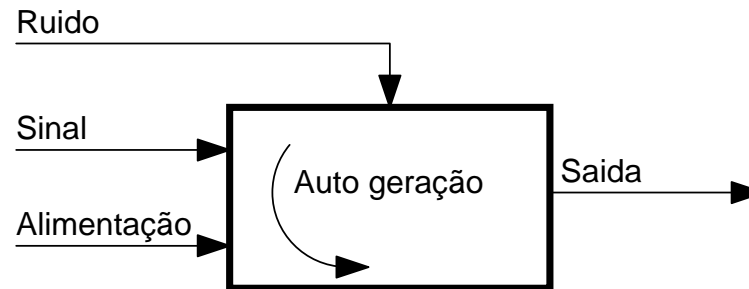
7.2 – ANÁLISE DE ERROS

Metodologia de análise de erros

O desejado em qualquer sistema de medição é que a saída seja proporcional ao sinal e independente de qualquer outro efeito.

Na prática tal não ocorre e os efeitos indesejados devem ser reduzidos ao máximo, ou ao menos conhecidos e quantificados.

	Alimentação On	Alimentação Off
Entrada On	Saída desejada	Auto geração
Entrada Off	Outros efeitos	Auto geração

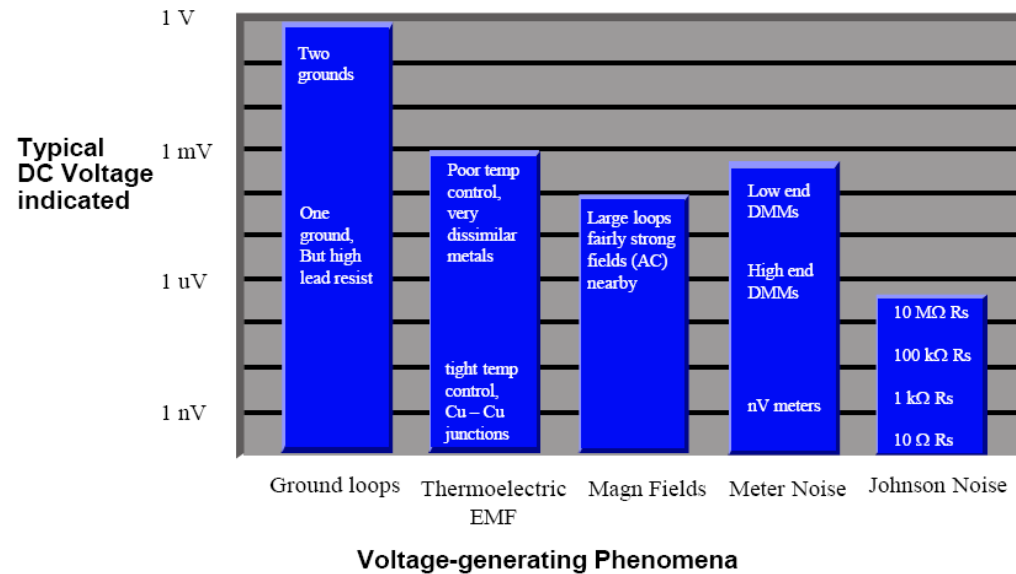


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.2 – ANÁLISE DE ERROS

Valores comparativos das diferentes fontes de geração de um potencial elétrico.



Força eletromotriz gerada pelo efeito Seebeck

Paired Materials*	Seebeck Coefficient, Q_{AB}
Cu - Cu	=0.2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Ag	0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Au	0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Pb/Sn	1-3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Si	400 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Kovar	40-75 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - CuO	1000 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

* Ag = silver Au = gold Cu = copper CuO = copper oxide
Pb = lead Si = silicon Sn = tin

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

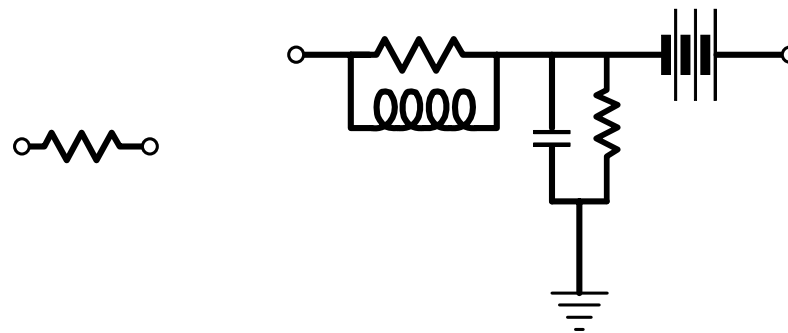
AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.2 – ANÁLISE DE ERROS

Metodologia de análise de erros

Concluindo, o extensômetro não é apenas um resistor que tem seu valor da resistência afetado pela deformação e temperatura.

O extensômetro também funciona como um indutor e como um capacitor, tendo ainda uma resistência à terra, podendo ainda funcionar como gerador de uma FEM interna.



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.3 – SELEÇÃO DO SG E DA INSTRUMENTAÇÃO

Escolha do tipo de SG para uma dada aplicação

Direções principais conhecidas ou não.
Uniformidade do campo de tensões.
Estabilidade desejada ao longo do tempo.
Limitações de aquecimento da ponte.

Escolha das características da ponte

Power spectrum do sinal a ser medido.
Alimentação Dc, AC, pulsada.
Número de canais.
Aquisição simultânea ou multiplexada.

Escolha da fiação, tabela AWG

Na fiação interna usar fio rígido com diâmetro compatível com o tamanho dos terminais dos SG. Usar o mínimo de solda.

A bitola da fiação externa deve ser escolhida de forma a ter no máximo 1% da resistência elétrica do SG. Usar cabo flexível. Se existe campos magnéticos, obrigatoriamente deve-se usar par trançado.

Em casos extremos, empregar um cabo trançado em dois planos perpendiculares, Inter-8 Weave, ou fiação dentro de conduites metálicos.



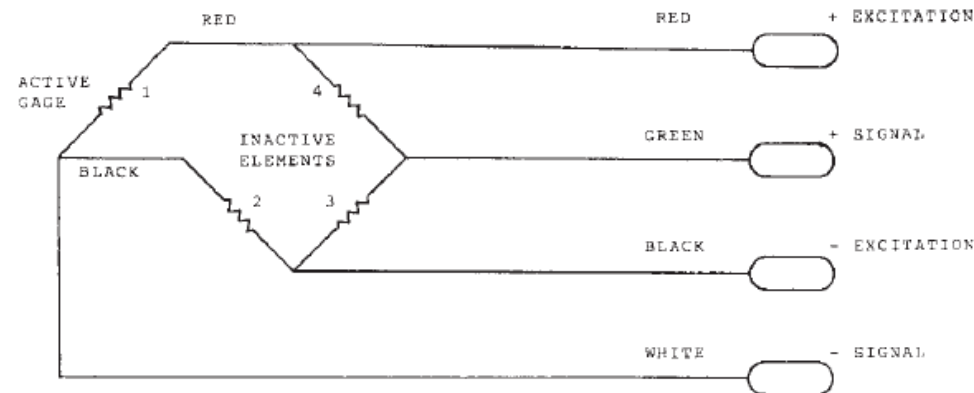
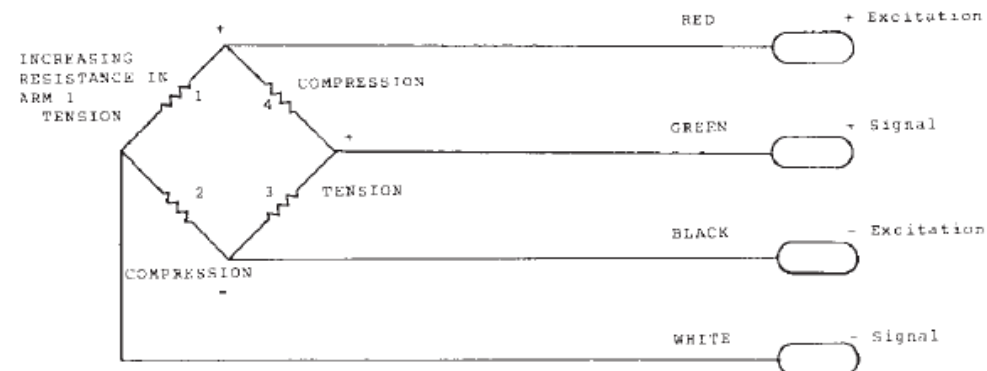
Construction

CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.3 – SELEÇÃO DO SG E DA INSTRUMENTAÇÃO

Código de cores da fiação



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.4 – APLICAÇÃO DE SG

Planejamento da aplicação

Se análise de tensões, em geral aplicação de curto prazo.
Estabilidade e calibração para medidas confiáveis.

Se uso em transdutor, em geral aplicação de longo prazo.
Estabilidade mais crítica.
Calibração com padrão metrológico.

Método 5W 1H, na análise experimental de tensões

O que - $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \epsilon_{xy}, \epsilon_\alpha, \epsilon_\beta, \epsilon_\gamma, N\epsilon_x, N\epsilon_y, \sigma_x, \sigma_1, \sigma_{eq}, \sigma_{xy}, etc$

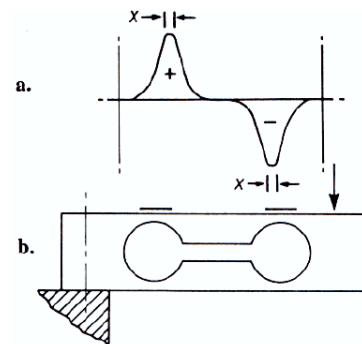
Como - escolha do método mais indicado à aplicação

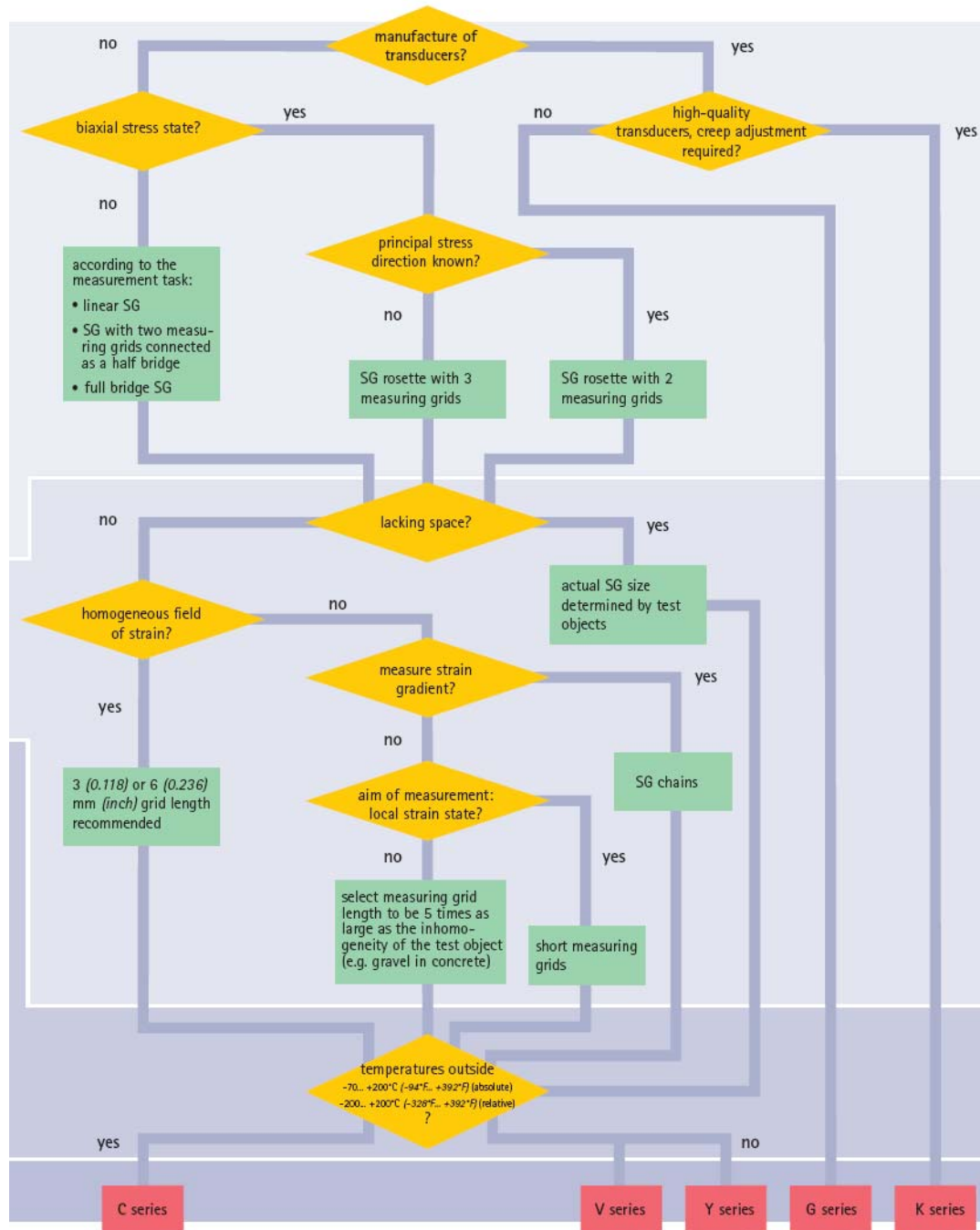
Onde - Local no ponto de falha, para validar FEA, para σ_0 , etc

Quando - escolha da frequência de amostragem

Quem - Tipo do SG. Alimentação da ponte

Porque - !!!!

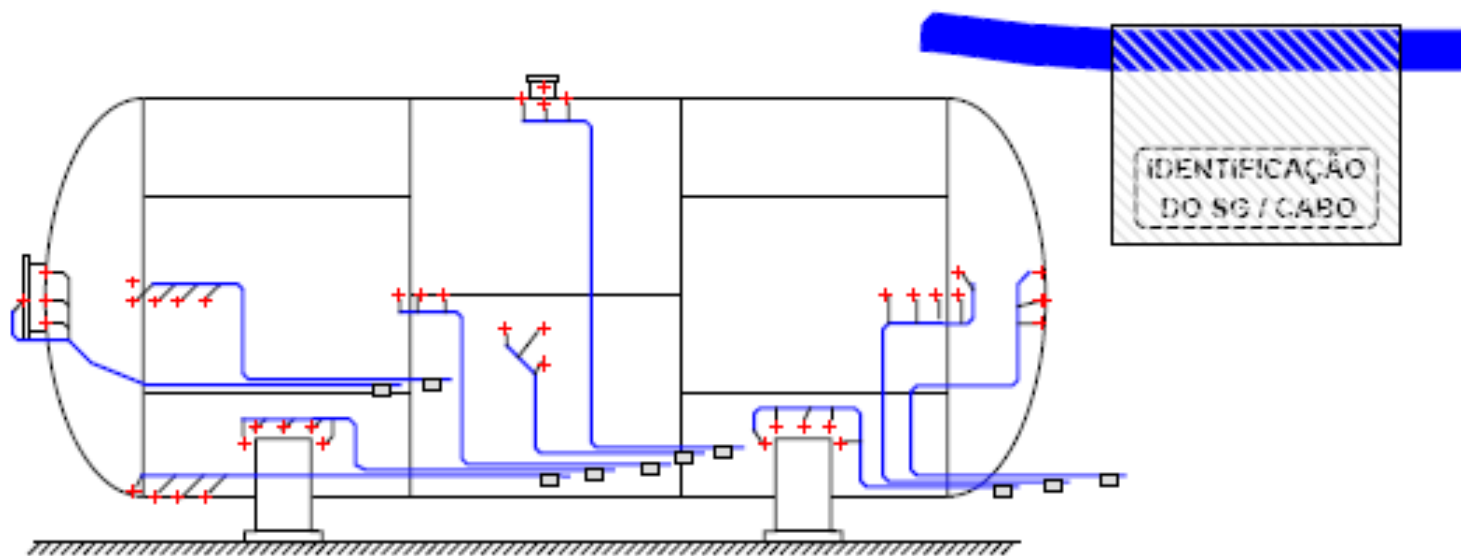




CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

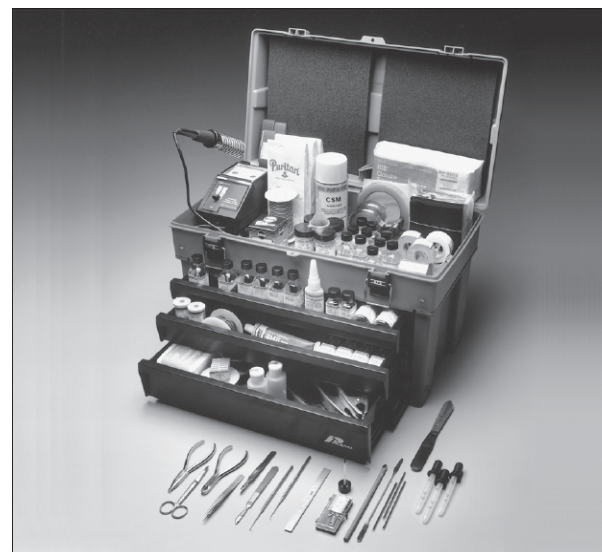
7.4 – APLICAÇÃO DE SG



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.4 – APLICAÇÃO DE SG



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

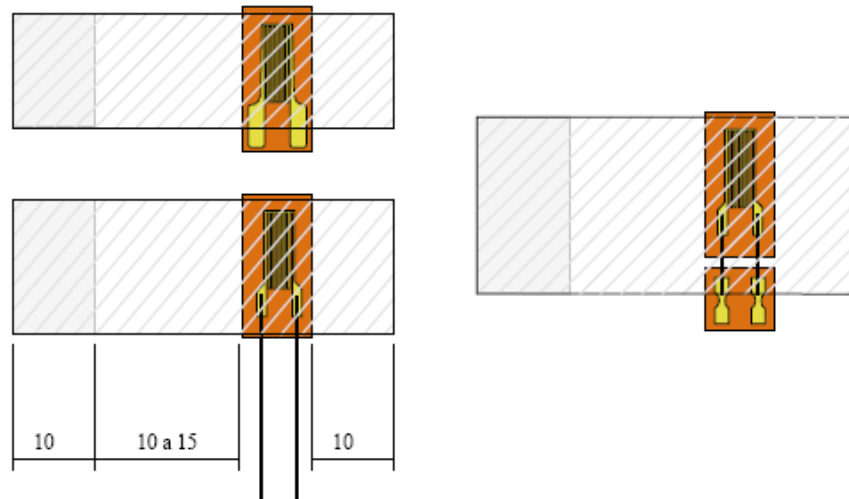
AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.4 – APLICAÇÃO DE SG

Escolha do local e orientação do SG

Uso de conhecimento prévio do problema para estabelecer o número de pontos a medir e sua localização.
Métodos de campo da AExT, ou análise FEA.

Preparo do SG para aplicação

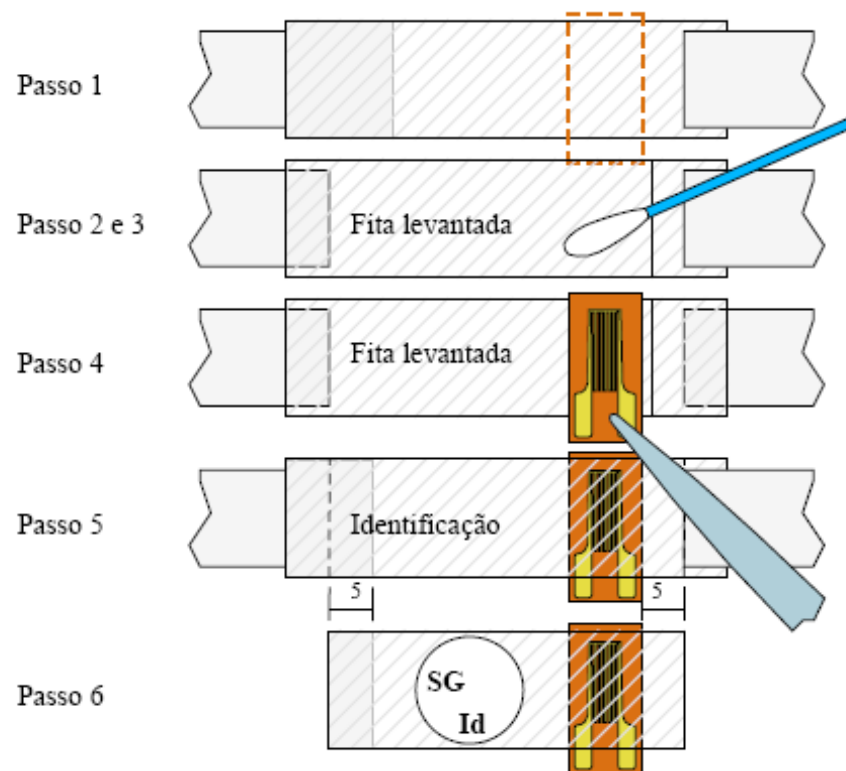


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.4 – APLICAÇÃO DE SG

Preparo do SG para aplicação

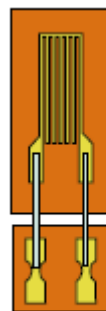


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

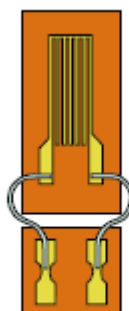
AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.4 – APLICAÇÃO DE SG

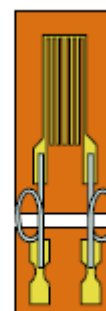
Preparo do SG para aplicação



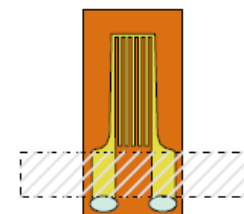
Direto



Laço lateral



Laço vertical

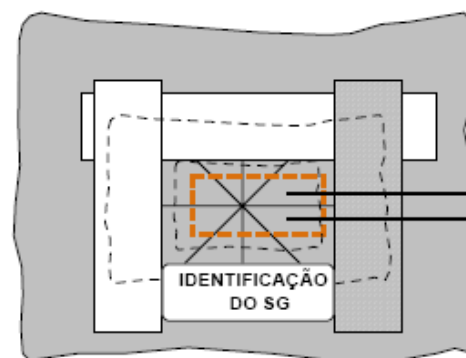
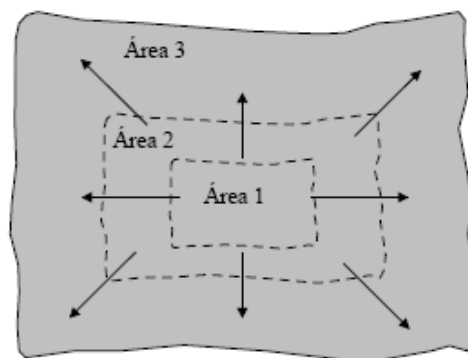


Preparo do local de aplicação

Limpeza bruta

Limpeza fina

Limpeza final

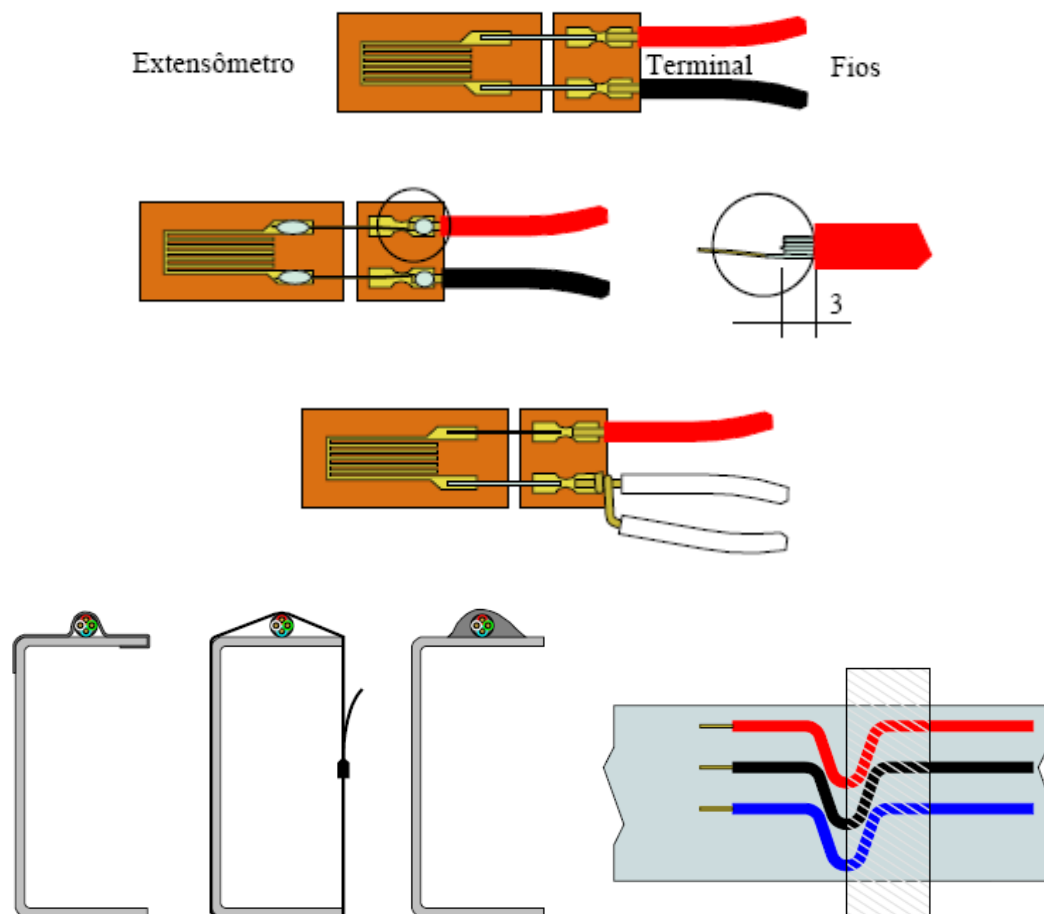


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.4 – APLICAÇÃO DE SG

Preparo da fiação

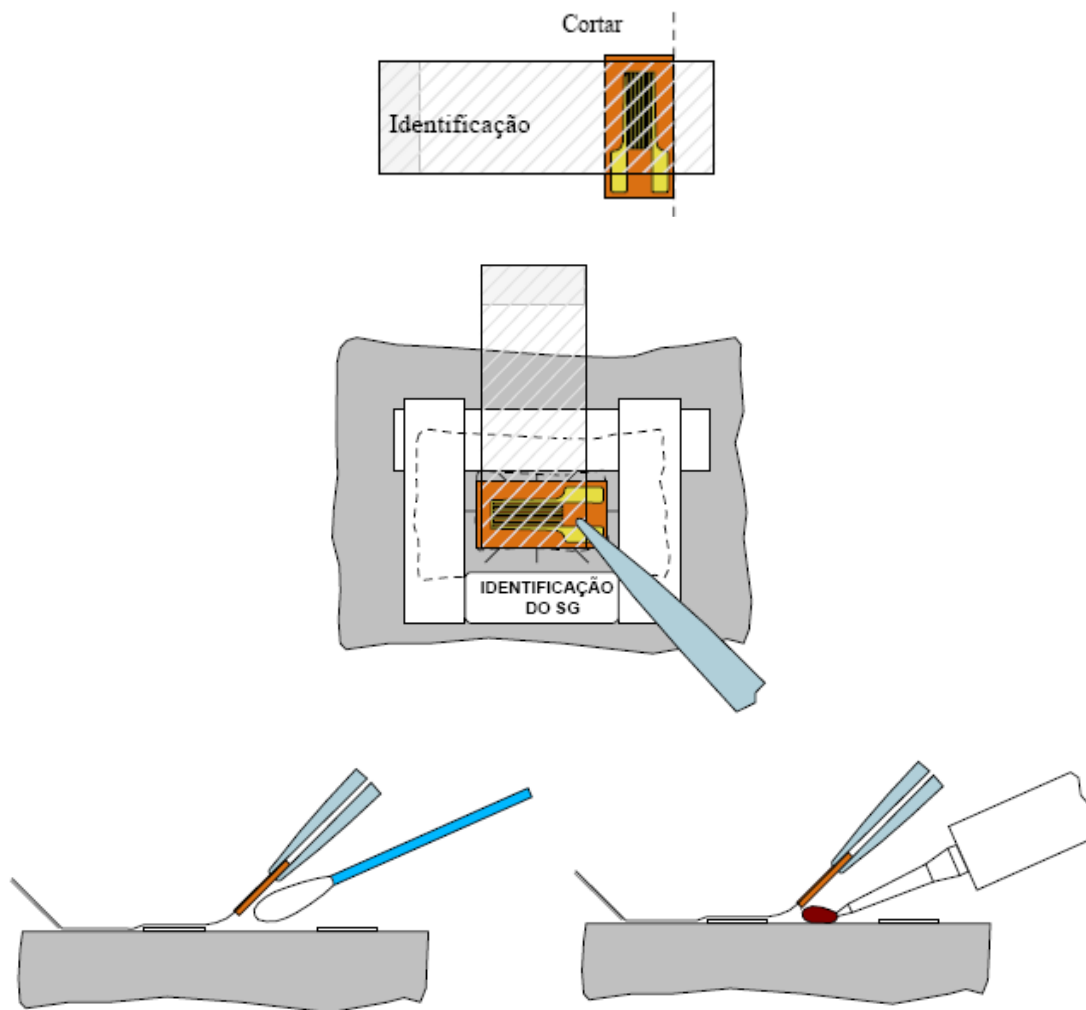


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.4 – APLICAÇÃO DE SG

Aplicação do SG

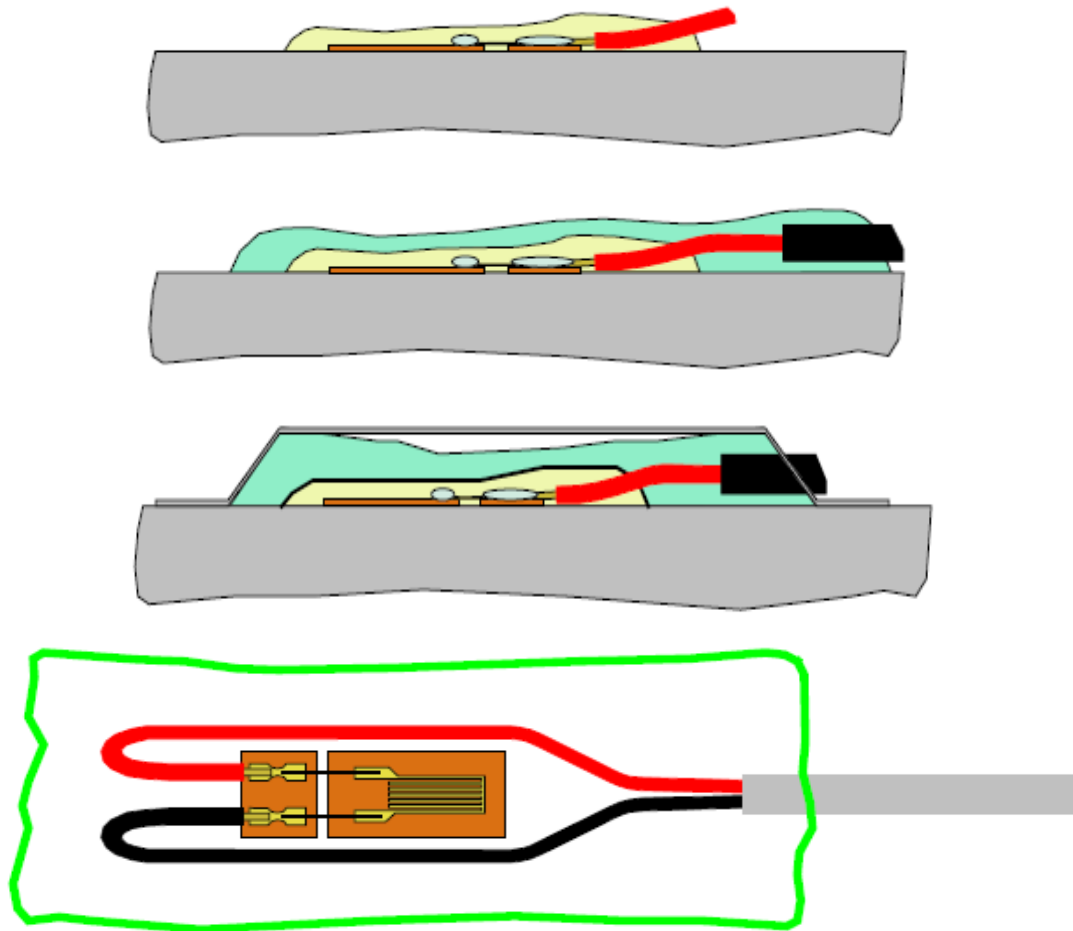


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.4 – APLICAÇÃO DE SG

Proteção da aplicação



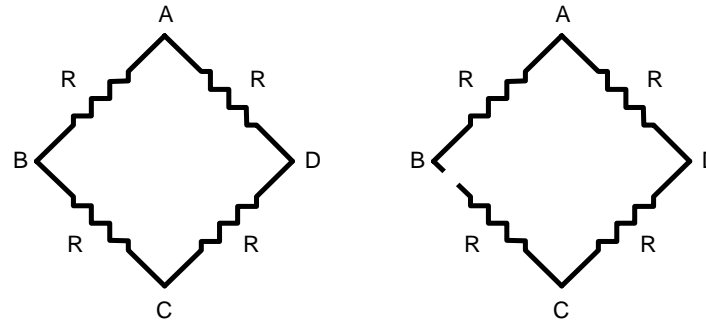
CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.4 – APLICAÇÃO DE SG

Verificação da qualidade da aplicação

Controle da ponte



Ponte fechada:

$$R_{AC} = R_{BD} = R_g ; \quad R_{AB} = R_{BC} = R_{CD} = R_{DA} = \frac{3}{4} R_g$$

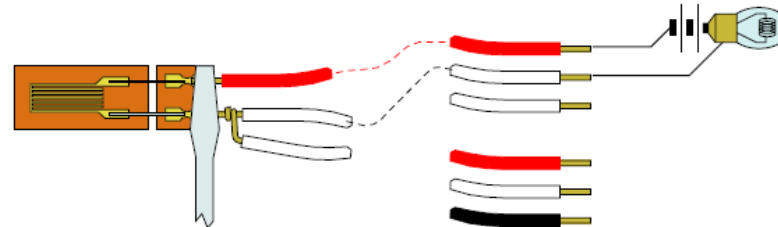
Ponte aberta:

$R_{II} = 3R_g$, sobre o ponto aberto

$R_{II} = R_g$, sobre qualquer outro ponto da ponte

$R_{AC} = R_{BD} = 2R_g$

Controle da fiação

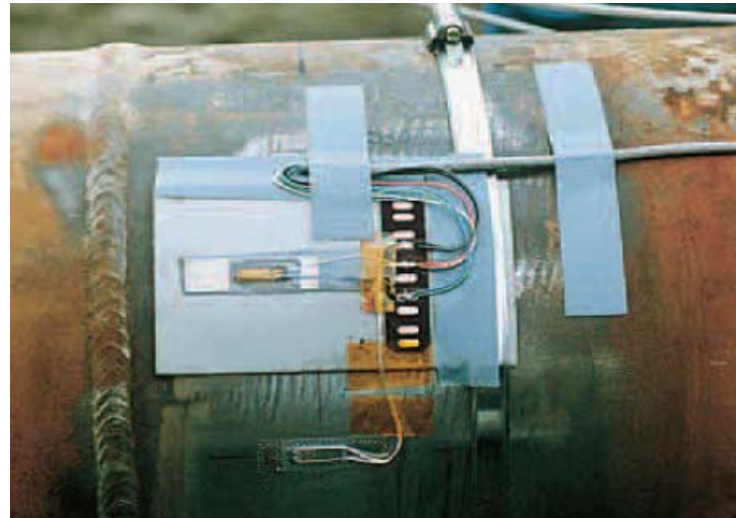


CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.4 – APLICAÇÃO DE SG

Exemplo



CURSO ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

AULA 7 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

7.4 – APLICAÇÃO DE SG

Exemplo



CURSO EXTENSOMETRIA

APÊNDICE – PROPRIEDADES DE MATERIAIS

MATERIAL	E [GPa]	ν [-]	ρ [Ω mm ² /m]	α_L - TCL [10E-6/K]	α_R - TCR [10E-6/K]	α_E - TCE [10E-6/K]
Aço	208	0,29		11,7		- 230
Aço Inox	190	0,30		17,3		
Alumínio	72	0,33		23,5		- 540
Cobre	118	0,33	0,0174	16,9	3930	
Cobre-Berílio						- 450
Níquel			0,11		5900	
Platina			0,10		3850	
Ti6A4V	115	0,34		9,5		
Vidro	70	0,24	-	9,2	-	
Balco					4500	
Constantan	162		0,48	14,9	5	
Cromel			0,90		300	
Manganina			0,43		10	
NiCr 8020			1,30		100	
					α_{GF} [10E-6/K]	
Constantan					90	
Liga K STC6					- 103	
Liga K STC13					- 149	

Materials Selection Guide for Transducer Spring Elements

MATERIAL	PROPERTIES (in "as-normally-used" condition)*								RELATIVE FIGURE OF MERIT†									REMARKS	
	1 Modulus of Elasticity, psi x 10 ⁻⁶	2 Yield Strength (0.2% offset) psi x 10 ⁻³	3 Thermal Expansion Coeff., ppm/°F	4 Density, lb/in ³	5 Max. Recommended Temperature, °F	6 Thermal Conductivity Btu hr · ft ⁻² · (°F/in)	7 Elongation, %	8 Hardness (R _c , unless noted)	9 Thermal Conductivity	10 Linearity	11 Hysteresis	12 Creep/Relaxation	13 Material Cost	14 Machinability	15 Hardening Distortion	16 Corrosion Resistance	17 Welding or Brazing Suitability		18 Lot-to-lot Consistency
High-Modulus Alloys (AISI Steels)																			
4140	30	200	6.5	0.283	+400	270	12	42-45	3	8	8	7	9	5	3	1	5	6	very good steel alloy
4340	30	210	6.3	0.283	+500	260	12	43-46	3	8	8	8	8	5	3	1	5	8	excellent steel alloy
18 Ni (250), maraging	27	245	5.6	0.289	+600	140	7-10	48-49	2	8	8	7	4	5	8	2	8	5	good, but seldom used
410 stainless	29	140	6.0	0.280	+400	170	15	39	2	7	7	6	7	4	2	6	2	6	seldom used
630 stainless (17-4 PH)	28.5	185	6.0	0.280	+400	135	14	41-44	2	7	7	7	6	6	8	7	7	3-4	widely used
631 stainless (17-7 PH)	29	220	5.7	0.276	+400	130	6-7	46-48	2	8	8	7	6	6	8	7	7	5	widely used
632 stainless (PH 15-7 Mo)	29	220	5.0	0.277	+500	110	6	47	2	8	8	8	4	6	8	7	7	5	excellent, but seldom used
S15500 stainless (15-5 PH)	28.5	185	6.0	0.280	+400	135	14	41-44	2	7	7	7	6	6	8	7	7	5-6	improved version of 630
Low-Modulus Alloys																			
2014-T6 alum. alloy	10.6	60	12.4	0.101	+200	1075	10	B 135	8	6	7	6	5	8	9	3	3	6	good
2024-T4/T351 alum. alloy	10.6	46	12.6	0.101	+200	840	18	B 120	7	6	7	6	5	8	9	3	3	6	good, widely used
2024-T81 alum. alloy	10.6	65	12.6	0.101	+250	1040	8	B 128	8	7	8	7	5	8	9	3	3	6	best of aluminum alloys
6061-T6 alum. alloy	10.0	40	12.9	0.098	+150	1160	14	B 95	8	5	4	4	6	7	8	4	5	5	fair performance
7075-T6 alum. alloy	10.4	70	12.9	0.101	+100	840	10	B 150	7	7	6	6	5	8	8	3	2	5	poor at elevated temperatures
BeCu 25 (C17200)	17	170	9.3	0.298	+250	750	2-3	40-42	7	8	8	8	2	5	9	3	4	7	excellent, but costly
6 Al 4V titanium	16.5	165	4.9	0.160	+300	50	12	40	1	7	7	7	2	3	2	8	4	5	used in special applications only
Miscellaneous Materials																			
AISI 304 stainless steel	28	150	9.6	0.290	+250	110	4-5	39	2	5	4	4	7	3	(B)	8	5	6	poor spring material
Ni-Span-C alloy	28	180	4.3	0.294	+250	90	9	37-38	1	8	8	8	3	3	4	3	5	7	very good, but costly
AZ31B magnesium alloy	6.5	32	14.5	0.064	+100	650	15	B 73	6	3	2	2	6	8	(B)	1	7	5	very poor spring material
Ceramic, Al ₂ O ₃ (99+%)	55	60-70	3.3	0.141	+500	260	(A)	Mohs:9	3	7	8	8	1-3	1	(B)	10	—	7	special applications only
Epoxy-glass laminate (high-pressure, low resin content)	5-7	70-100	5-8	0.06-0.07	100-200	2	—	—	0	5	4	3	5	3	(B)	4	—	3	special, low-accuracy applications only

*The mechanical and physical properties given in this table have been carefully selected from a wide range of sources as representative for typical transducer applications and environments.

1 for GPa, multiply by 6.9

2 for MPa, multiply by 6.9

3 from 75°F to 212°F; for ppm/°C, multiply by 1.8

4 for g/cm³, multiply by 27.7

†Numbers tabulated for FIGURE OF MERIT represent relative ratings on a scale of 0 to 10, with higher numbers indicative of more desirable qualities. The ratings are based on experience, judgment, and current practices in the transducer field.

5 transducer applications; for °C, subtract 32 and multiply by 5/9

6 for watt/m²·°C, multiply by 0.144

7 in 2-in (51-mm) gauge length

(A) no ductile range

(B) not hardenable by heat treatment

TABELA DE BITOLAS PADRÃO AWG PARA FIOS DE COBRE

Número AWG or B&S	Diametro mm	Área mm ²	Resistência Ω / m
0000	11.68	107.2	0.000161
000	10.40	85.03	0.000202
00	9.266	67.43	0.000256
0	8.252	53.48	0.000322
1	7.348	42.41	0.000407
2	6.543	33.63	0.000513
3	5.827	26.27	0.000656
4	5.189	21.15	0.000815
5	4.620	16.77	0.001028
6	4.115	13.30	0.001296
7	3.665	10.55	0.001634
8	3.264	8.366	0.002061
9	2.906	6.634	0.002599
10	2.588	5.261	0.003277
11	2.305	4.172	0.004133
12	2.053	3.309	0.005210
13	1.828	2.624	0.006571
14	1.628	2.081	0.008285
15	1.450	1.650	0.01045
16	1.291	1.309	0.01317
17	1.150	1.038	0.01661
18	1.024	0.8231	0.02095
19	0.9116	0.6527	0.02641
20	0.8118	0.5176	0.03331
21	0.7229	0.4105	0.04200
22	0.6439	0.3256	0.05295
23	0.5733	0.2582	0.06677
24	0.5105	0.2047	0.08423
25	0.4547	0.1624	0.1062
26	0.4049	0.1288	0.1339
27	0.3607	0.1021	0.1689
28	0.3211	0.08098	0.2129
29	0.2860	0.06422	0.2685
30	0.2548	0.05093	0.3385
31	0.2268	0.04039	0.4269
32	0.2019	0.03023	0.5703
33	0.1796	0.02545	0.6774
34	0.1601	0.02014	0.8561
35	0.1426	0.01597	1.0796
36	0.1270	0.01267	1.3608
37	0.1131	0.01005	1.7155
38	0.1007	0.00797	2.1632
39	0.0897	0.00632	2.7280
40	0.0799	0.00501	3.4413
41	0.0711	0.00397	4.3428
42	0.0633	0.00315	5.4733
43	0.0564	0.00250	6.8964
44	0.0502	0.00198	8.7076
45	0.0447	0.00157	10.982
46	0.0398	0.00125	13.793
47	0.0355	0.00099	17.415
48	0.0316	0.00078	22.104
49	0.0281	0.00062	27.808
50	0.0251	0.00049	35.186