

INTRODUÇÃO

- O projeto de componentes sujeitos a carga para máquinas e estruturas requer informações sobre as distribuições de forças e deformações a que esses componentes estão submetidos.
- A mecânica dos sólidos fornece uma base para prever essas características
- No entanto, medições experimentais são importantes para verificar que os objetivos de projeto foram satisfeitos.

Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

INTRODUÇÃO

➤ A deformação é uma quantidade adimensional, definida por:

$$\varepsilon = \Delta L / L$$

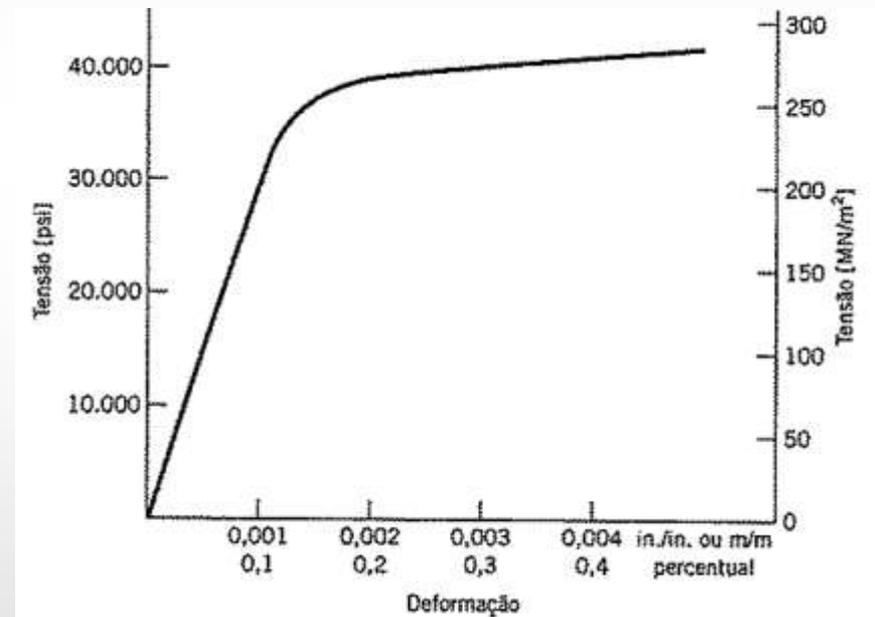
onde ΔL = acréscimo do alongamento da peça após carregamento,
 L = comprimento inicial entre 2 pontos na peça.

➤ Da lei de Hooke temos a relação entre a tensão e deformação:

$$\sigma = E\varepsilon$$

sendo E = módulo de Young
ou módulo de elasticidade do material.

➤ Como quase todos os componentes de engenharia são projetados para trabalharem na região elástica. Assim, é muito comum o uso da lei de Hooke como base para análise experimental da tensão por meio da deformação

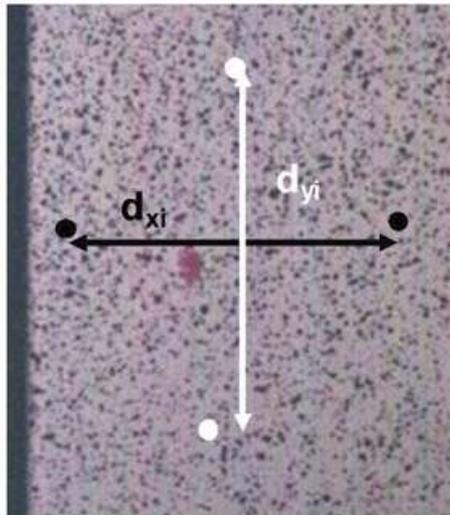


Medição de Deformação e Força

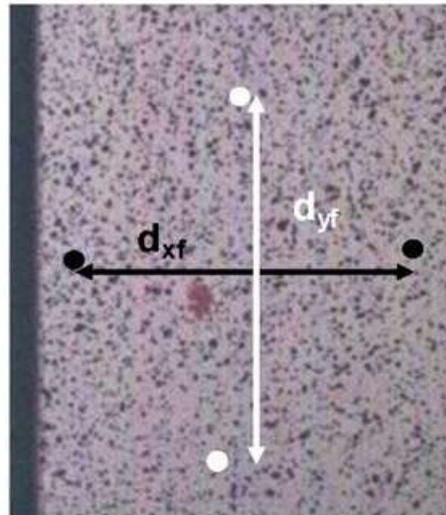
I.B De Paula

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

➤ a) **Observação de marcações na peça deformada:** gravam-se pontos de referência ou pinta-se uma determinada faixa na superfície do material. Assim, como são conhecidas as medidas de referência iniciais (antes do carregamento), determina-se o respectivo comprimento após a deformação, sendo possível então a determinação da deformação. Pode-se medir através de fotografias, microscópio, escala simples etc.



(a)



(b)

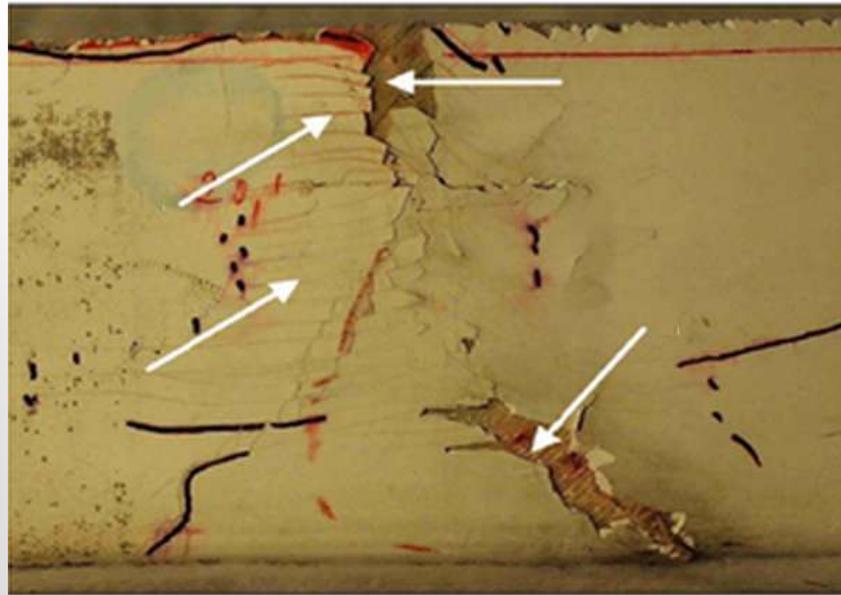
(a) imagem da superfície de um corpo sem carregamento

b) mesmo corpo com carregamento

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

b) **Recobrimentos frágeis:** usa-se para determinação de deformação localizada. As trincas no recobrimento provenientes do carregamento do material surgem quando o estado de tensões atinge um dado valor (que é fornecido pelo fabricante do material do recobrimento). Assim tem-se a deformação local.

A imagem abaixo é de uma turbina eólica submetida a carregamentos que entraram na região de deformação plástica (nesse caso houve falha estrutural).



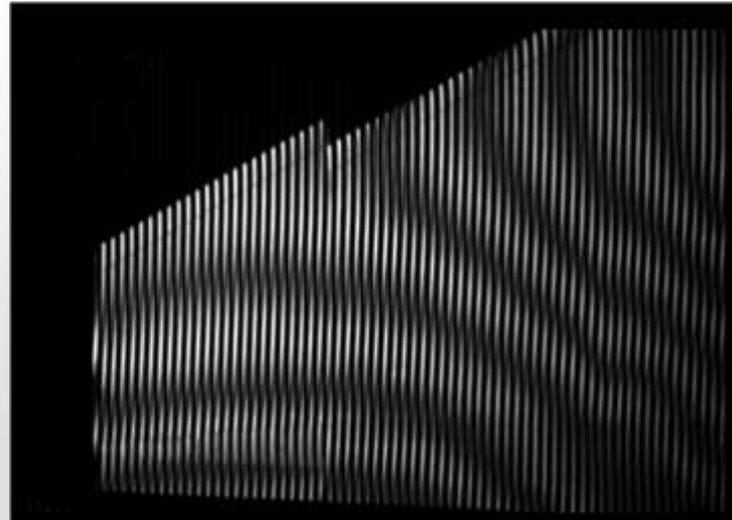
MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

➤c) **Sensores de deformação ótica** (optical strain gauge): são métodos que podem ser sofisticados e de custo elevado exigindo, frequentemente, técnicas de processamento de imagens.

Existem diversas técnicas comerciais com diferentes nomes e princípios parecidos. Dentre essas técnicas algumas foram destacadas:

- O Método de Moiré: a técnica utiliza linhas ou grades paralelas e igualmente espaçadas. Para determinar a deformação da estrutura o padrão é fixado diretamente na superfície a ser estudada.

Na condição de carregamento uma grade de referência é posicionada para comparação. Surgem então padrões de franjas que indicam posições de maior deformação. **Ex.** Modelo de asa em túnel de vento.

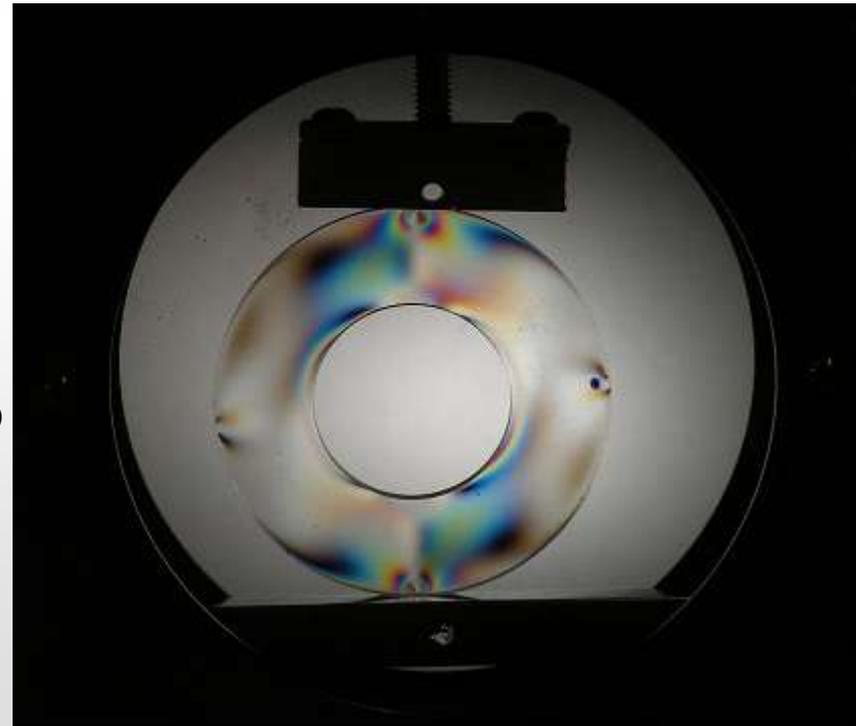


MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

➤c) **Sensores de deformação ótica** (optical strain gauge):

- Medição através de Fotoelasticidade: Esses se utilizam da anisotropia óptica de alguns materiais, quando submetidos a carga, para a medição do campo de deformações. Pode-se revestir o protótipo analisado com uma camada de material fotoelástico.

Quando visualizadas em um equipamento chamado polariscópio é possível observar regiões mais escuras onde a deformação é 0. Essas regiões são utilizadas para determinar as direções de deformação principal no modelo.



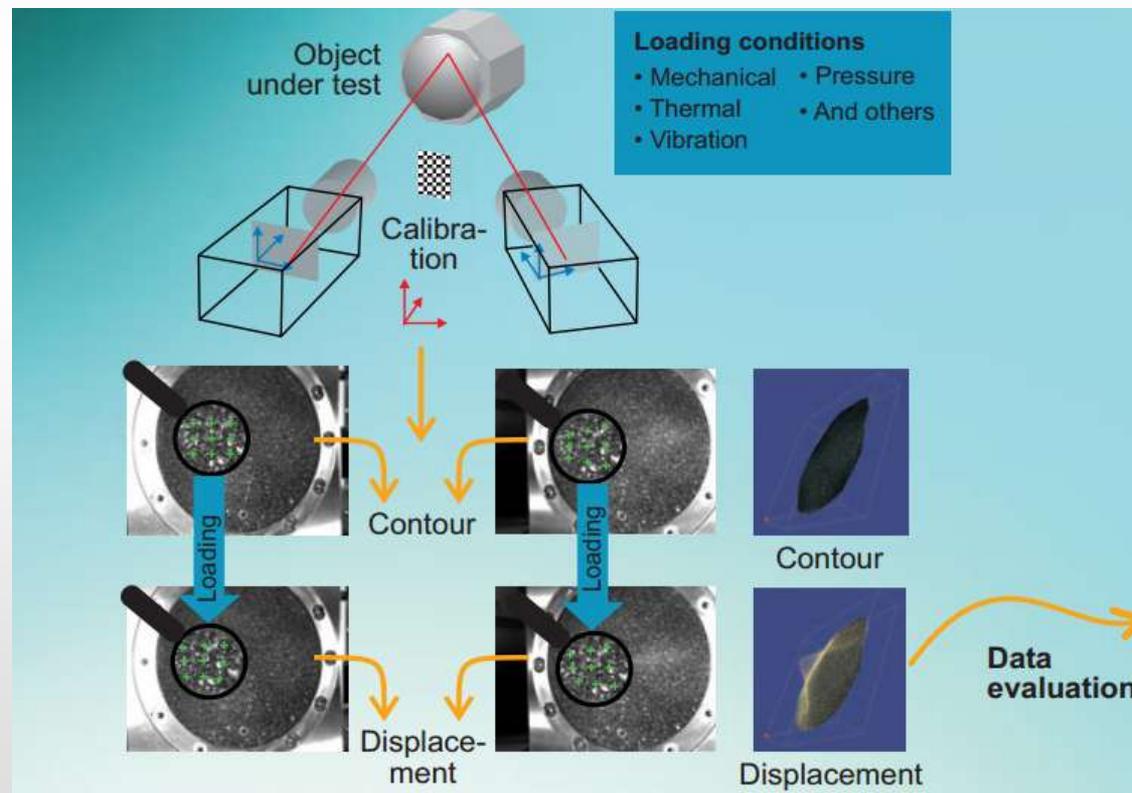
Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

➤ c) **Sensores de deformação ótica** (optical strain gauge):

• Medição através de Correlação de Imagens: Princípio parecido com o da técnica de PIV da aula passada.

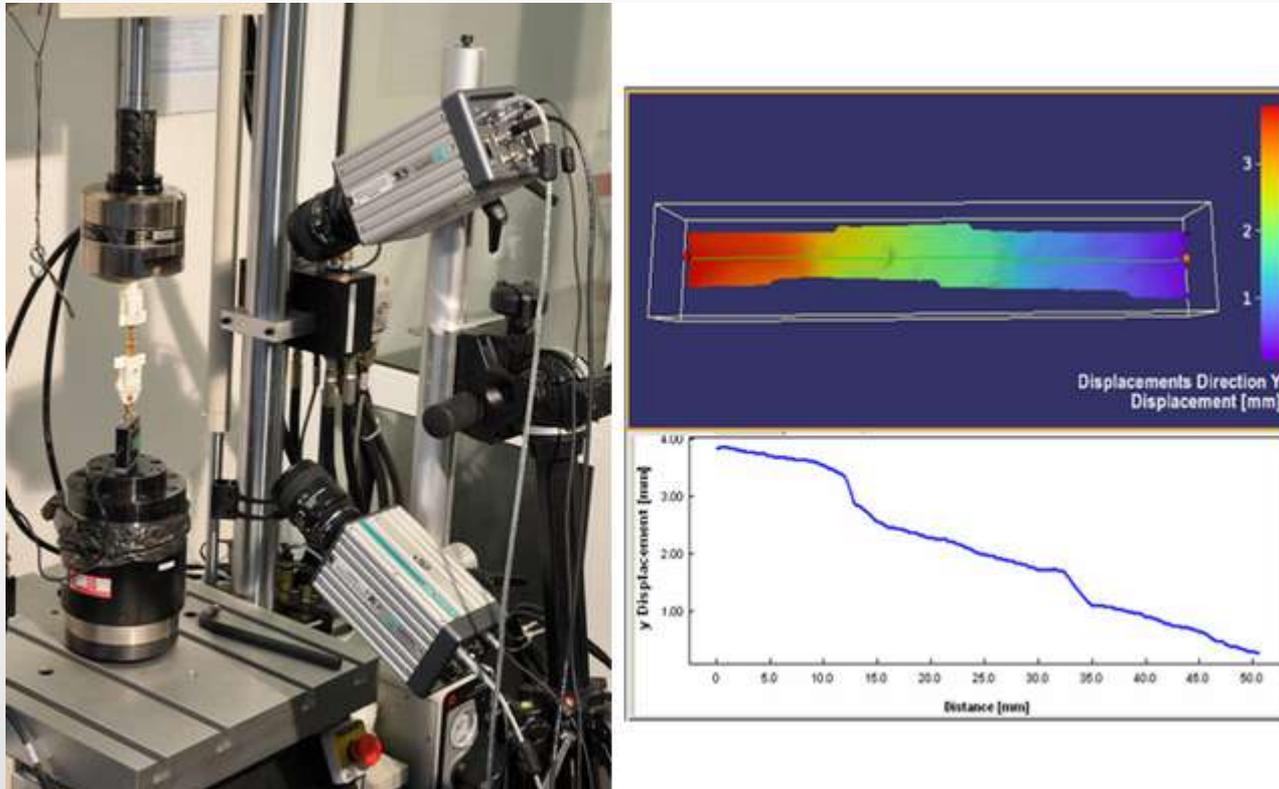


Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

➤c) **Sensor de deformação ótico** (optical strain gauge):



MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

➤d) **Extensômetro resistivo:** é o método mais utilizado. Há um elemento resistivo que se deforma quando se encontra afixado a um material sujeito a carregamento. A deformação é indicada pela medida da variação da resistência deste elemento sensor. Detalhamento deste método será dado a seguir:

Quando um material condutor está submetido à deformação, sua resistência elétrica varia. A relação entre resistência (R) e resistividade (ρ) é:

$$R=\rho L/A$$

Devido a este comportamento dos condutores e semicondutores, para que se possa na prática obter valores de deformação, cola-se uma resistência de fio numa camada de isolante muito fina(combinação de papel e plástico) sobre o objeto a ser deformado. A deformação pode ser determinada pela variação da resistência do fio, a qual pode ser medida.

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

➤d) Extensômetro resistivo

Lembrando que a relação entre resistência (R) e resistividade (ρ) é:

$$R = \rho L / A$$

Diferenciando-se a equação da resistência e dividindo-se por R , tem-se que:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

Como $dA/A = 2dD/D$, e usando-se o coeficiente de Poisson do fio, dado por $\mu = -\varepsilon_R / \varepsilon_L$, onde ε_R é a deformação na direção radial (dD/D) e ε_L a deformação na direção axial (dL/L), pode-se escrever:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_L (1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho}$$

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

➤ d) **Extensômetro resistivo**

➤ Se o material é mantido, pode-se então escrever a deformação local em função da variação da resistência e de um fator de proporcionalidade chamado de *gauge factor*, que em geral é constante para uma ampla faixa de deformações de um dado material.

$$K = \frac{dR / R}{\varepsilon_L}$$

Quanto maior o valor de K para uma mesma deformação, maior será a variação de resistência, sendo portanto, mais fácil sua medição. O gauge factor e a resistência são normalmente dados pelo fabricante de extensômetros.

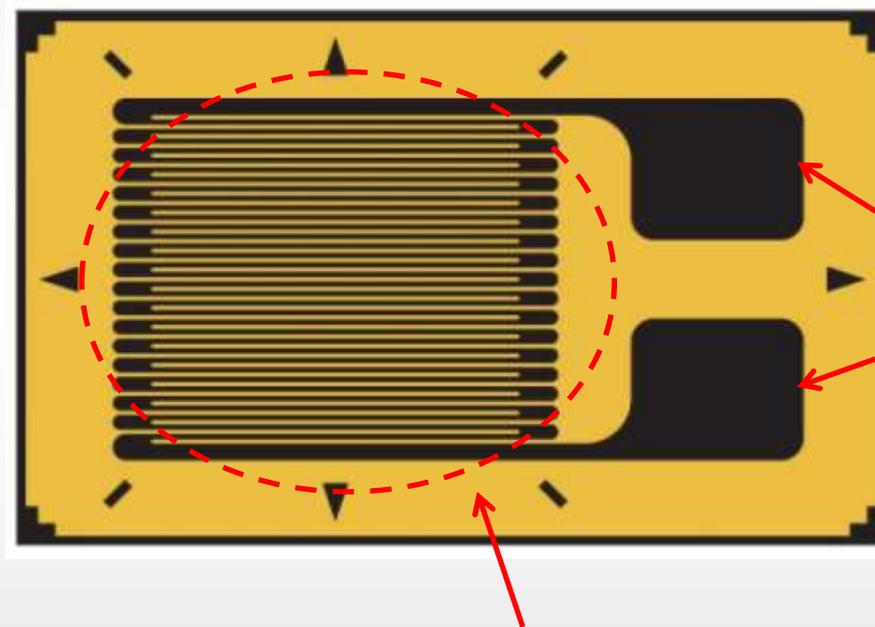
As deformações $dL/L = \varepsilon_L$ são tipicamente muito pequenas e por isso são comumente reportadas em micro strain ou $10E6 \times \varepsilon_L$

Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

➤ d) Extensômetro resistivo



Terminais para soldagem de cabos

Região sensível a deformação. Comprimento na direção axial é muito maior do que na direção lateral, além disso a área da seção dos filamentos na direção axial é muito menor. Isso faz com que o sensor seja muito mais sensível a deformações na direção axial

Medição de Deformação e Força

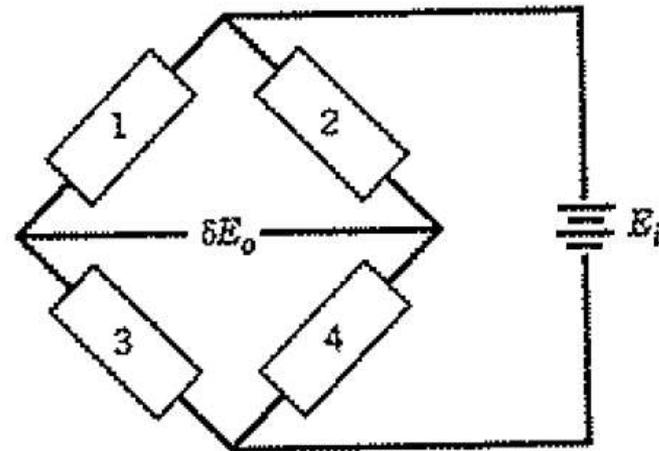
➤ d) **Extensômetro resistivo**

➤ Circuitos para medição de deformação

Apesar dos extensômetros serem construídos para maximizar a variação de resistência com a deformação, as deformações que se deseja medir são tipicamente muito pequenas. Em uma instalação típica de strain gauge em um corpo de prova de aço, por exemplo, a sensibilidade é de $10E-6 \Omega/(kN.m^2)$.

Por isso, é necessário utilizar um dispositivo que permita medir pequenas variações de resistência. De acordo com as aulas anteriores, podemos inferir qual dispositivo é empregado para esse fim: a Ponte de WheatStone.

$$\text{Se } \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \rightarrow \delta E_0 = 0;$$

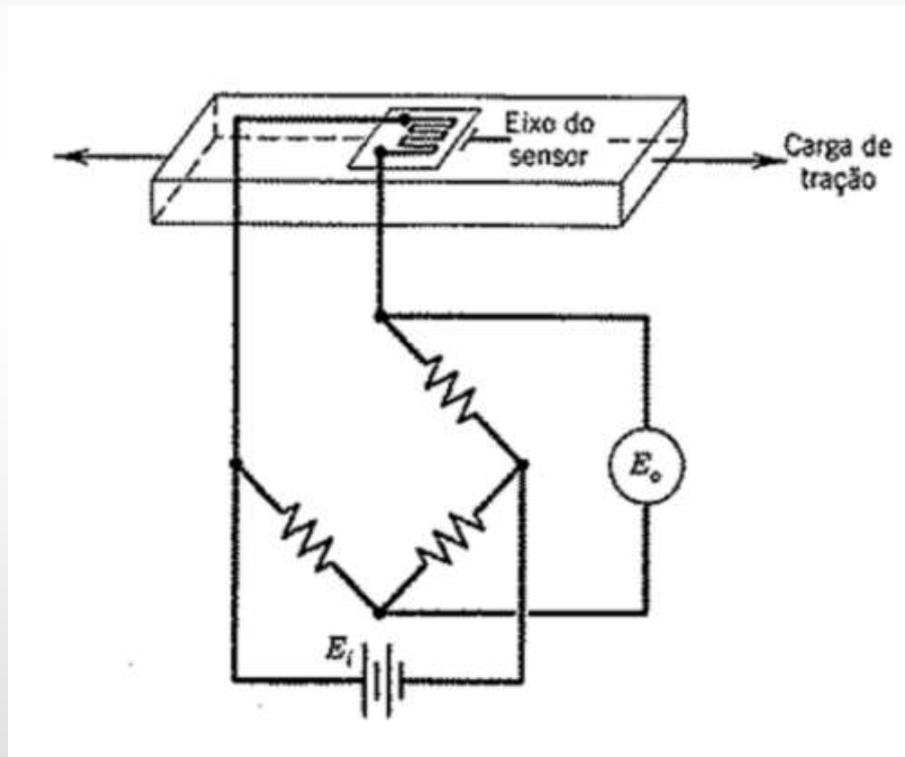


Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

- d) **Extensômetro resistivo**
- Circuitos para medição de deformação

Exemplo de arranjo para medição de carga uni-axial

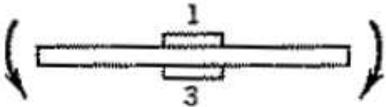
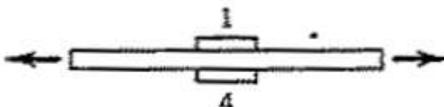
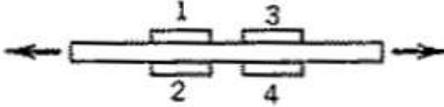
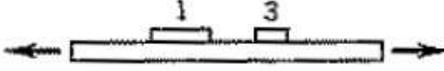
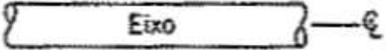
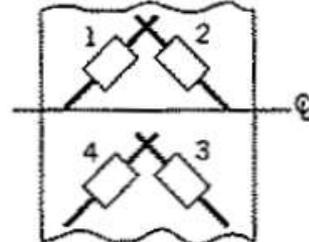


Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

➤d) Extensômetro resistivo

Arranjos típicos utilizados para aumento de sensibilidade e compensação de temperatura.

Diagrama	Arranjo	Compensação	Ganho
	Unico sensor em tensão uniaxial	Nenhuma	$\kappa = 1$
	Dois sensores medindo deformações iguais e opostas – arranjo de flexão típico	Temperatura	$\kappa = 2$
	Dois sensores em tensão uniaxial	Flexão apenas	$\kappa = 2$
	Quatro sensores com pares medindo deformações opostas	Temperatura e flexão	$\kappa = 4$
	Um sensor axial e um sensor de Poisson		$\kappa = 1 + \nu$
			
	Quatro sensores com pares medindo deformações iguais e opostas – sensíveis somente à torção. Arranjo típico de eixo.	Temperatura e axial	$\kappa = 4$

Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

➤ d) **Extensômetro resistivo**

➤ Método de Fixação dos Strain Gauges

A colagem por adesivo serve como acoplamento mecânico e térmico entre o extensômetro e o corpo de prova.

Uma ampla gama de adesivos está disponível para a colagem de extensômetros em corpos de prova. Dentre esses adesivos, destacam-se os epoxi's, os cianoacrilatos (super colas) e as colas sensíveis a pressão.

Cuidados a serem tomados no processo de colagem:

- Ter uma superfície um pouco rugosa e limpa
- Prevenir bolhas de ar embaixo do sensor. A pressão no sensor deve ser mantida durante a cura.
- Em superfícies onde há flutuações de temperatura a condutividade térmica do adesivo deve ser melhorada. Existem aditivos para os adesivos com este objetivo.

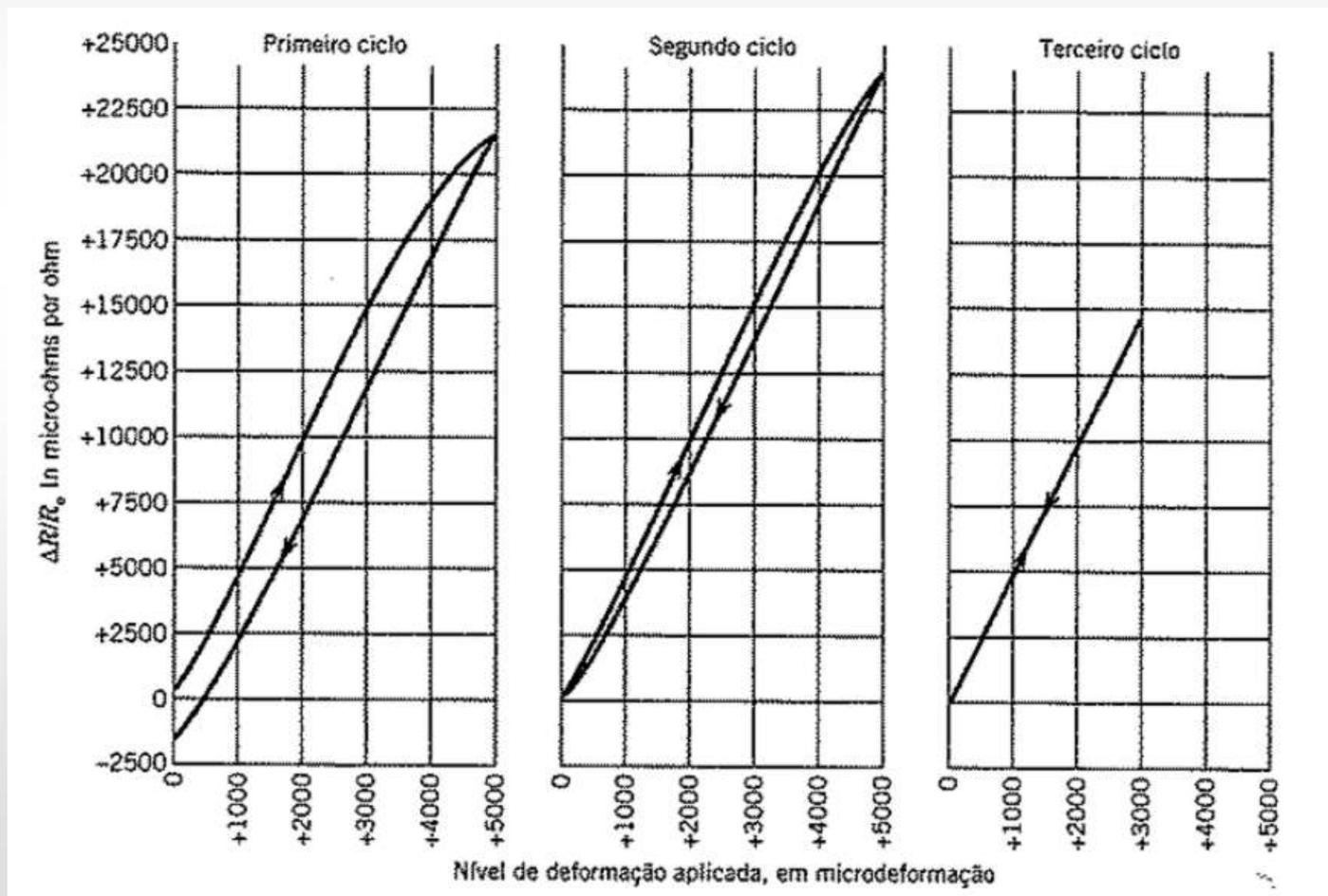
Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

➤ d) **Extensômetro resistivo**

➤ Histerese dos ciclos iniciais

Sugestão fazer alguns ciclos de carregamentos antes de realizar medições



Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

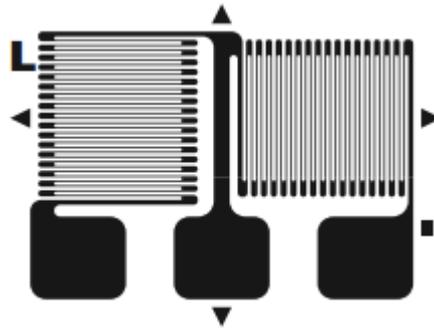
➤ d) Extensômetro resistivo

➤ Tipos de Sensores

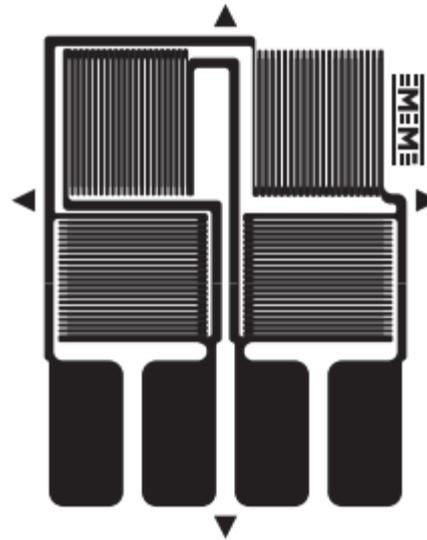
Os strain gauges podem ser usados para indicarem deformações em diferentes direções, como ilustrado nas figuras abaixo. Existem inúmeras configurações, que estão disponíveis nos catálogos dos fabricantes.



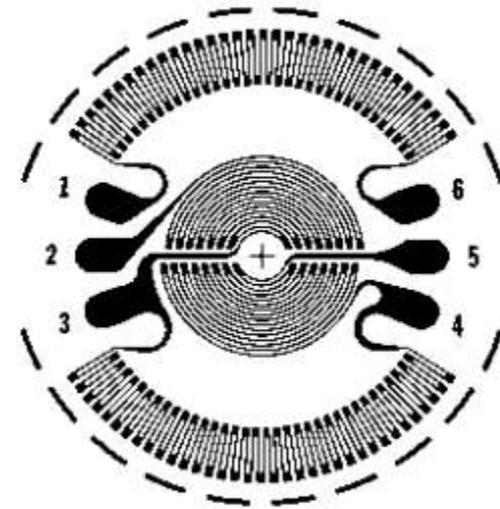
Medição de deformação a 45°



Medição de deformação axial e transversal (ou compensação de temperatura)



Arranjo em ponte completa



Roseta de ponte completa para medição de deformação radial

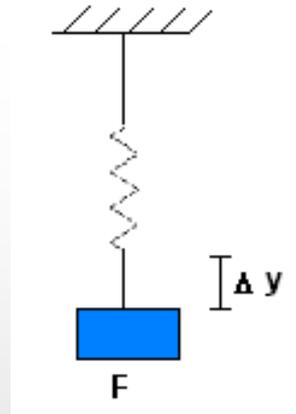
Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE FORÇA

- A força pode ser determinada através da medição da massa de um corpo, e, conhecendo-se a aceleração à qual o corpo está submetido, pela segunda lei de Newton, $F=m.a$.
- A força também pode ser determinada através de elementos elásticos, os quais indicam a magnitude desta por meio de um medidor de deslocamento. Por exemplo:

a) O sistema massa-mola



$F= K.x$, onde $K=$ constante da mola e x a deflexão da mola a partir da posição de equilíbrio.

Medição de Deformação e Força

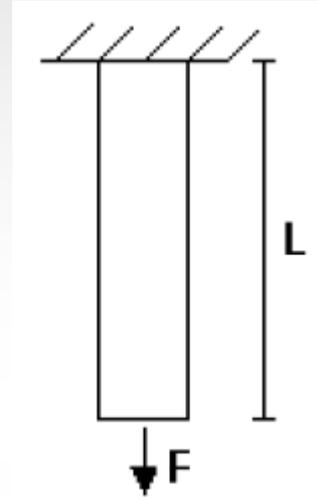
I.B De Paula

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE FORÇA

b) Uma barra elástica

$$F = \frac{AE}{L} y;$$

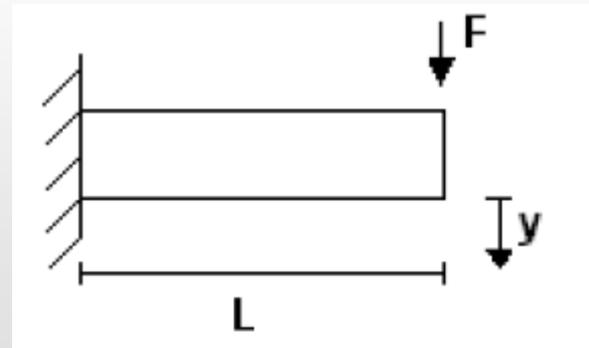
Onde A=área da seção transversal,
L= comprimento da barra e E= módulo de Young



c) Uma viga elástica

$$F = \frac{3EI}{L^3} y;$$

Onde I=momento de inércia da viga na direção de flexão



Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE FORÇA

➤ Células de Carga

Células de carga é um termo usado para descrever um transdutor que gera um sinal de tensão como resultado de uma força aplicada, em geral ao longo de uma direção específica.

Quase sempre esses medidores consistem de um medidor de deflexão acoplado a um elemento sujeito a deformação elástica.

Uma combinação muito empregada é a de strain gauges e colunas ou vigas.

Nesses casos os extensômetros são colados a um corpo com geometria projetada para exibir uma deformação linear na região onde o extensômetro é colado.

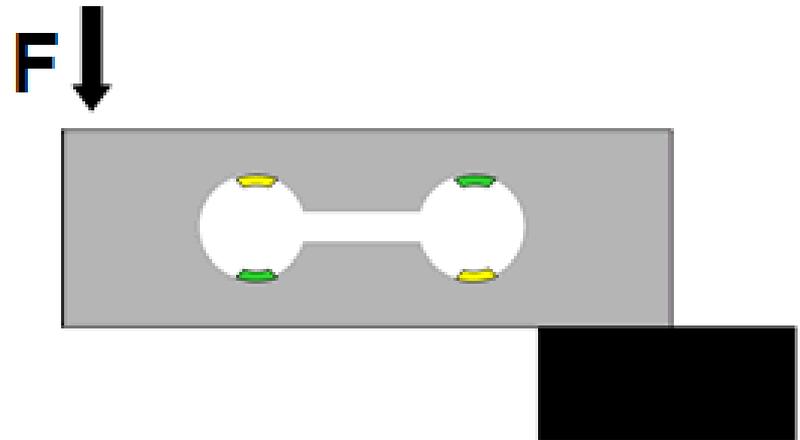
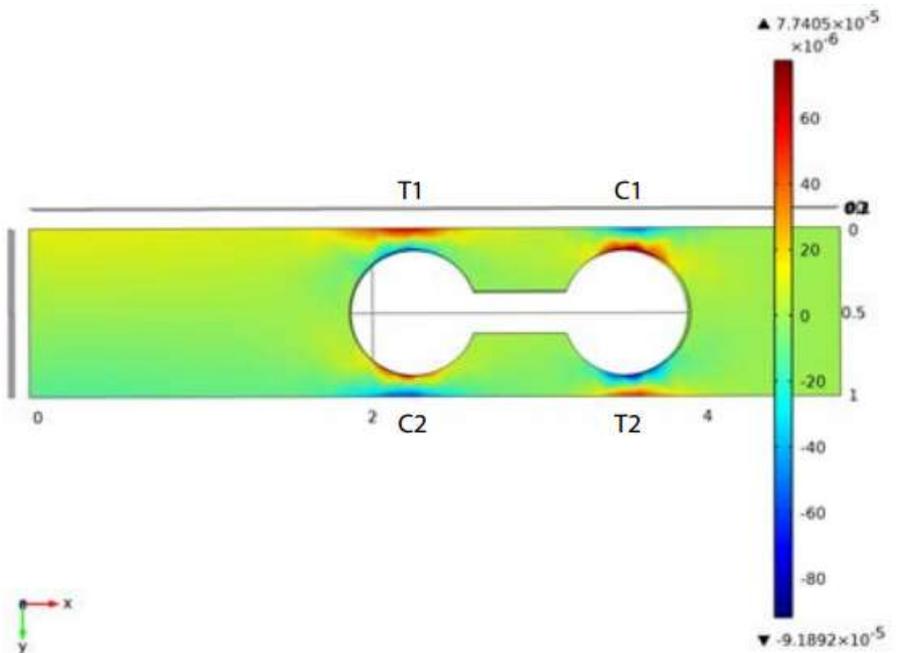
Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE FORÇA

➤ Células de Carga com Strain Gauges

Com base no projeto da viga, é possível definir pontos onde haverá maior concentração de tensão, conseqüentemente, utilizam-se esse locais para se posicionar os extensômetros. Ex.: Lado esquerdo simulação de viga submetida a carga e lado direito local de fixação dos strain gauges.



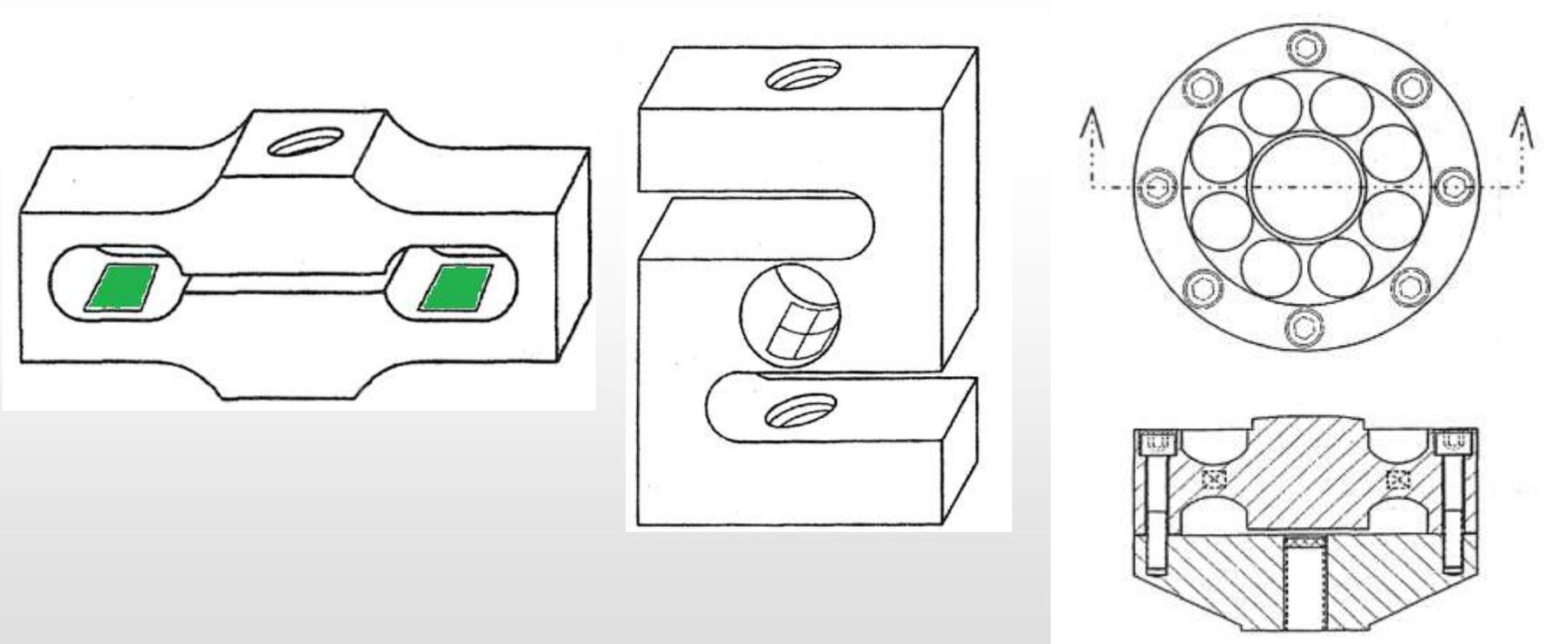
Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE FORÇA

➤ Células de Carga com Strain Gauges

Existem diversas configurações disponíveis nos catálogos dos fabricantes. Alguns exemplos são ilustrados abaixo



Medição de Deformação e Força

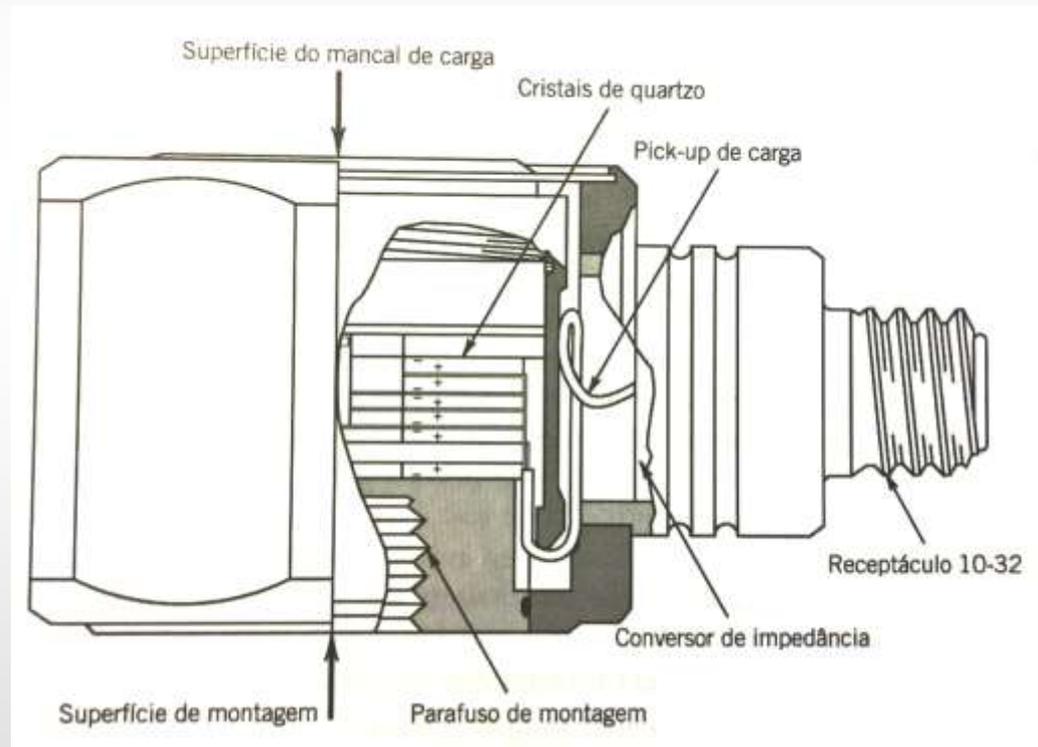
I.B De Paula

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE FORÇA

➤ Células de Carga Piezoelétricas

Os materiais piezoelétricos são caracterizados por sua capacidade de desenvolver uma carga elétrica quando submetido a uma deformação mecânica.

➤ O material piezoelétrico mais comum é o quartzo. Uma configuração típica de célula de carga piezoelétrica é mostrada ao lado.



Medição de Deformação e Força

I.B De Paula

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE FORÇA

➤ Células de Carga do tipo Anel de Prova

Este instrumento é empregado como padrão para calibrar grandes máquinas de tração. Pode-se medir deflexões muito pequenas, da ordem de $0,5 \mu\text{m}$ com este instrumento.

Através de instrumentos óticos pode-se medir a amplitude daquela vibração.

➤ Pode-se realizar a medição através de sensores de deslocamento localizados no centro ou através de extensômetros colados nas laterais do anel.

