

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Sensores Piezelétricos

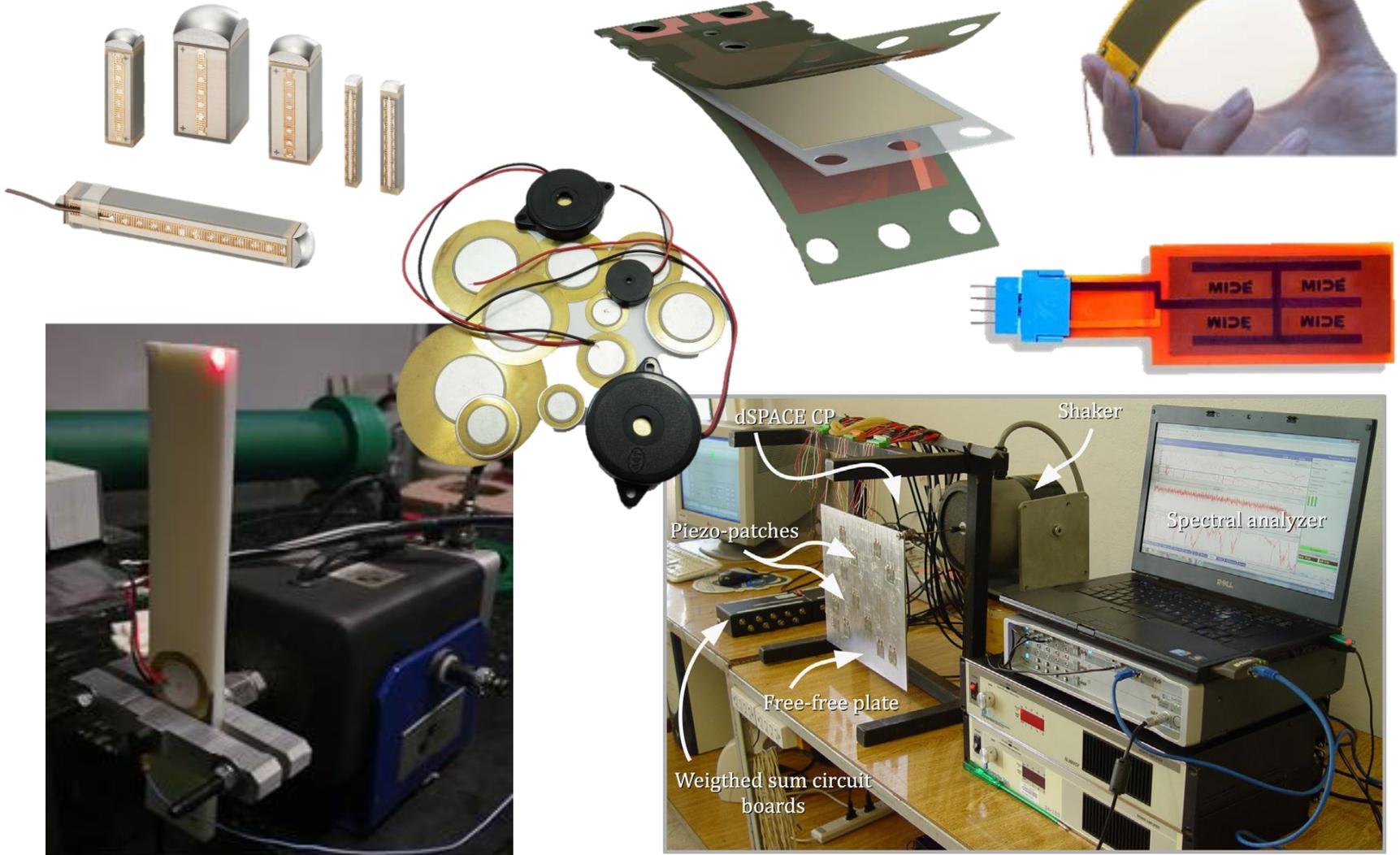
Prof.Dr. Leopoldo P.R. de Oliveira

Introdução

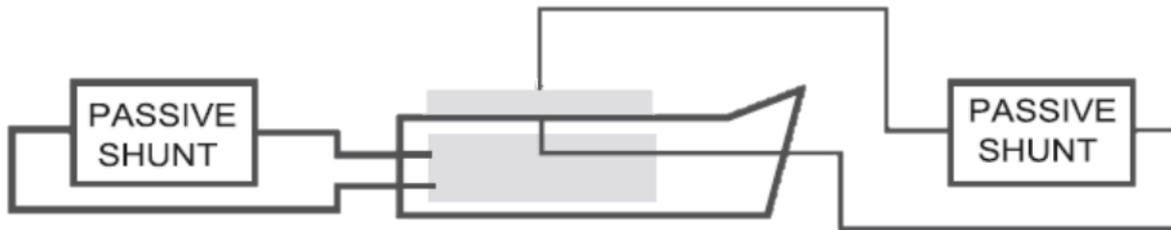
O objetivo principal deste tópico é o de apresentar os fundamentos básicos da ***transdução piezométrica***.

Elementos piezométricos são utilizados como sensores de ***forma direta*** ou como elementos de transdução em sensores como ***acelerômetros, transdutores de força, dinamômetros (usinagem), microfones***, etc.

Aplicações Típicas: uso 'direto'



Aplicações Típicas: uso 'direto'

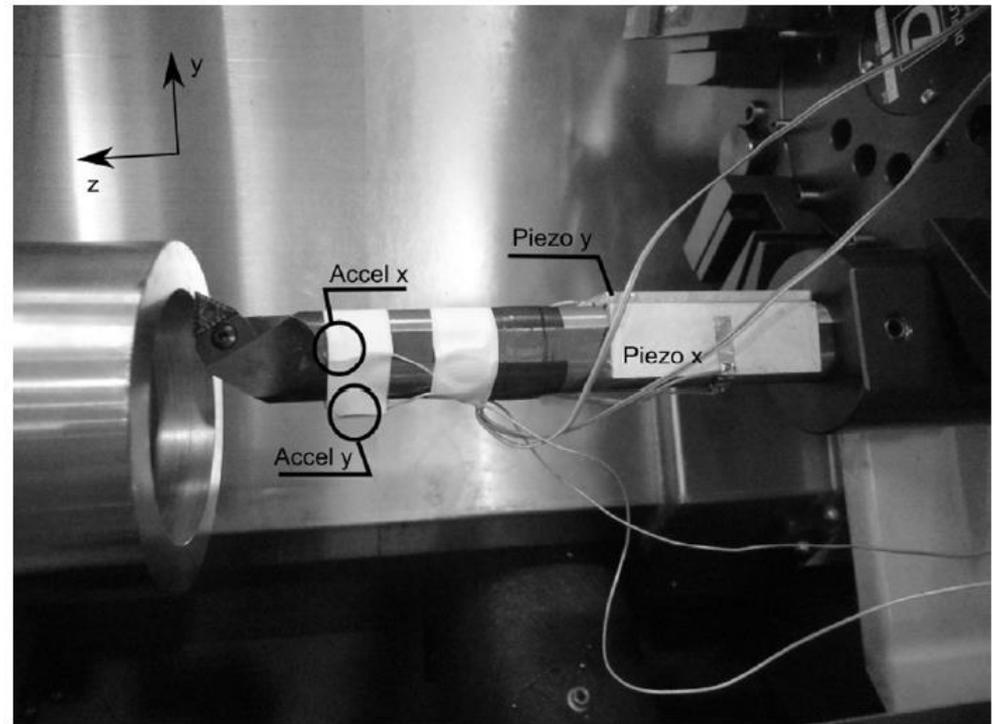


Experimental results on chatter reduction in turning through embedded piezoelectric material and passive shunt circuits

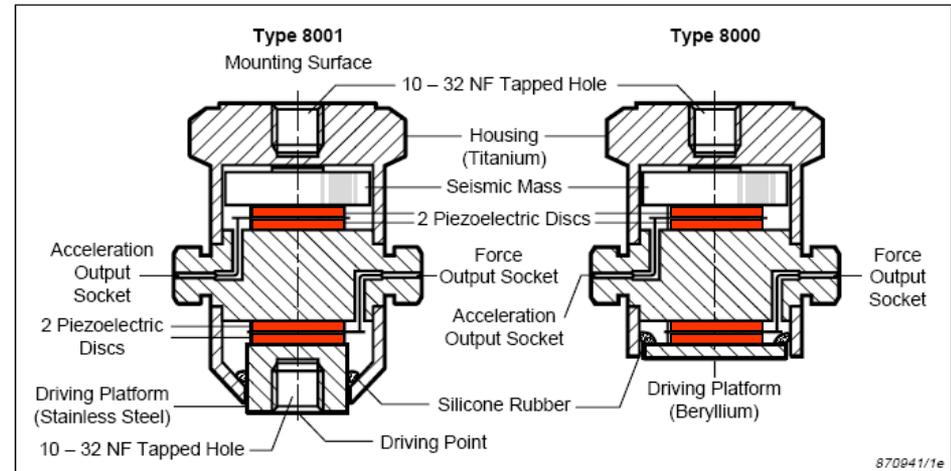
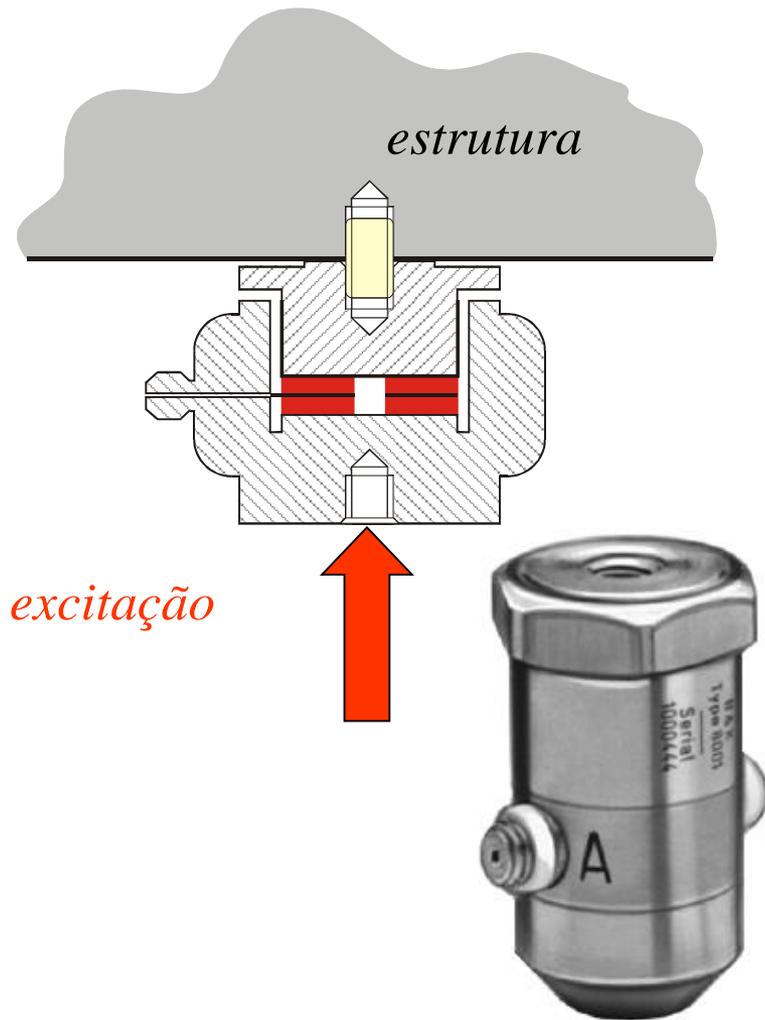
Mechatronics 29 (2015) 78–85

Maíra Martins da Silva, et al.

[10.1016/j.mechatronics.2015.06.002](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.06.002)

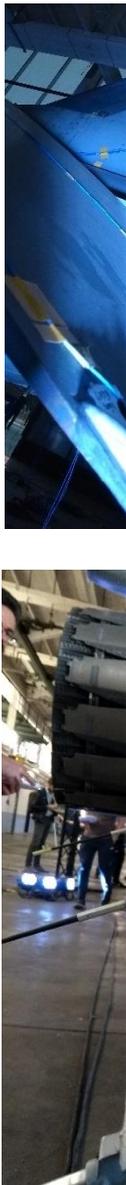


Transdutores de Força



Aplicação *GVT*

Siemens & PCB
GVT master class



Aplicações Típicas: sensores MEMS

“estado do uso”

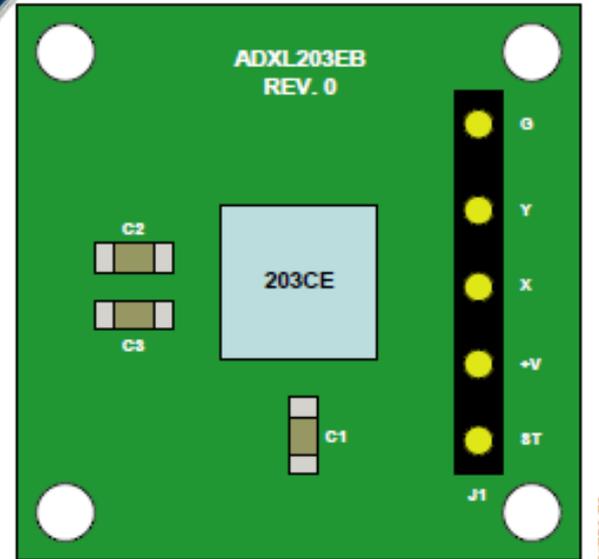
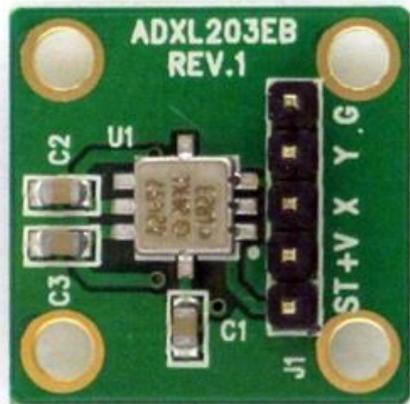
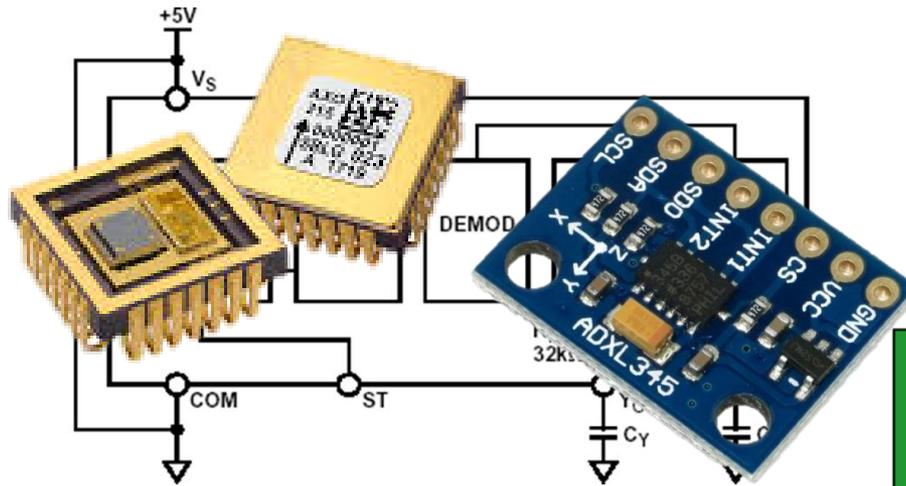
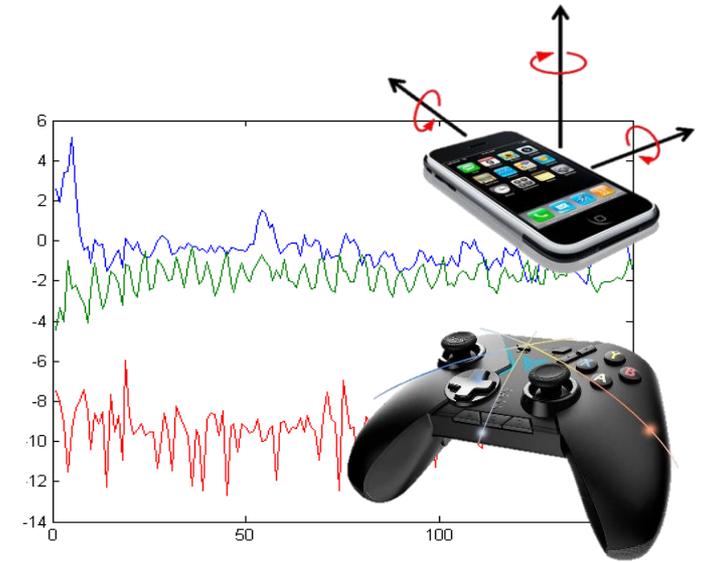
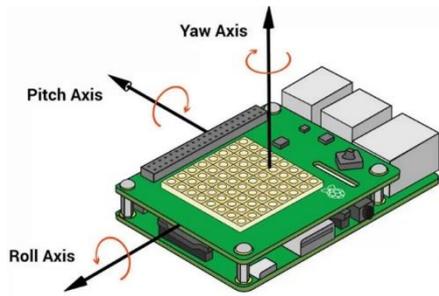


Figure 2. ADXL203EB Physical Layout

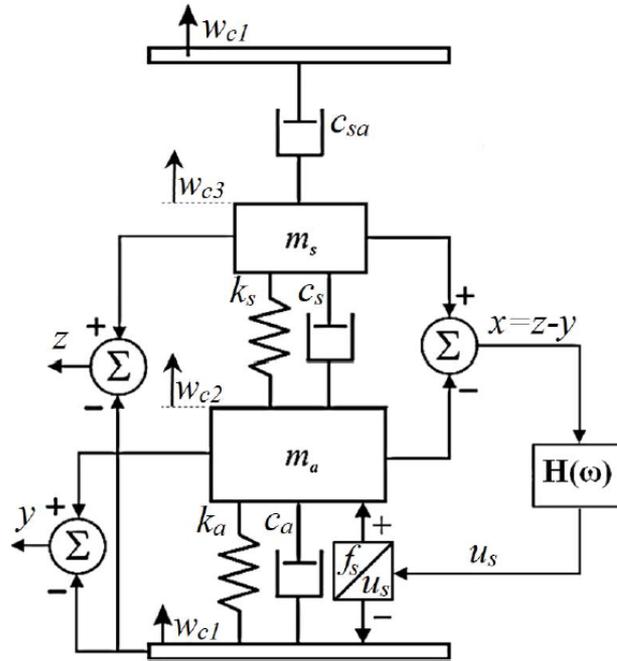
<http://www.analog.com/en/products/mems/mems-accelerometers/adxl203.html#product-overview>

Aplicações Típicas: bens de consumo



Aplicações Típicas: sensores MEMS

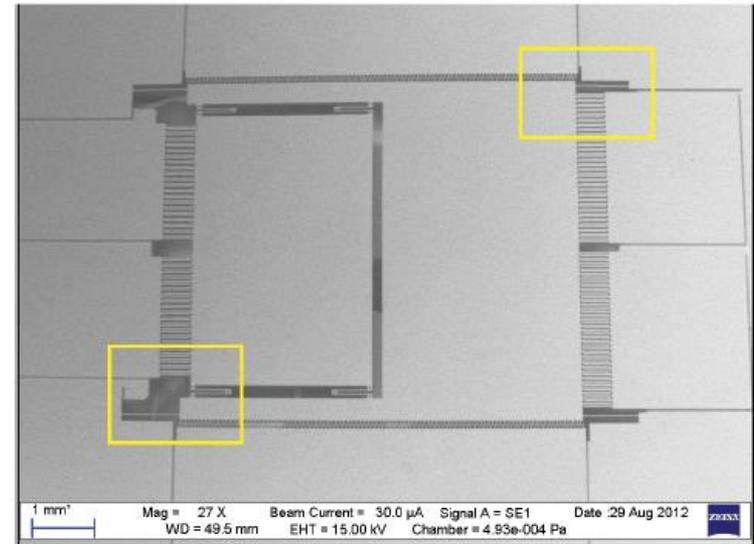
“estado da arte”



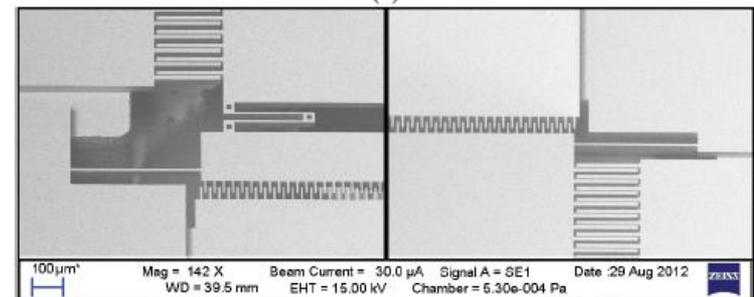
Two-Mass MEMS Velocity Sensor: Internal Feedback Loop Design

*IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 13, NO. 3, MARCH 2013
p.1003-1011*

A. Alshehri, M. Kraft & P. Gardonio



(a)



(b)

(c)

Conteúdo das aulas

Aula 1

- Princípios de transdução
 - piezelétrico
 - piezorresistivo
 - capacitivo

Aula 3

- Modelo Eletromecânico
 - condicionador
 - acel. tipo viga

Aula 2

- Sensores Piezelétricos
 - exemplos comerciais
 - modelo de acelerômetro
 - modelo de transdutor de força

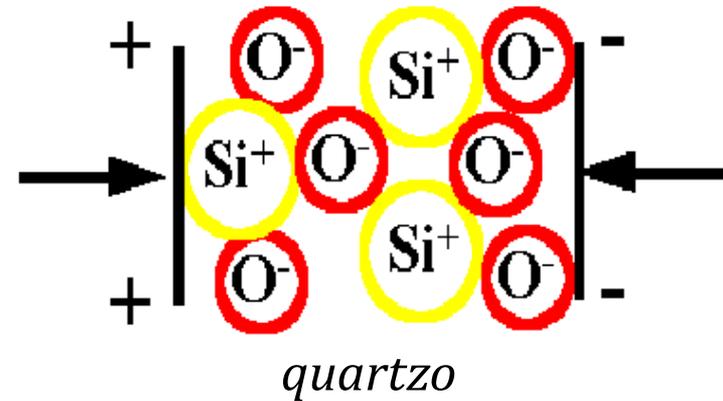
Aula 4

- Considerações práticas
- Calibração
 - acelerômetros
 - transdutores de força

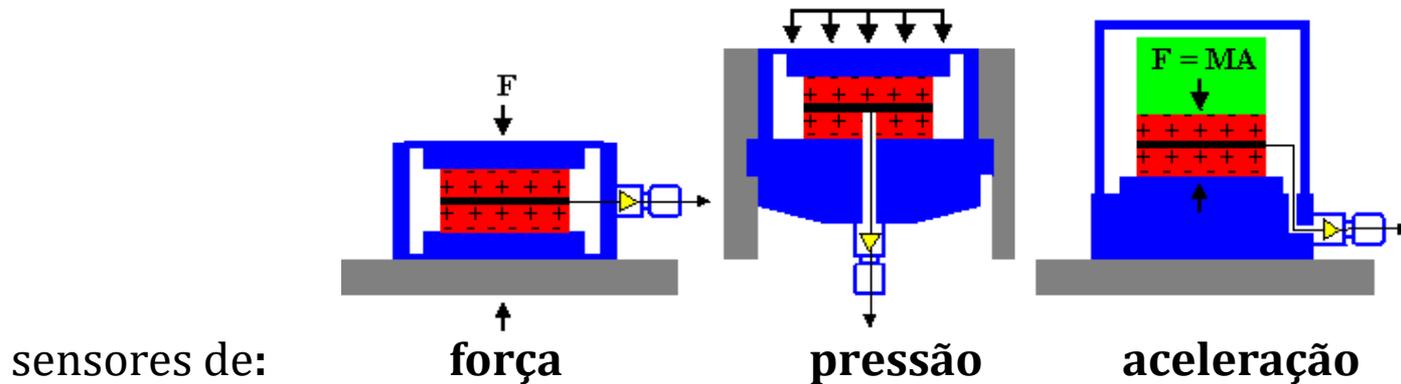
Princípios de Transdução Piezelétrica

Princípio de Transdução

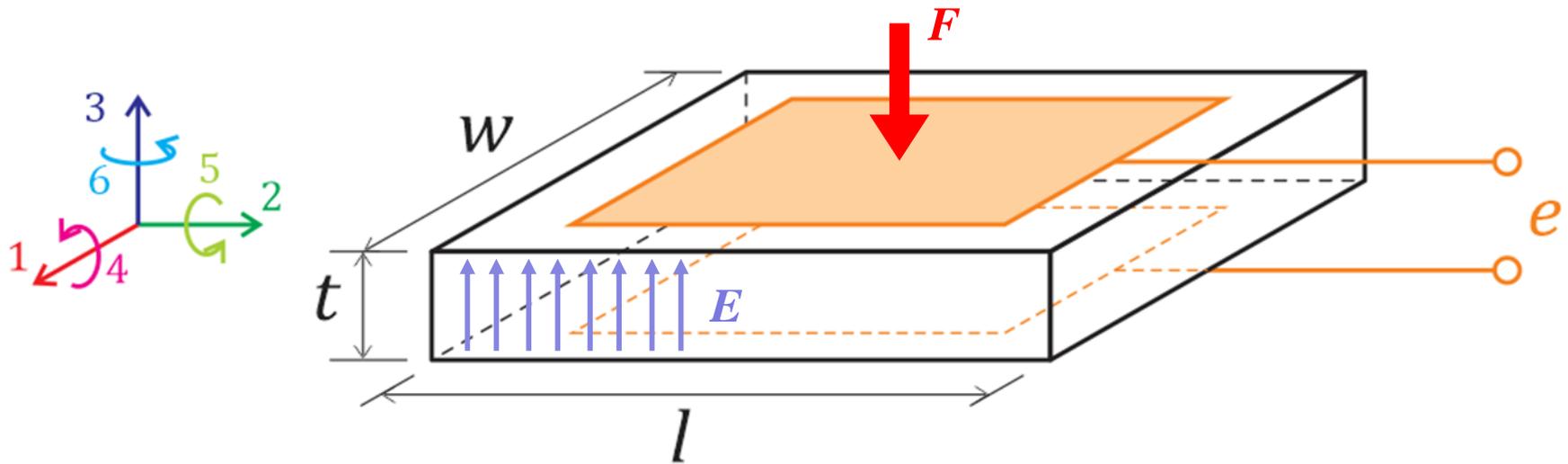
Material Piezelétrico:
Piezo => do grego, *espremer*



Diferentes configurações / grandezas



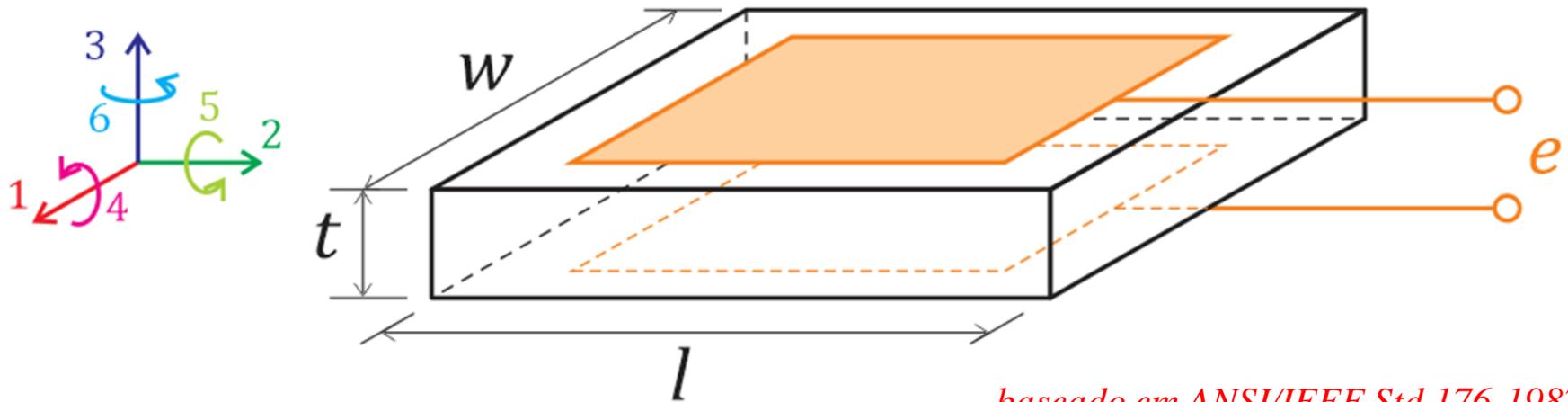
Princípio de Transdução



Dualidade de um elemento piezelétrico

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma \rightarrow C \\ V \rightarrow \varepsilon \end{array} \right.$$

Princípio de Transdução



baseado em ANSI/IEEE Std 176-1987

Hipóteses: Polarização ao longo do eixo 3 (“z”)
Simetria com relação aos três eixos

Componente de tensão mecânica (T_i)
Deformação mecânica (S_{ij})
Campo elétrico (E_k)
Deslocamento elétrico (D_k)

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{D} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}^E & \mathbf{d}^t \\ \mathbf{d} & \boldsymbol{\varepsilon}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{E} \end{Bmatrix}$$

Princípio de Transdução

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T}$$

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{E} \boldsymbol{\sigma}$$

$$[C/m^2] = [F/m][V/m]$$

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}$$

Princípio de Transdução

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d} \mathbf{E} \quad \mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} + \mathbf{d}' \mathbf{T}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{E} \boldsymbol{\sigma} \quad [C/m^2] = [F/m][V/m]$$

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}$$

Princípio de Transdução

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d} \mathbf{E} \quad \mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} + \mathbf{d}' \mathbf{T}$$

$$d_{ij}^T \rightarrow [C/N] \text{ ou } [m/V]$$

$$d = Q/F \rightarrow d_{33} = Q_3/F_3$$

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}$$

Princípio de Transdução

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d} \mathbf{E} \quad \mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} + \mathbf{d}' \mathbf{T}$$

$$d_{ij}^T \rightarrow [C/N] \text{ ou } [m/V]$$

$$d = Q/F \rightarrow d_{33} = Q_3/F_3$$

ou ainda,

$$g = \frac{e_o/t}{F/(w l)} \frac{\text{campo } [V/m]}{\text{tensão } [Pa]}$$

$$g_{33} = \frac{e_3 w l}{t F_3} = \frac{e_3 C}{\varepsilon F_3} = \frac{Q}{\varepsilon F_3} = \frac{1}{\varepsilon} d_{33}$$

Princípio de Transdução

Cristal (Quartzo)

- + piezoelectricidade natural
- + estável ao longo do tempo
- + não apresenta efeito piroelétrico
- + propriedades variam pouco com a temperatura

$$g = 60 \times 10^{-3} \left[\frac{V}{m Pa} \right]$$

$$\varepsilon = 4 \times 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$$

$$d = 2,00 \left[\frac{pC}{N} \right]$$

Cerâmica (e.g. PZT)

- polarizada artificialmente
- + disponível em diversos tamanhos e formas
- apresenta efeito piroelétrico
- propriedades podem variar com a temperatura e poder perder a polarização com temperatura excessiva

$$g = 12 \times 10^{-3} \left[\frac{V}{m Pa} \right]$$

$$\varepsilon = 2000 \times 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$$

$$d = 0,15 \left[\frac{pC}{N} \right]$$

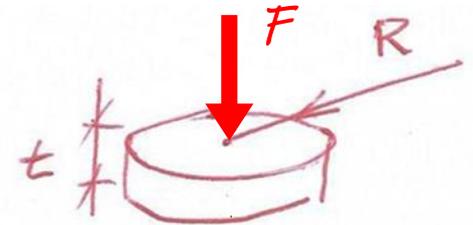
Exemplo

Calcule a sensibilidade ao deslocamento K_x de um cilindro de material piezelétrico com raio $R = 15 \text{ mm}$ e altura $t = 5 \text{ mm}$.

a) um cristal de quartzo com $E = 76 \times 10^9 \text{ Pa}$ e $d = 2,00 \text{ pC/N}$

b) uma cerâmica com $E = 50 \times 10^9 \text{ Pa}$ e $d = 0,15 \text{ pC/N}$

$$d = \frac{Q}{F} \quad (1) \quad K_x = \frac{Q}{\Delta x} \left[\frac{\text{pC}}{\mu\text{m}} \right] = ? \quad (2)$$



$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi R^2} \quad \epsilon = \frac{1}{E} \sigma = \frac{F}{E \pi R^2}$$

Exemplo

$$\Delta x = \epsilon t = \frac{F t}{E \tilde{\nu} R^2} \Rightarrow F = \frac{E \tilde{\nu} R^2}{t} \Delta x$$

em (1) e (2)

$$dF = K_x \Delta x \Rightarrow d \frac{E \tilde{\nu} R^2}{t} \Delta x = K_x \Delta x$$



$$\therefore K_x \left[\frac{\text{PC}}{\mu\text{m}} \right] = \frac{\tilde{\nu} R^2}{t} E d$$

\swarrow [PC/N]
 \nwarrow [μm]

Na próxima aula:

- Tipos de sensores piezelétricos
- Modelos matemáticos
- Considerações práticas ...