



Misure Meccaniche e Termiche ©

# MISURE DI PRESSIONE

1

## PRESSIONE



Misure Meccaniche e Termiche ©

◆ **Grandezza DERIVATA:**

$$\text{pressione} = \frac{\text{forza}}{\text{area}}$$

◆ **Grandezza di STATO:**

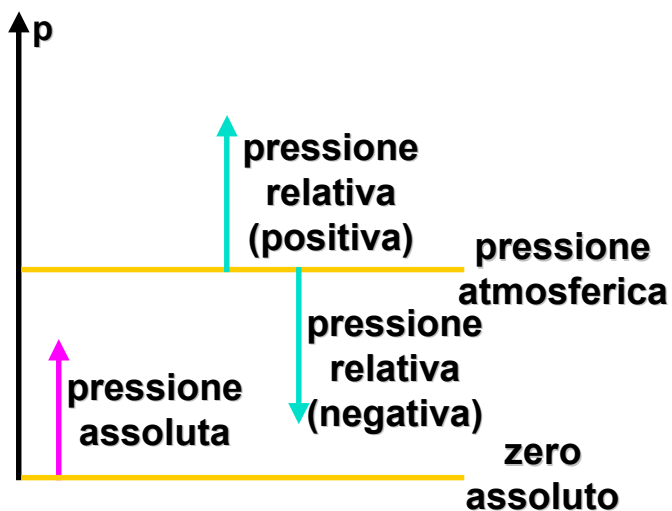
**si ragiona in termini di differenze di  
pressione**

2

## PRESSIONE



Misure Meccaniche e Termiche ©



**MANOMETRI**

**BAROMETRI**

**VACUOMETRI**

3

## UNITA' DI MISURA



Misure Meccaniche e Termiche ©

◆ **Pascal:**

$$1\text{Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{unità del SI}$$

4

## UNITA' DI MISURA



### ◆ Tabella di conversione:

Misure Meccaniche e Termiche ©

	Pa	bar	$\frac{\text{kg}_f}{\text{m}^2}$	atm
1 Pa	1	$10^{-5}$	0,102	$0,987 \cdot 10^{-5}$
1 bar	$10^5$	1	$1,02 \cdot 10^4$	0,99
1 $\frac{\text{kg}_f}{\text{m}^2}$	9,81	$9,81 \cdot 10^{-5}$	1	$9,68 \cdot 10^{-5}$
1 atm	$1,013 \cdot 10^5$	1,01	$1,033 \cdot 10^4$	1

5

## UNITA' DI MISURA



Misure Meccaniche e Termiche ©

- ◆ 1 hPa = 100 Pa     ◆ 1 dyn/cm<sup>2</sup> = 0,1 Pa
- ◆ 1 kPa = 1000 Pa     ◆ 1 kgf/cm<sup>2</sup> = 98066,5 Pa
- ◆ 1 MPa = 10<sup>6</sup> Pa     ◆ 1 kgf/m<sup>2</sup> = 9,80665 Pa
- ◆ 1 mbar = 100 Pa     ◆ 1 mmHg = 133,322 Pa
- ◆ 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa     ◆ 1 torr = 133,322 Pa
- ◆ 1 hbar = 10<sup>7</sup> Pa     ◆ 1 atm = 101325 Pa

6

## UNITA' DI MISURA



Misure Meccaniche e Termiche

- ◆  $1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9,806 \text{ Pa}$  ◆  $1 \text{ tonf/in}^2 = 15444300 \text{ Pa}$
- ◆  $1 \text{ mH}_2\text{O} = 9806,65 \text{ Pa}$  ◆  $1 \text{ tonf/ft}^2 = 107252 \text{ Pa}$
- ◆  $1 \text{ psi} = 6894,76 \text{ Pa}$  ◆  $1 \text{ inHg} = 3386,39 \text{ Pa}$
- ◆  $1 \text{ lbf/in}^2 = 6894,76 \text{ Pa}$  ◆  $1 \text{ inH}_2\text{O} = 249,089 \text{ Pa}$
- ◆  $1 \text{ lbf/ft}^2 = 47,8803 \text{ Pa}$  ◆  $1 \text{ ftH}_2\text{O} = 2989,07 \text{ Pa}$
- ◆  $1 \text{ pdf/ft}^2 = 1,48816 \text{ Pa}$  ◆  $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$

7



Misure Meccaniche e Termiche ©

## PERCHE' E QUANDO SI MISURANO LE PRESSIONI

8



# MANOMETRI Misure Meccaniche e Termiche

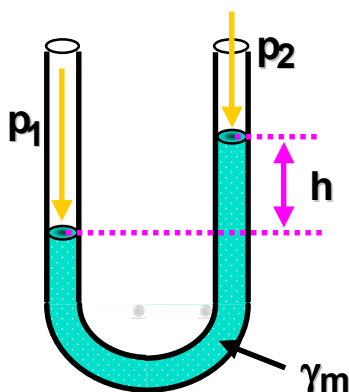
- ◆ **Colonna di liquido**
- ◆ **A deformazione**

9

## MANOMETRI A COLONNA DI LIQUIDO (DIFFERENZIALI)



Misure Meccaniche e Termiche



$$p_1 = p_2 + gh\rho_m$$

$$p_1 - p_2 = gh\rho_m = \gamma_m h$$

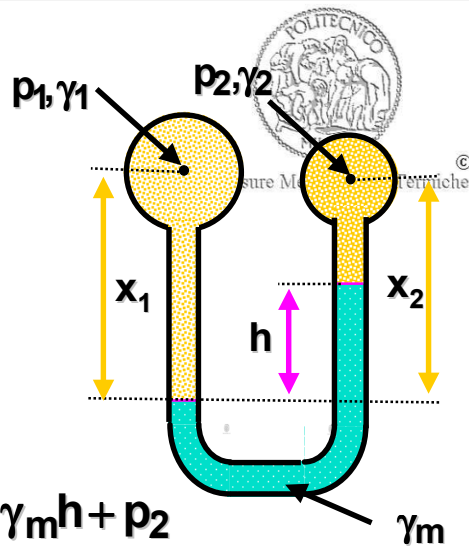
◆ **Se  $p_2 = p_{\text{atmosferica}}$ :**

**$\gamma_m h =$  pressione relativa**

**Sensibilità  $\uparrow$  se  $\gamma_m \downarrow$**

10

◆ **Caso generale:**



$$\gamma_1 x_1 + p_1 = \gamma_2 (x_2 - h) + \gamma_m h + p_2$$

$$p_1 - p_2 = \gamma_2 x_2 - \gamma_1 x_1 + h(\gamma_m - \gamma_2)$$

Se  $\gamma_1 \ll \gamma_m$  e  $\gamma_2 \ll \gamma_m$ :  $p_1 - p_2 \approx h \gamma_m$

11

**In generale:**

$$p_1 - p_2 = h(\gamma_m - \gamma_2)$$

**A pari  $\Delta p$ : sensibilità  $\uparrow$  se  $\gamma_m - \gamma_2 \downarrow$**

$$\Delta p_{\max} \approx 10^5 \text{ Pa (1 atm)}$$

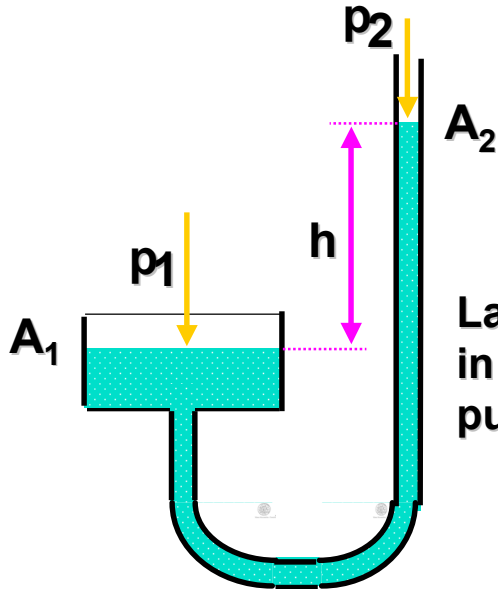
**$\gamma_m$  e  $\gamma_2$  sono funzioni della temperatura**

12

# MANOMETRO A POZZETTO



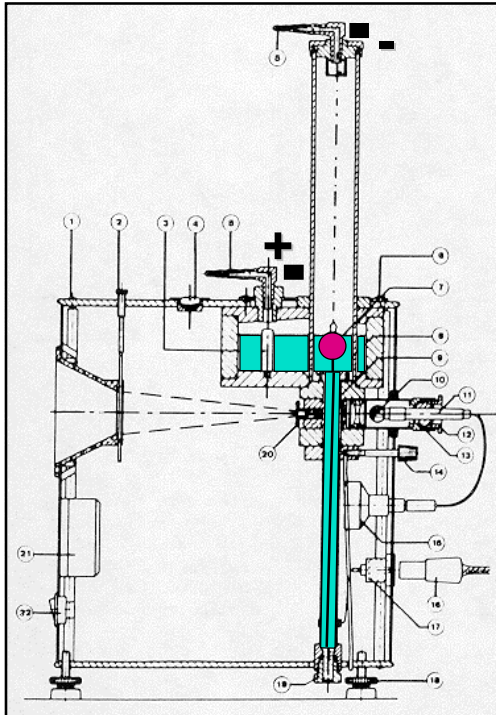
Misure Meccaniche e Termiche ©



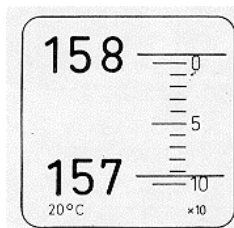
$$A_1 \gg A_2$$

La variazione di livello in corrispondenza di  $p_1$  può essere trascurata

13



Fondo scala: 2500 Pa ©



lettura:

1579. ...  
1579.3 ?

14

## CARATTERISTICHE:



Misure Meccaniche e Termiche ©

- ◆ **campo di misura: 0 - 10000 Pa**
- ◆ **risoluzione dichiarata: 0,1 Pa**
- ◆ **accuratezza: 0,05% del fondo scala**

15

## CARATTERISTICHE:

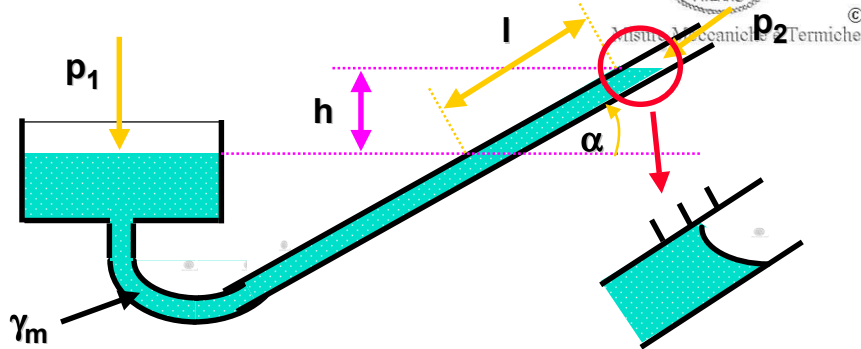


Misure Meccaniche e Termiche ©

- ◆ **liquido manometrico: acqua distillata**  
**più additivi per ridurre la tensione superficiale**
- ◆ **la taratura si intende a condizioni standard ( $p = 1 \text{ atm}$   $T = 20^\circ\text{C}$ ).**  
**Sono previste correzioni per tarature in condizioni non standard**

16

## MANOMETRO A TUBO INCLINATO



Sensibilità  $\uparrow$  se  $\alpha \downarrow$   $p_1 = p_2 + \gamma_m (l \cdot \sin \alpha)$

Inclinazione massima limitata dalla capillarità,

## LIQUIDI MANOMETRICI PER MANOMETRI A COLONNA DI LIQUIDO

- ◆ **MERCURIO:** pressioni di acqua, gas o vapore in cui non interessi una elevata sensibilità (non evapora);
- ◆ **ACQUA:** piccole pressioni di gas con sensibilità buona;

## LIQUIDI MANOMETRICI PER MANOMETRI A COLONNA DI LIQUIDO



Misure Meccaniche e Termiche ©

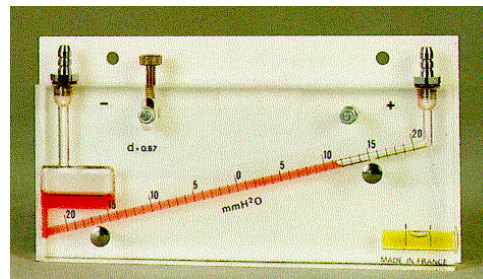
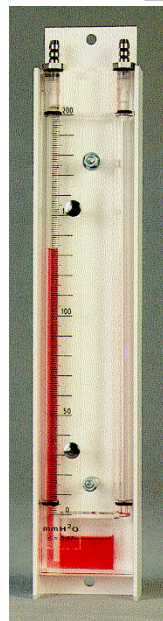
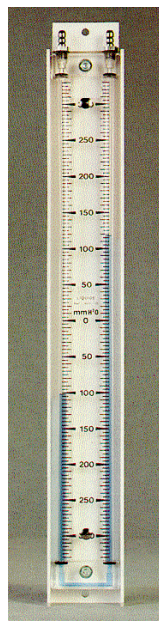
- ◆ **OLIO:** pressioni di gas molto piccole con elevata sensibilità;
- ◆ **TOLUOLO:** elevata sensibilità, ma  $\gamma_m$  varia con la temperatura. Ha problemi di capillarità.
- ◆ **MISCELE DI ALCOL E BENZINA**

19

## ESEMPI

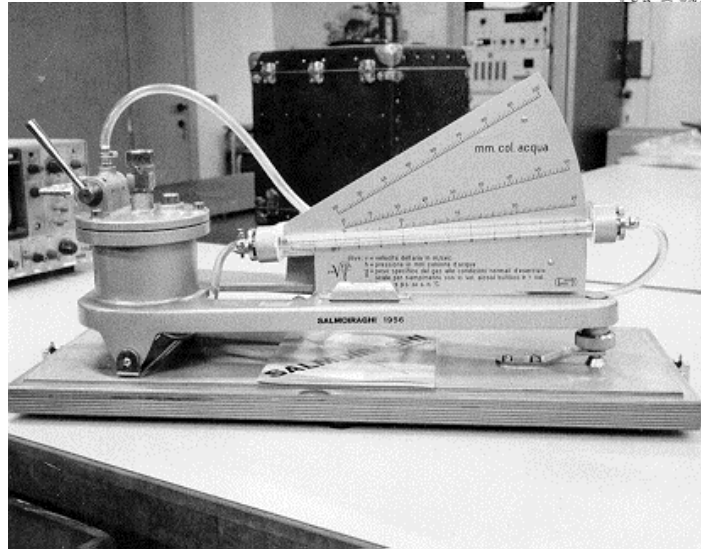


Misure Meccaniche e Termiche ©



20

## ESEMPI



**A inclinazione variabile**

21

## MANOMETRI A DEFORMAZIONE

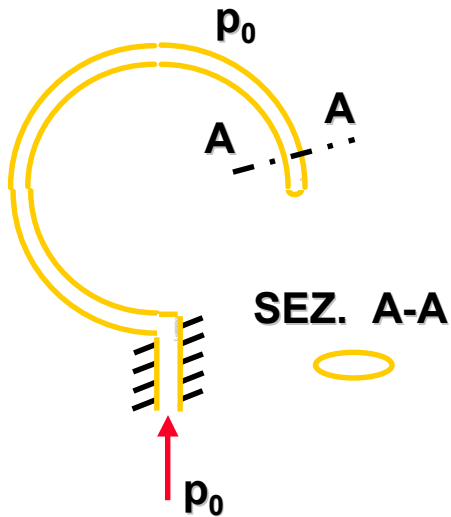
- ◆ **TUBO BOURDON**
- ◆ **MANOMETRI A MEMBRANA**
- ◆ **MANOMETRI A SOFFIETTO**

22

## TUBO BOURDON



Misure Meccaniche e Termiche ©



◆ Tubo a sezione ellittica

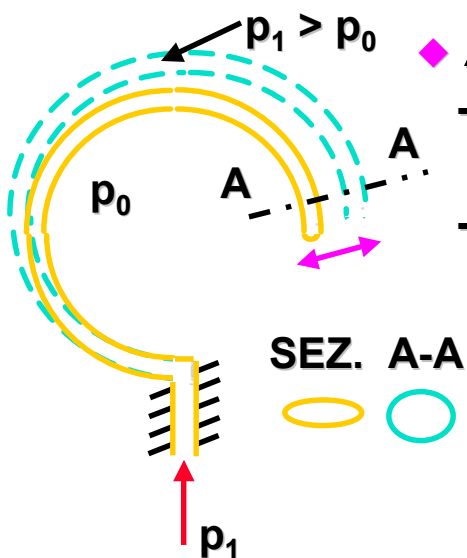
◆ Asse ad arco di circonferenza

23

## TUBO BOURDON



Misure Meccaniche e Termiche ©

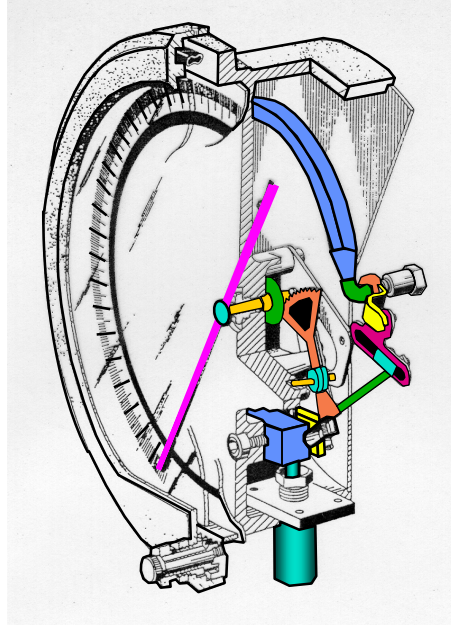


◆  $\Delta p$ :

- la sezione tende a diventare circolare;
- l'asse tende a diventare rettilineo

24

## TUBO BOURDON



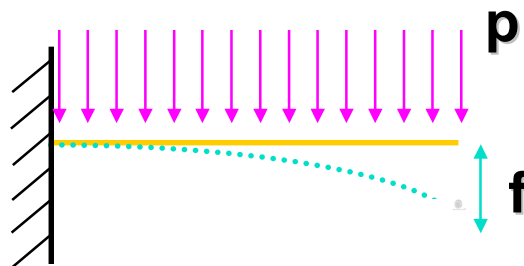
©  
Misure Meccaniche e Termiche

25

## SENSIBILITA' E FONDO SCALA



- ◆ **modulo di elasticità del materiale;**
- ◆ **forma della sezione;**
- ◆ **angolo di avvolgimento;**
- ◆ **spessore del tubo**



26

## SENSIBILITA' E FONDO SCALA



Misure Meccaniche e Termiche ©

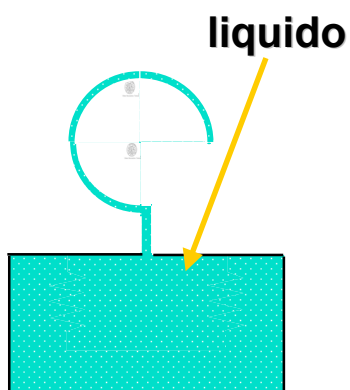
- ◆ **FONDO SCALA Max: > 1000 atm**
- ◆ **INCERTEZZA: 0.1-0.5 % per manometri campione 0.5-2 % per manometri industriali**

27

## ◆ **PRESSIONE DI LIQUIDI E DI GAS:**



Misure Meccaniche e Termiche ©



**Se  $p = 100 \text{ atm}$  e si fora il tubo di Bourdon:**

**- se ho del liquido nel tubo di Bourdon:  
appena esce una goccia**

$$p = p_{\text{atm}}$$

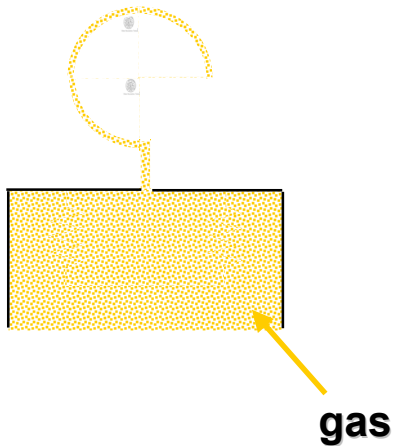
28

◆ **PRESSIONE DI LIQUIDI E DI GAS:**



Se  $p = 100 \text{ atm}$  e si fora il tubo di Bourdon:

- se ho del gas nel tubo di Bourdon:  
per avere  $p = p_{\text{atm}}$  deve uscire il 99% del gas del recipiente (esplosione)



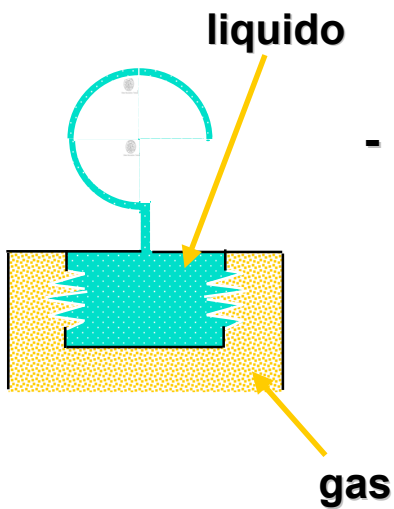
29

◆ **PRESSIONE DI LIQUIDI E DI GAS:**



Misure Meccaniche e Termiche ©

- ridotto effetto di carico



$$pV = \text{cost.}$$

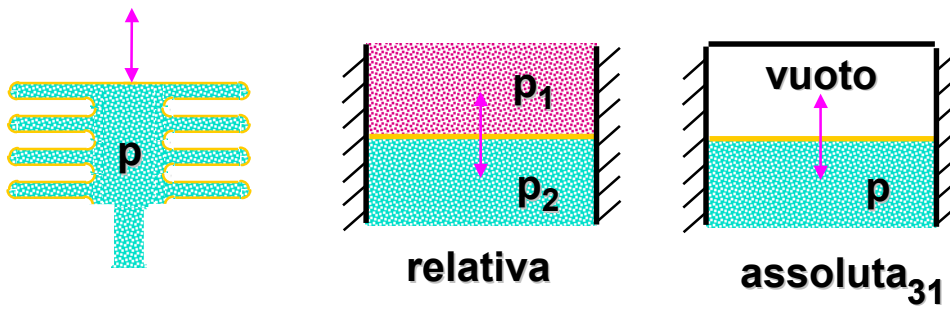
30

## SOFFIETTI E MEMBRANE



Misure Meccaniche e Termiche ©

- ◆ La pressione provoca la deformazione di un elemento elastico
- ◆ La deformazione è misurata con estensimetri o con captatori di spostamento
- ◆ Valore della pressione per taratura

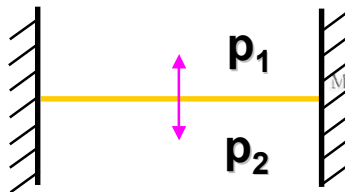


## MEMBRANE

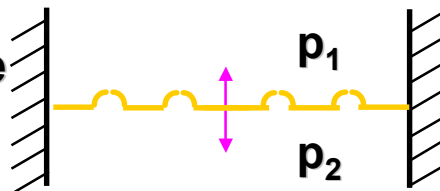


Misure Meccaniche e Termiche ©

- ◆ Lisce



- ◆ Corrugate



Sensibilità e fondo scala legati al campo di misura del trasduttore che rileva la deformazione



◆ **Membrane lisce:**

- **buona linearità se la deflessione massima è pari al 30% dello spessore della membrana;**
- **effetto di rezone dei trasduttori di spostamento a contatto**  
➡ **rinforzo delle membrane nella parte centrale**
- **possibilità di utilizzare gli estensimetri come trasduttori secondari**

33



◆ **Membrane corrugate:**

- **diametro maggiore rispetto a quelle lisce**
- **linearità anche con deflessioni maggiori del 30% dello spessore**
- **utilizzate soprattutto in applicazioni statiche (riduzione della risposta dinamica provocata dalla maggiore dimensione e dalla maggiore deflessione)**

34

# PROBLEMI LEGATI ALL'ELEMENTO SENSIBILE

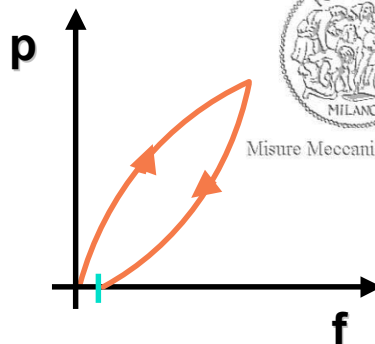


Misure Meccaniche e Termiche ©

- ◆ Isteresi
- ◆ Non linearità
- ◆ Resistenza meccanica

35

## ◆ ISTERESI:



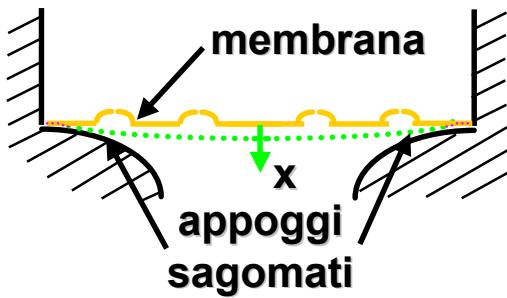
Misure Meccaniche e Termiche ©

**diversi andamenti della deformazione  
tra la fase di carico e quella di scarico**

**dopo un ciclo la membrana può non  
ritornare nella posizione iniziale**

36

◆ NON LINEARITA'



Con gli appoggi sagomati:

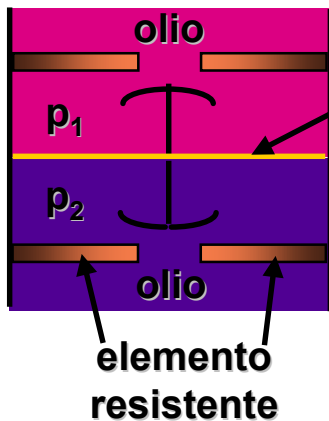
- freccia  $x$  non è lineare con  $\Delta p$
- buona sensibilità per piccoli  $\Delta p$
- elevato fondo scala, ma minore sensibilità



Misura Meccaniche e Termiche ©

37

◆ RESISTENZA MECCANICA



$p_1$  e  $p_2$  elevate, ma  $\Delta p$  piccolo

Se la pressione diminuisce bruscamente da un lato, il  $\Delta p$  aumenta di centinaia di volte → rottura della membrana



Misura Meccaniche e Termiche ©

38

# TRASDUTTORE DI PRESSIONE



Misure Meccaniche e Termiche ©

PRESSIONE



DEFORMAZIONE



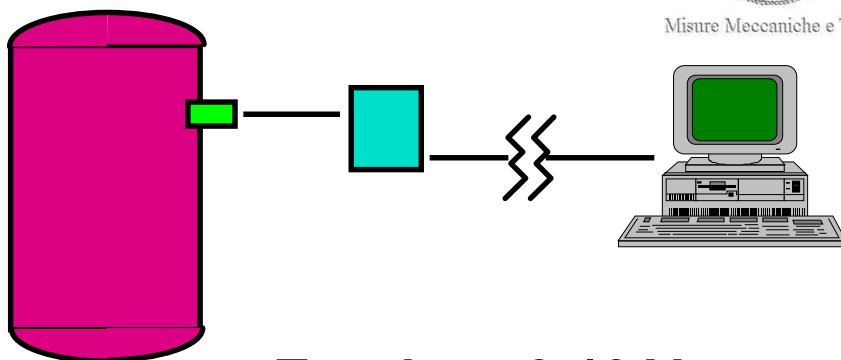
TENSIONE-CORRENTE

39

# TRASMETTITORI DI PRESSIONE



Misure Meccaniche e Termiche ©



- Tensione 0-10 V
- Corrente 4-20 mA

40

## MISURA DELLA DEFORMAZIONE O DELLA FRECCIA



Misure Meccaniche e Termiche ©

- ◆ **Estensimetri**  
(solo per membrane lisce)
- ◆ **LVDT**
- ◆ **Capacitivi**
- ◆ **Induttivi**

41

## MISURA DIRETTA DELLA PRESSIONE

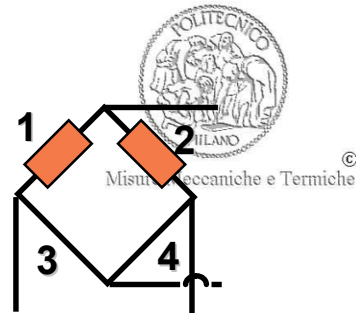
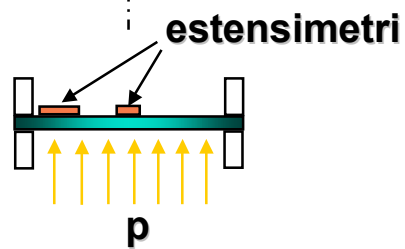
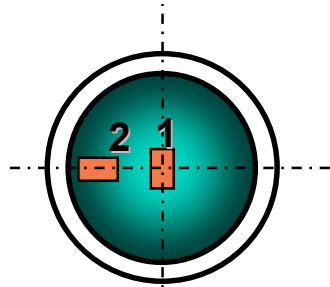


Misure Meccaniche e Termiche ©

- ◆ **Piezolettrici**
- ◆ **Piezoresistivi**

42

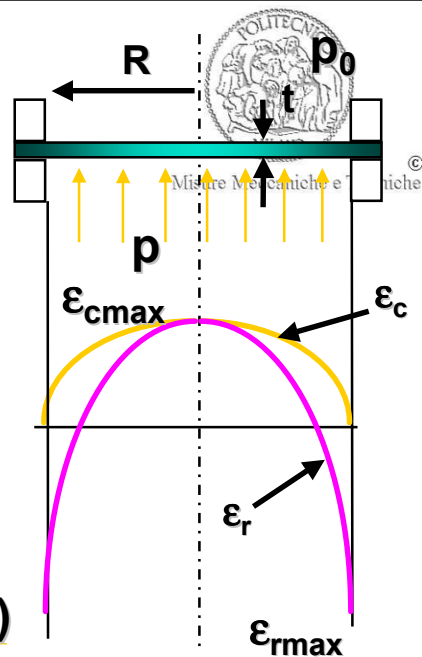
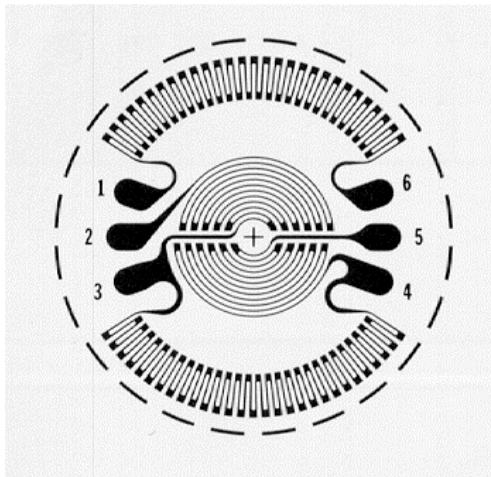
◆ Estensimetri



estensimetri 1 e 2 su lati contigui del ponte

taratura in pressione del sistema di misura

◆ Estensimetri



$$\frac{\Delta V}{V} = 820 \frac{(p-p_0)R^2(1-\nu^2)}{Et^2}$$

## TRASDUTTORE AD ESTENSIMETRI



campo di misura

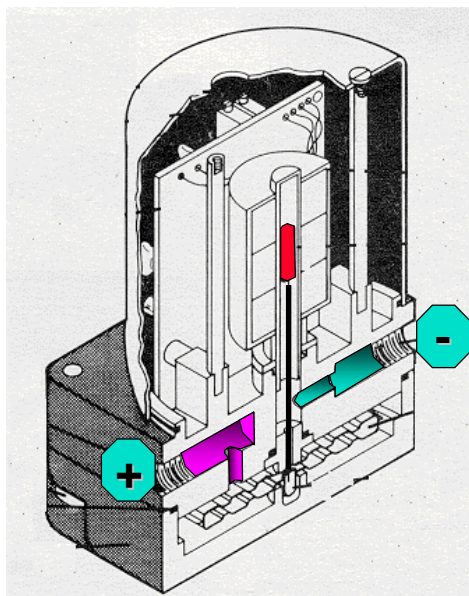
5-300 bar

sensibilità tipica

2-3 mV/V → f. s.

45

## ESEMPIO: TRASDUTTORE A SOFFIETTO CON LVDT



46

## **ESEMPIO: TRASDUTTORE A SOFFIETTO CON LVDT**



Misure Meccaniche e Termiche ©

**fondo scala : 1250-2500 Pa**

**alimentazione in continua**

**uscita  $\pm 10$  V**

**47**

## **CAPTATORI DI PRESSIONE CAPACITIVI**



Misure Meccaniche e Termiche ©

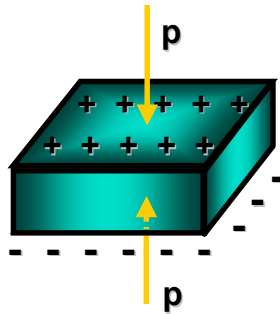
**APPLICAZIONE TIPICA: MICROFONI  
per la misura di pressione sonora**

**48**

## SENSORI DI PRESSIONE AL QUARZO



Misure Meccaniche e Termiche ©



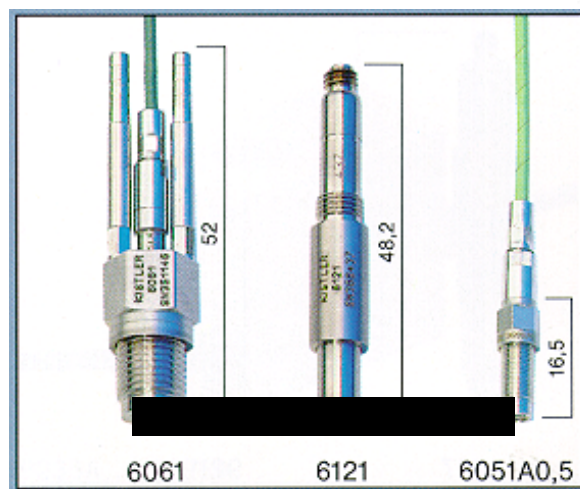
Particolarmente adatti alle misure dinamiche  
con limitazioni alle basse frequenze (0-2 Hz)

49

## SENSORI DI PRESSIONE AL QUARZO



Meccaniche e Termiche ©

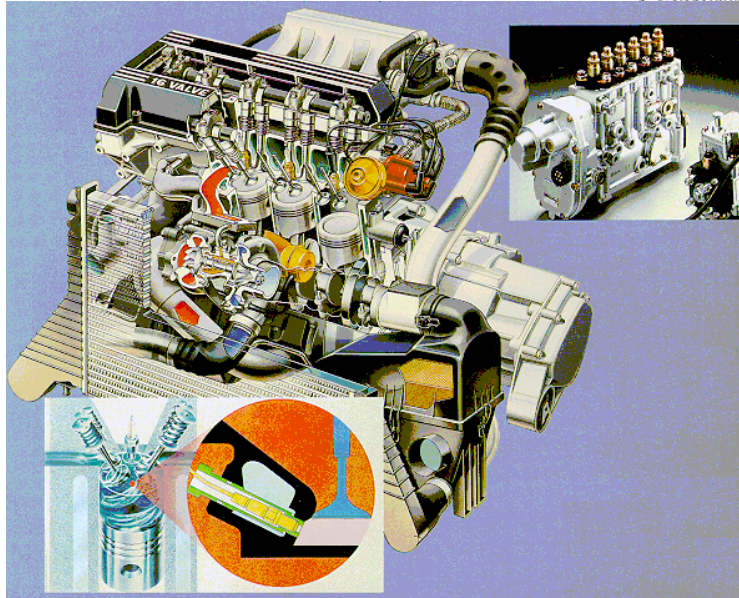


50

## SENSORI DI PRESSIONE AL QUARZO



Misure Meccaniche e Termiche ©

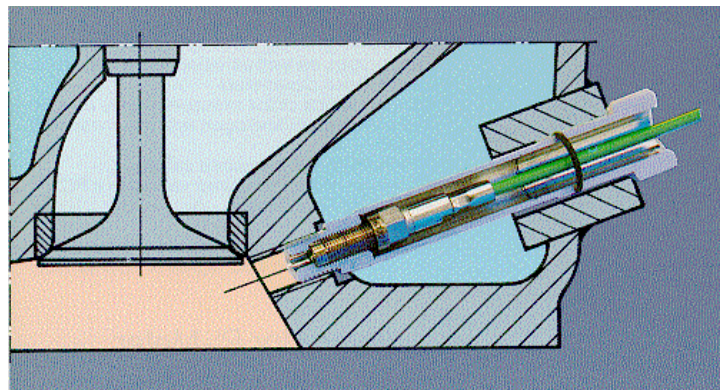


51

## SENSORI DI PRESSIONE AL QUARZO



Misure Meccaniche e Termiche ©



52

## ALCUNE CARATTERISTICHE TIPICHE



Misure Meccaniche e Termiche ©

<b>frequenza propria:</b>	<b>fino a 100 kHz</b>
<b>sensibilità:</b>	<b>10-100 pC/bar</b>
<b>portata:</b>	<b>fino a circa 1000 bar</b>
<b>linearità:</b>	<b>&lt; 1%</b>
<b>sensibilità all'accelerazione: &lt; 0.005 bar/g</b>	

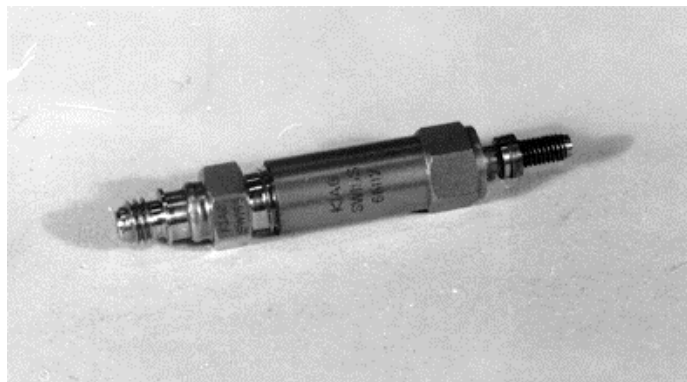
53

## ESEMPIO:

**sensore piezoresistivo**



Misure Meccaniche e Termiche ©

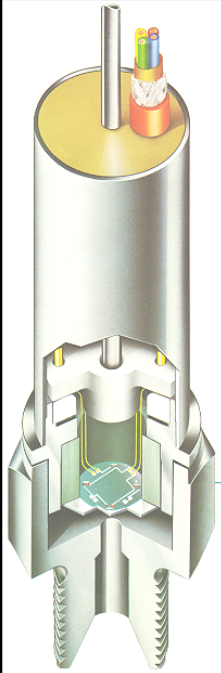


54

## SENSORE PIEZORESISTIVO



Misure Meccaniche e Termiche ©



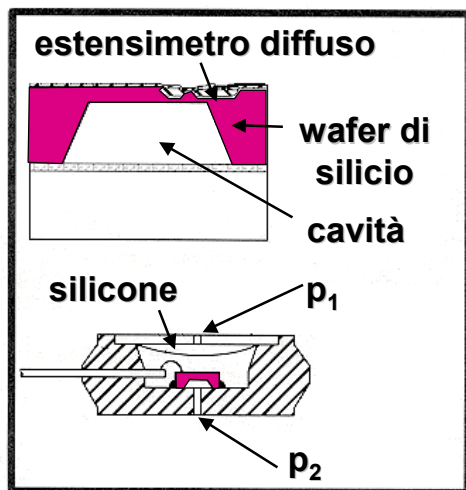
- Sono trasduttori estensimetrici a semiconduttore

55

## SENSORE PIEZORESISTIVO



Misure Meccaniche e Termiche ©



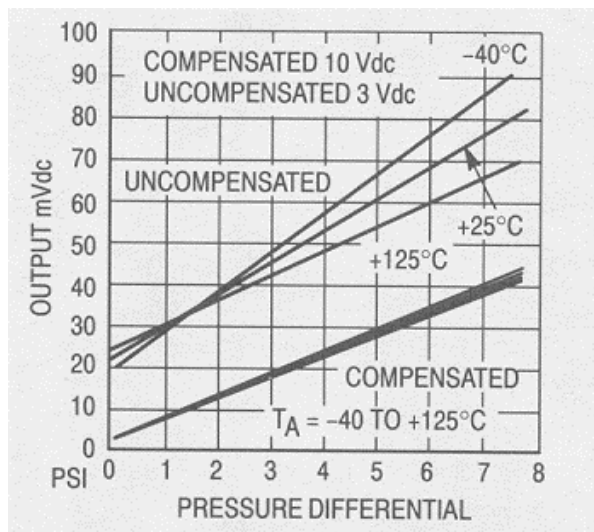
Lastra di silicio su cui per diffusione viene ricavato un ponte completo di resistenze ed un termistore per la compensazione termica

56

## COMPENSAZIONE DELLA TEMPERATURA



Meccaniche e Termiche ©



57



Misure Meccaniche e Termiche ©

## ALTE E BASSE PRESSIONI

58

## ALTE PRESSIONI (> 500 MPa)

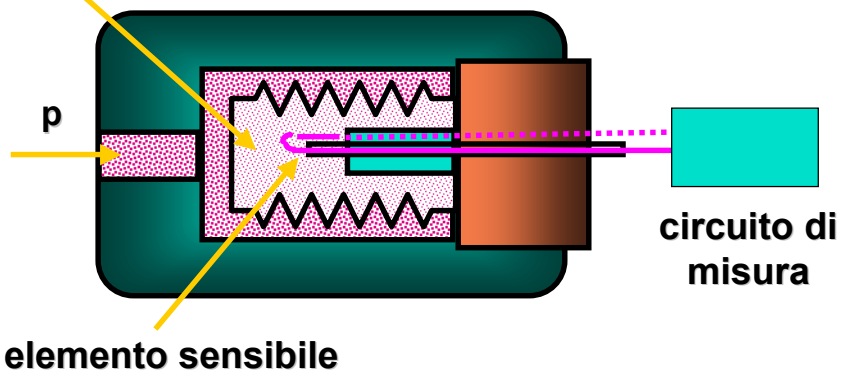


Si misura la variazione di resistenza in funzione della pressione

Misure Meccaniche e Termiche

$$\frac{dR/R}{p} = \frac{2}{E} + \frac{dp/\rho}{p}$$

cherosene

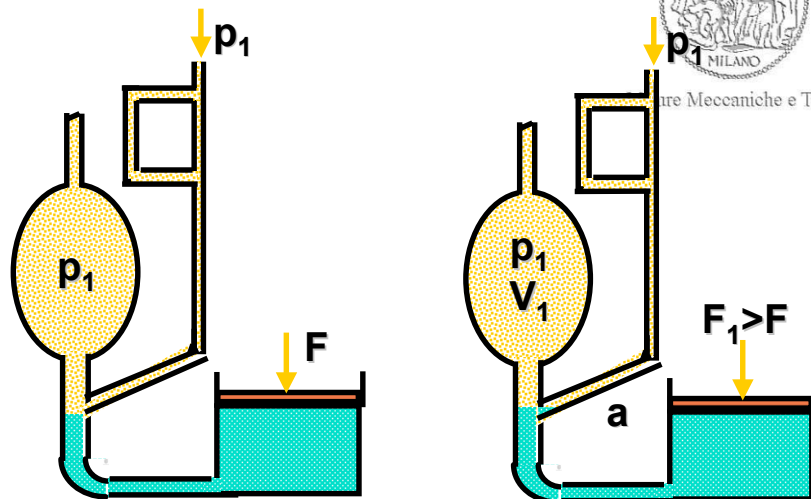


59

## BASSE PRESSIONI (< 0.1 Pa)



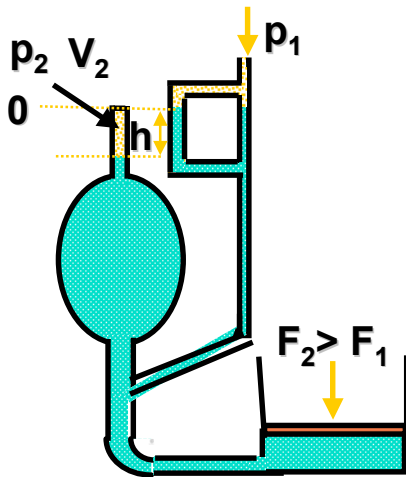
Misure Meccaniche e Termiche



Se aumento  $F$  il mercurio ostruisce il condotto a  $p_1$  resta incapsulato in  $V_1$

60

Aumento F fino a che il mercurio raggiunge il riferimento di 0



Legge di Boyle:

Misure Meccaniche e Termiche ©

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

$$p_1 = \frac{p_2 V_2}{V_1}$$

$$p_2 = p_1 + \gamma h$$

$$V_2 = A h$$

A: area del tubo

61



Misure Meccaniche e Termiche ©

# MISURA DI UN CAMPO DI PRESSIONE

62



Misure Meccaniche e Termiche ©

**Per definire un campo di pressione  
occorrono numerosi punti di  
misura.**

**Si utilizzano prese di pressione  
collegate mediante dei tubi al  
sistema di misura**

**63**



Misure Meccaniche e Termiche ©

**ESEMPI:**

**-distribuzione delle pressioni in una  
macchina a fluido**

**-distribuzione delle pressioni su  
modelli in galleria del vento**

**64**

# MISURA DI PRESSIONI MULTIPLE



Misure Meccaniche e Termiche ©

## 2 PRINCIPI:

- un solo trasduttore + “commutatore meccanico” che consente la misura di un canale alla volta
- un trasduttore per ciascun canale + un multiplexer per il convertitore analogico-digitale

65

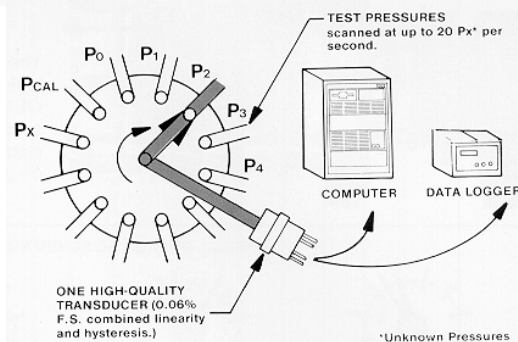
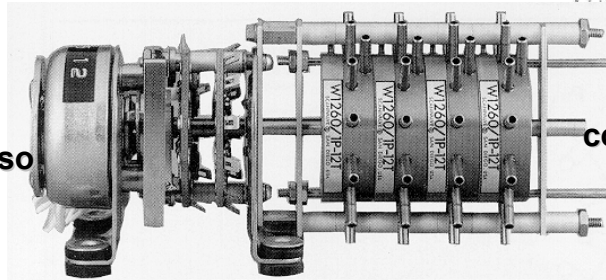
# SCANNER DI PRESSIONI



Misure Meccaniche e Termiche ©

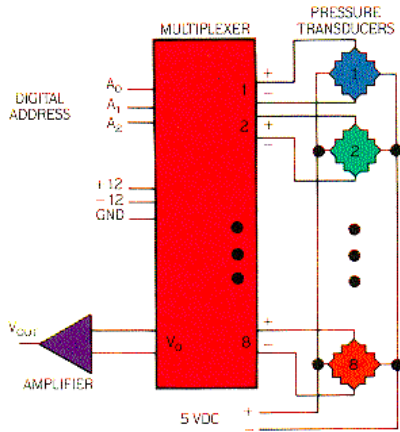
motore  
passo-passo

commutatore

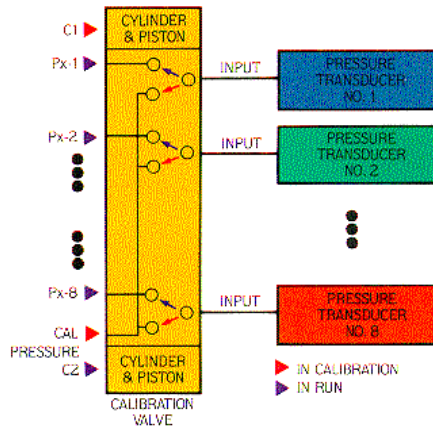


66

# SCANNER DI PRESSIONI



Electrical Diagram

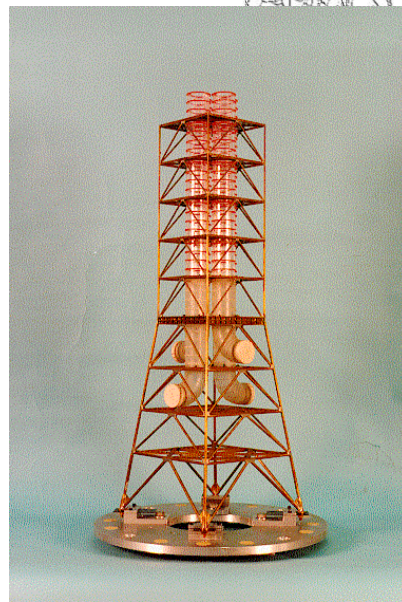
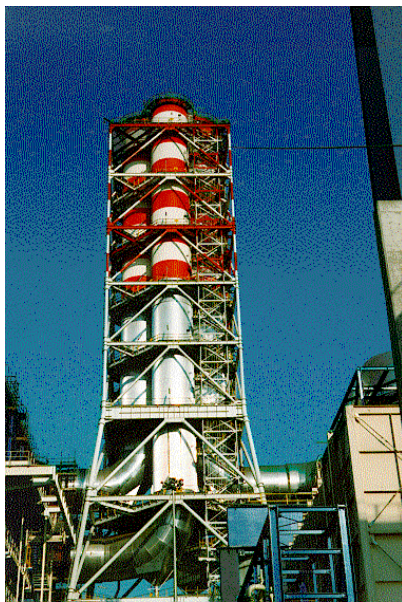


Valve Pneumatic Diagram

**multiplexer + voltmetro**

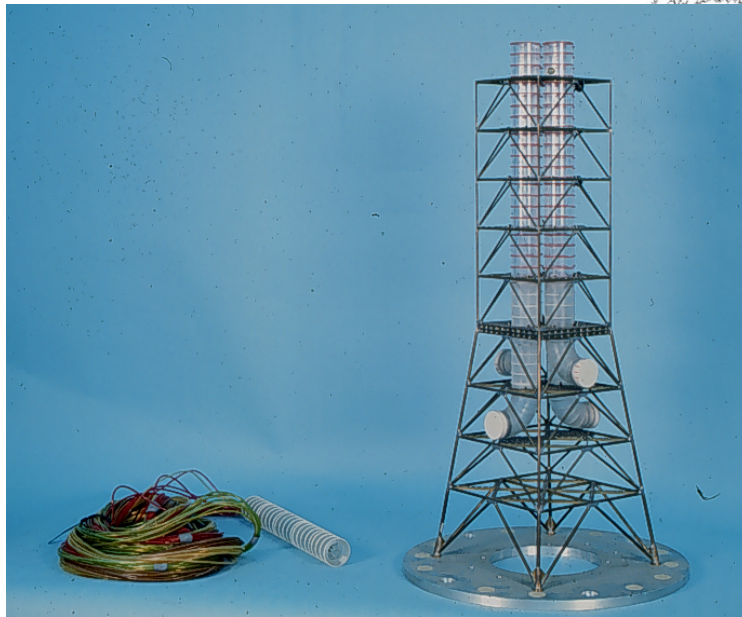
**calibrazione  
automatica**

**67**



© miche

**68**



Misure Meccaniche e Termiche ©

69



Misure Meccaniche e Termiche ©

# MISURA DELLE PRESSIONI DINAMICHE

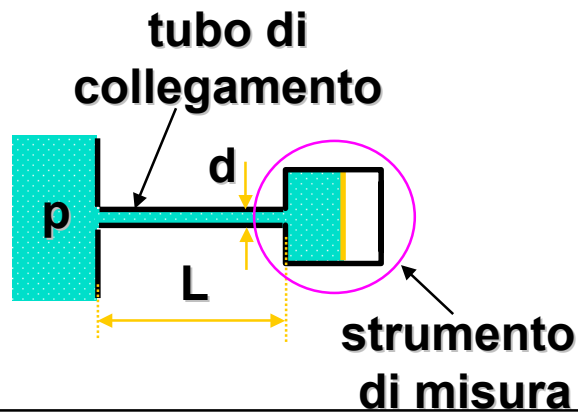
70

**Il sistema da considerare risulta essere costituito da:**



Misure Meccaniche e Termiche ©

- ◆ **strumento di misura**
- ◆ **sistema di collegamento**

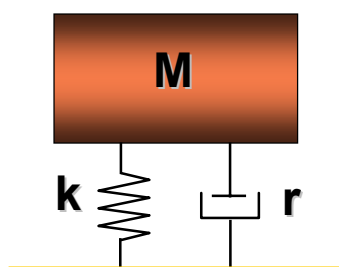


71

**Sistema vibrante a 1 g.d.l.**



Misure Meccaniche e Termiche ©



**M: massa della membrana e della parte di fluido che si muove con essa**

**k: rigidità del tubo e della membrana**

**r: smorzamento legato alle forze viscosse**

72

## ◆ Gas:

$$f = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{V \left( L + \frac{1}{2} \sqrt{\pi a} \right)}}$$



Misure Meccaniche e Termiche ©

Essendo:

**f:** frequenza propria del sistema

**C:** velocità del suono nel gas

**a:** area del tubo di collegamento ( $\pi d^2/4$ )

**V:** volume della cavità dello strumento di misura

**L:** lunghezza del tubo di collegamento

73

## ◆ Liquido:

$$f = \frac{d}{8A} \sqrt{\frac{3k}{\pi \rho L}}$$



Misure Meccaniche e Termiche ©

Essendo:

**d:** diametro del tubo di collegamento

**A:** area effettiva dell'elemento sensibile

**k:** rigidità complessiva del sistema

**$\rho$ :** densità del fluido

**L:** lunghezza del tubo di collegamento

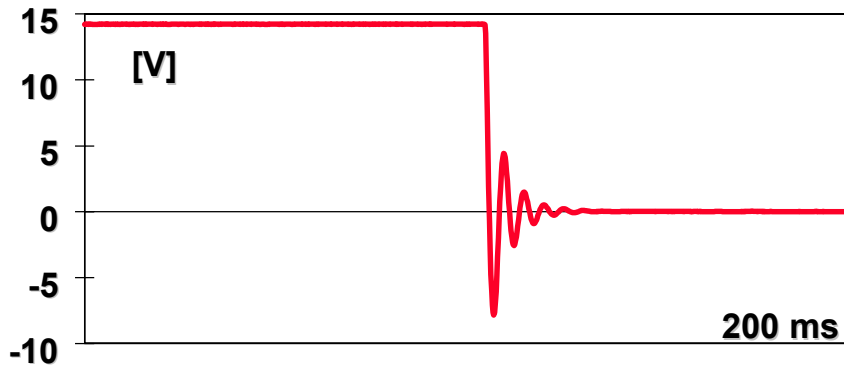
74

# DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA RISPOSTA DEI TRASDUTTORI DI PRESSIONE



(risposta al gradino)

Misure Meccaniche e Termiche ©



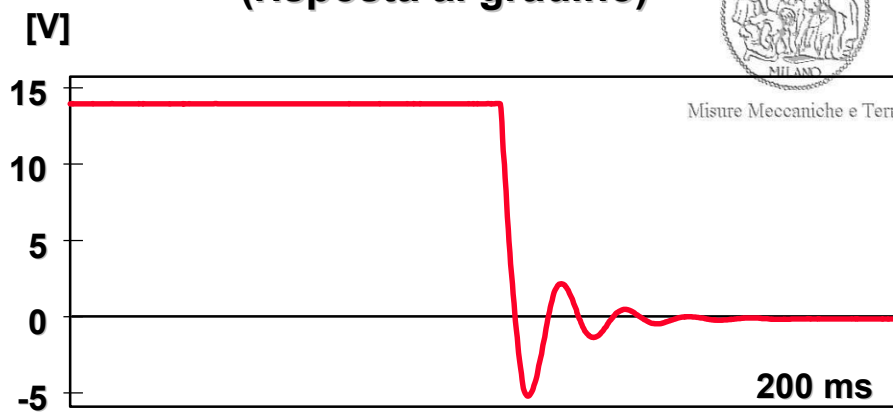
seniore piezoresistivo + tubo in rame  
 $\Phi$  1mm l=1m

75

(risposta al gradino)



Misure Meccaniche e Termiche ©



seniore piezoresistivo + tubo di plastica  
 $\Phi$  1mm l=1m

76



Misure Meccaniche e Termiche ©

# TARATURA

77

## GERARCHIA DI TARATURA

Istituto nazionale di metrologia  
I.M.G.C. COLONNETTI - Torino



Centri SIT



Laboratori

Il certificato di taratura deve dimostrare la  
catena di riferibilità

78

## Metodi di taratura:



Misure Meccaniche e Termiche ©

◆ per confronto

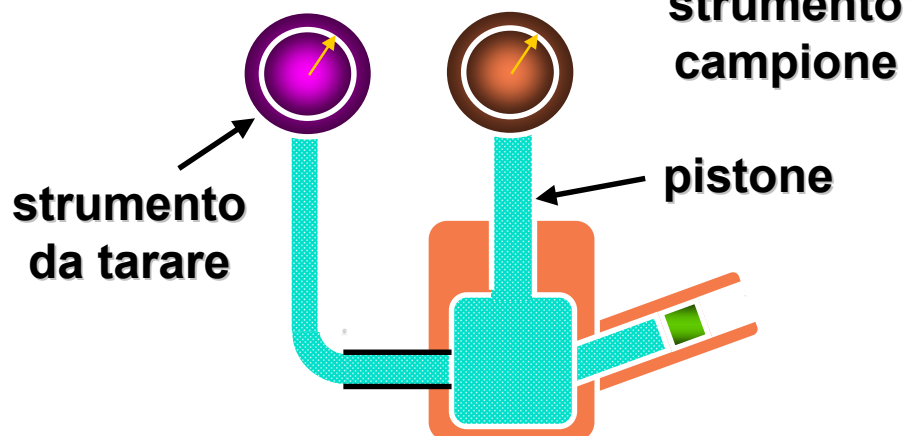
◆ a pesi

79

## TARATURA PER CONFRONTO



Misure Meccaniche e Termiche ©



80



Misure Meccaniche e Termiche ©

- ◆ **Lo strumento campione (secondario) deve avere una incertezza di almeno 4 volte migliore dell'incertezza dichiarata o presunta dello strumento da tarare**

81



Misure Meccaniche e Termiche ©

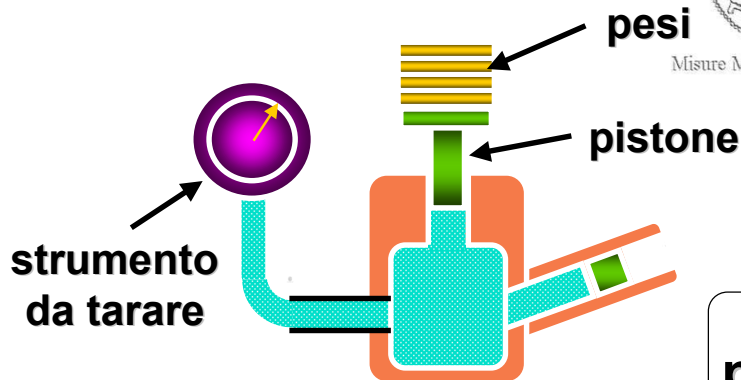
- ◆ **Tre cicli completi di taratura permettono di ricavare:**
  - **l'incertezza (in percentuale del fondo scala)**
  - **la ripetibilità**
  - **la linearità**
  - **l'isteresi**

82

## TARATURA A PESI



Misure Meccaniche e Termiche ©



$$p = \frac{F}{A}$$

**Cause di incertezza:** - attrito cilindro-pistone  
- incertezza sull'area del pistone  
- pesi campione

83

## PROCEDURA DI TARATURA



Misure Meccaniche e Termiche ©

- ◆ Stantuffo a fine corsa
- ◆ Montaggio manometro da tarare:

$$p_{\text{interna}} = p_{\text{ambiente}}$$

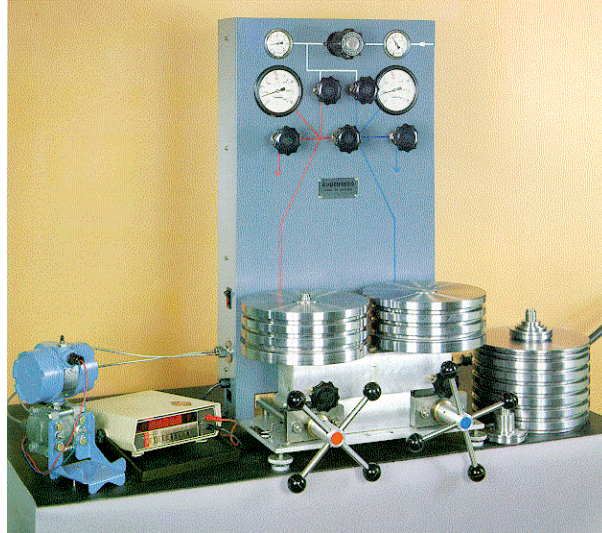
- ◆ Carico con peso campione
- ◆ Azione sul volantino fino al sollevamento del carico
- ◆ Rotazione del disco (attrito dinamico)
- ◆ Lettura del monometro di prova
- ◆ Nuovo carico

84

# BANCO DI TARATURA PER MANOMETRI DIFFERENZIALI



Misure Meccaniche e Termiche ©

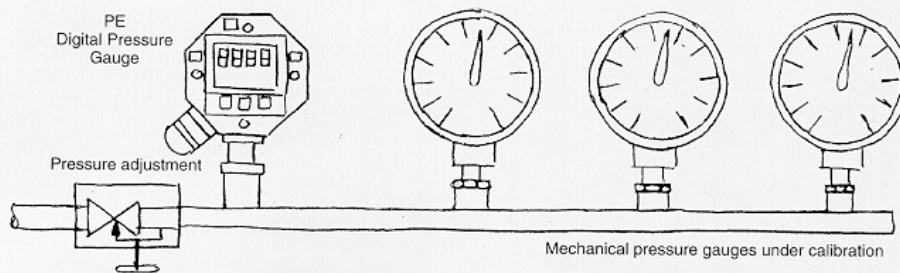


85

# BANCO DI TARATURA PER MANOMETRI INDUSTRIALI



Misure Meccaniche e Termiche ©



86