

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI SALERNO**  
**Facoltà di Ingegneria**

**APPUNTI DALLE LEZIONI**  
**DI MISURE INDUSTRIALI**

***PARTE SECONDA***

***Dicembre 2013***

**Prof. Ferdinando Luminoso**

## **INDICE**

<b>CAPITOLO 9 - MISURE DEL TEMPO E DELLA FREQUENZA</b>	<b>4</b>
9.1 Concetti introduttivi	4
9.2 Misura del tempo e della frequenza	4
<b>CAPITOLO 10 - MISURE DI DEFORMAZIONE E SPOSTAMENTO</b>	<b>5</b>
10.1 Concetti introduttivi	5
10.2 Trasduttore potenziometrico	5
10.3 Trasduttore induttivo differenziale	7
10.4 Trasduttore capacitivo	8
10.5 Celle di carico	8
<b>CAPITOLO 11 - MISURE DI VELOCITA'</b>	<b>12</b>
11.1 Concetti introduttivi	12
11.2 Tachimetro a correnti parassite	12
11.3 Tachimetro a riluttanza variabile	13
11.4 Velocimetro laser	14
11.5 Encoder	14
<b>CAPITOLO 12 - MISURE DI TEMPERATURA</b>	<b>17</b>
12.1 Concetti introduttivi	17
12.2 Termocoppie	19
12.3 Termometri bimetallici	21
12.4 Trasduttori termoresistivi	22
12.5 Pirometri	23
12.6 Raccomandazioni per l'utilizzo dei termometri.	23
<b>CAPITOLO 13 - MISURE DI PRESSIONE</b>	<b>25</b>
13.1 Generalità	25
13.2 Manometri a deformazione	26
13.3 Manometro a membrana	26
13.4 Trasduttori piezoelettrici e ad estensimetri	27
13.5 Manometro a dislivello di liquido	28
<b>CAPITOLO 14 - MISURE DI PORTATA E DI VELOCITA' DEI FLUIDI</b>	<b>30</b>
14.1 Generalità	30
14.2 Dispositivi di ostruzione	31

14.3	Flussometri	35
14.4	Tubo di Pitot	37
14.5	Anemometro a filo caldo	38
14.6	Esercizi	39
<b>CAPITOLO 15 - MISURE DI UMIDITA'</b>		<b>40</b>
15.1	Generalità	40
15.2	Strumenti di misura	42
<b>CAPITOLO 16 - TARATURA STATICA DI UN DINAMOMETRO</b>		<b>45</b>
16.1	Generalità	45
16.2	Modalità di posizionamento degli estensimetri	47
16.3	Modello matematico di previsione	48
16.4	Taratura	49
<b>CAPITOLO 17 - STUDIO DINAMICO DI UNO STRUMENTO</b>		<b>52</b>
17.1	Generalità	52
<b>CAPITOLO 18 - MISURE DI LIVELLO</b>		<b>59</b>
18.1	Generalità	59
18.2	Metodi meccanici	61
18.2.1	Dispositivi a traguardo	61
18.2.2	Dispositivi a spinta idrostatica	61
18.2.3	Dispositivi a gorgogliamento	63
18.2.4	Dispositivi a pressione differenziale.	63
18.3	Sistema di misura elettrici	65
18.3.1	Dispositivi resistivi	65
18.3.2	Dispositivi capacitivi	65
18.4	Dispositivi a tempo di volo	67
<b>CAPITOLO 19 - MISURE DI VISCOSITA'</b>		<b>69</b>
19.1	Generalità	69
19.2	Le categorie dei fluidi	73
19.3	Viscosimetri	73
19.4	Tecniche di misura	74
19.4.1	Viscosimetri a capillari	74
19.4.2	Viscosimetri a capillare a carico idrostatico	75
19.4.3	Viscosimetri a sfera	76
19.4.4	Viscosimetri rotazionali	77

## **CAPITOLO 9**

### **MISURE DEL TEMPO E DELLA FREQUENZA**

#### **9.1 *Concetti introduttivi***

Spesso, sia nel settore industriale che in quello metrologico, è richiesta la misura di intervalli di tempo tra due eventi che si succedono nonché la sincronizzazione di operazioni e misura di frequenze.

Di norma lo strumento più utilizzato è il contatore elettronico di impulsi, il cui componente principale è il clock, il quale utilizza un oscillatore al quarzo.

#### **9.2 *Misura del tempo e della frequenza***

La misura del periodo di un segnale consiste nel contare gli impulsi provenienti dal clock e contenuti in un determinato intervallo di tempo è ovvio che la frequenza del segnale da misurare deve essere piccola rispetto a quella del clock.

La misura dell'intervallo temporale tra due eventi, oppure la durata di un singolo evento è di norma eseguita con due strumenti.

I due eventi vengono portati sugli ingressi di due amplificatori, il primo dei quali comanda la partenza del conteggio del contatore decimale, mentre il secondo ne determina la fine.

La misura della frequenza di un segnale viene invece realizzata, comandando l'intervallo di apertura e di chiusura del contatore con due impulsi consecutivi, provenienti dall'uscita di un divisore di impulsi.

## **CAPITOLO 10**

### **MISURE DI DEFORMAZIONE E SPOSTAMENTO**

#### **10.1 Concetti introduttivi**

La misura dello spostamento di un corpo è la misura di una grandezza fisica riconducibile ad una lunghezza.

Analoga considerazione può essere svolta allorquando si parla di un allungamento di un componente elastico, che si deforma sotto l'azione di una forza o di un momento.

I principali strumenti utilizzati sono:

- trasduttore potenziometrico;
- trasduttore induttivo differenziale;
- trasduttore capacitivo;
- estensimetri a resistenza variabile.

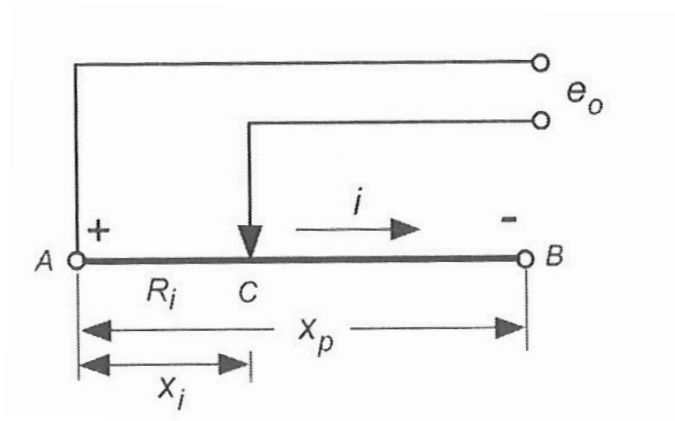
Per gli estensimetri a resistenza variabile si rinvia alle considerazioni già sviluppate nel Capitolo 4.

#### **10.2 Trasduttore potenziometrico**

Esso è costituito da un potenziometro, cioè da un elemento resistivo fornito di un contatto mobile.

Il moto del contatto può essere di traslazione o di rotazione, o, in alternativa, un moto elicoidale.

Si prende in esame il trasduttore potenziometrico di traslazione rappresentato in Figura.



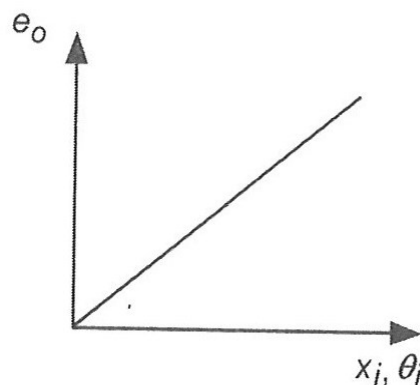
L'elemento resistivo è collegato a tensioni continue o alternate e, ovviamente, la tensione di uscita  $e_o$  è legata allo spostamento  $x_i$  dalla seguente espressione

$$e_o = V \cdot \frac{R_i}{R_p} = V \cdot \frac{x_i \frac{\rho}{S}}{x_p \frac{\rho}{S}} = V \cdot \frac{x_i}{x_p}$$

Ove:

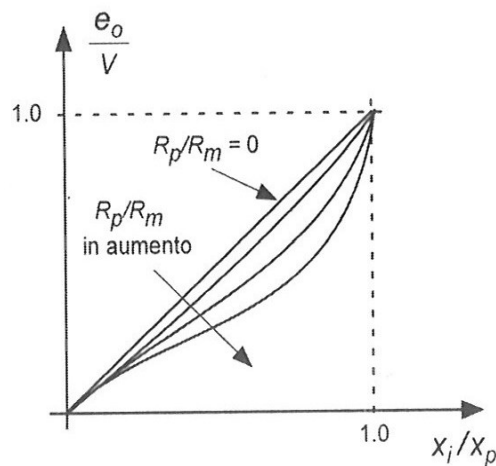
- $R_p$  ed  $R_i$  sono le resistenze totale (compresa tra i punti A e B) e parziale (compresa tra i punti A e B);
- $x_p$  è lo spostamento massimo lineare;
- $S$  è la sezione del filo del potenziometro.

La relazione tra tensione e spostamento è di tipo lineare (vedi figura)



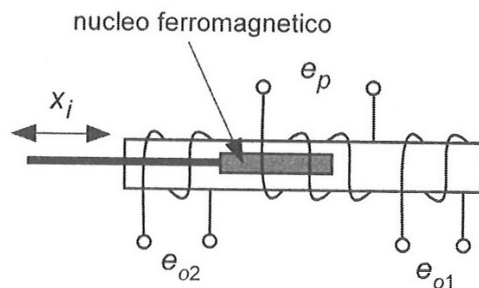
Tale andamento è però corretto solo se il circuito a valle del potenziometro è aperto. Se accade però, come di solito, che l'uscita del potenziometro è collegato ad uno strumento di misura l'impedenza di ingresso di questi apparati influenza il valore

della tensione  $e_o$ . Ad esempio se l'uscita del potenziometro è collegata con un voltmetro di resistenza di ingresso  $R_m$ , il circuito a valle del potenziometro si comporta come un circuito aperto solo se  $R_m = \infty$ . E' facile dimostrare che se il rapporto  $\frac{R_p}{R_m} = 0$ , il circuito si comporta come un circuito aperto. Mentre se tale rapporto aumenta l'andamento di  $\frac{e_o}{V}$  in funzione dello spostamento relativo  $\frac{x_i}{x_p}$  si allontana dalla linearità (vedasi figura).



### 10.3 Trasduttore induttivo differenziale

Tale trasduttore è costituito da un trasformatore elettrico, composto da un avvolgimento primario e da due avvolgimenti secondari, magneticamente collegati da un nucleo ferro-magnetico mobile, come mostrato in figura.



Se il primario è alimentato con una tensione sinusoidale di ampiezza e frequenza costanti, ai capi dei due secondari compaiono tensioni di tipo sinusoidale

della stessa frequenza  $e_{01}$  ed  $e_{02}$ , le cui ampiezze dipendono dai coefficienti di mutua induzione fra primario e i due secondari.

Dalle misure di tali induzioni si risale all'entità e al verso dello spostamento  $x_V$  del nucleo ferro-magnetico mobile.

#### **10.4 Trasduttore capacitivo**

Ricordando che per un condensatore piano la capacità è fornita dalla relazione

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{s}$$

ove:

- $C$  è la capacità;
- $\varepsilon$  è la permittività del mezzo interposto tra le due piastre;
- $s$  è la distanza tra le due piastre;
- $A$  è l'area della piastra del condensatore.

è facile comprendere che la misura di uno spostamento con il trasduttore capacitivo sfrutta la caratteristica del condensatore di variare la sua capacità in funzione dalla distanza tra le piastre.

#### **10.5 Celle di carico**

Le celle di carico sono trasduttori di forza aventi dimensioni compatte e sono costituite essenzialmente da un elemento elastico, al quale sono incollati estensimetri elettrici a resistenza, idonei ad evidenziare deformazioni elastiche.

Il campo di deformazione prodotto da una forza esterna ha un'ampiezza che è correlata alla forma geometrica e al modulo elastico di un elemento.

Le portate di solito sono comprese nell'intervallo 5N÷50MN.

L'elemento elastico assolve le seguenti principali funzioni:



- ricezione della forza esterna oggetto di misura;
- trasmissione della forza alla parte sensibile dell'elemento;
- conversione lineare della forza in una variazione di deformazione misurabile con gli estensibili.

Nel progettare l'elemento elastico di norma si tiene conto della frequenza di risonanza e dell'uniformità della distribuzione delle deformazioni all'interno dell'estensimetro.

La configurazione geometrica prescelta deve essere in grado di semplificare il ciclo di lavorazione e l'installazione degli estensimetri.

Fondamentale è anche la presenza di una protezione contro i sovraccarichi.

I requisiti che vengono richiesti per il contenitore sono essenzialmente quelli della protezione della cella di carico nei confronti di condizioni ambientali severe e quelli per il corretto trasferimento della forza verso l'elemento elastico.

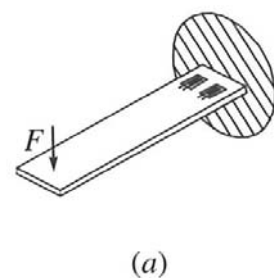
La principale classificazione delle celle monoassiali è la seguente:

- celle di carico soggette a flessione;
- celle di carico soggette a sforzo normale;
- celle di carico soggette a taglio.

Nello scegliere la cella, occorre considerare il campo di misura, i requisiti di uso e funzionamento, il costo, le modalità di montaggio, la tipologia di base ed il modo di operare.

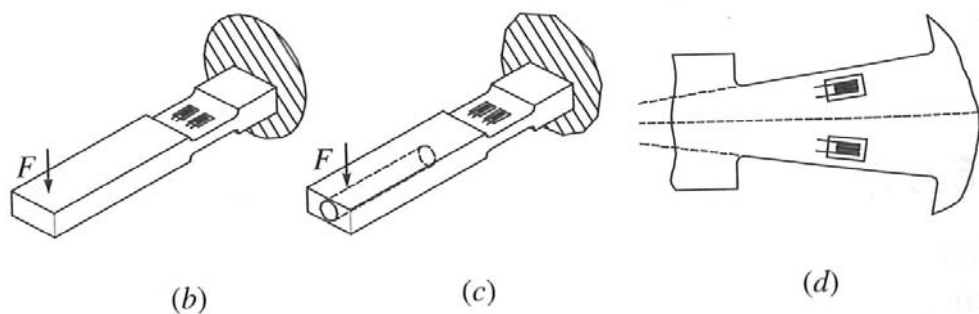
La più semplice configurazione di una cella sollecitata al momento flettente prevede l'utilizzo di quattro estensimetri, due sulle fibre tese e due sulle fibre compresse, con la mezzeria di ciascun estensimetro giacente sulla stessa sezione trasversale della mensola.

In figura è rappresentata la citata configurazione, che presenta una grande semplicità costruttiva, ma anche alcuni svantaggi quali la bassa frequenza di risonanza, la non uniforme distribuzione delle deformazioni, la mancanza di protezione contro i sovraccarichi, la scarsa selettività della risposta e l'elevato livello di deflessione.



Inoltre il buon comportamento termico è fortemente influenzato dagli spessori della mensola, tanto che esso è soddisfacente solo per bassi valori di tali spessori.

Le configurazioni riportate di seguito hanno cercato di eliminare gli inconvenienti prima descritti. In particolare la configurazione (c) migliora la risposta dinamica della cella, mentre la (d), presentando una sezione trasversale linearmente crescente verso l'incastro, realizza un elemento a sforzo costante.



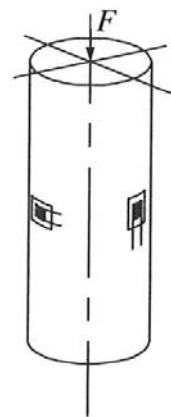
Le celle di carico per media ed elevata portata spesso adottano elementi elastici sollecitati a taglio ed hanno un campo di portate che oscilla tra i 5kN e 1MN.

Esse presentano i seguenti vantaggi:

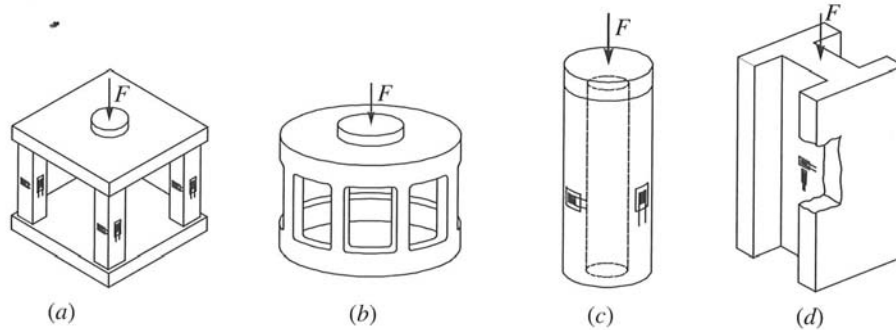
- bassa sensibilità ai carichi disallineati;
- limitato sviluppo in altezza;
- posizionamento degli estensimetri in cavità protette;
- limitata cedevolezza;
- buona linearità della risposta.

Le celle di carico ad elevata portata si configurano spesso come elementi a colonna e vengono impiegate per carichi maggiori di 100kN.

Esse presentano generalmente uno o più elementi cilindrici caricati lungo la direzione del loro asse longitudinale e l'elemento elastico è caratterizzato di norma da quattro estensimetri, due dei quali sono disposti lungo la direzione longitudinale e due lungo la direzione trasversale.



Di seguito sono altresì rappresentate le tipologie più usate di celle di carico a sforzo normale



La figura (a) illustra una cella a quattro colonne, ciascuna delle quali strumentata con quattro estensimetri.

La figura (c) viene utilizzata per incrementare la rigidezza a parità di massa.

La figura (d) mostra invece un elemento elastico a colonna con sezione trasversale ad H. Tale configurazione presenta un vantaggio di ridurre la sensibilità indesiderata agli sforzi dovuti al momento flettente, in quanto gli estensimetri sono posizionati in prossimità dell'asse neutro.

## **CAPITOLO 11**

### **MISURE DI VELOCITA'**

#### **11.1 Concetti introduttivi**

La velocità, sia traslazionale che rotazionale, è una grandezza fisica, la cui conoscenza è indispensabile in molti processi industriali e in moltissimi impianti.

I trasduttori per la misura della velocità di rotazione vengono chiamati tachimetri ed hanno un'uscita di tipo elettrico, generalmente una tensione.

Esistono molti tipi di tachimetro:

- tachimetro a correnti parassite;
- tachimetro a riluttanza variabile.

Di seguito si esamineranno, seppure sinteticamente, le varie tipologie di tachimetro.

#### **11.2 Tachimetro a correnti parassite**

Il tachimetro a correnti parassite sfrutta il fenomeno della formazione di tali correnti ed è costituito da un'asta, collegata all'albero di cui si vuole misurare la velocità di rotazione, la quale è calettata su un mozzo, su cui sono collocati un insieme di magneti permanenti, che ruotano all'interno di una scatola.

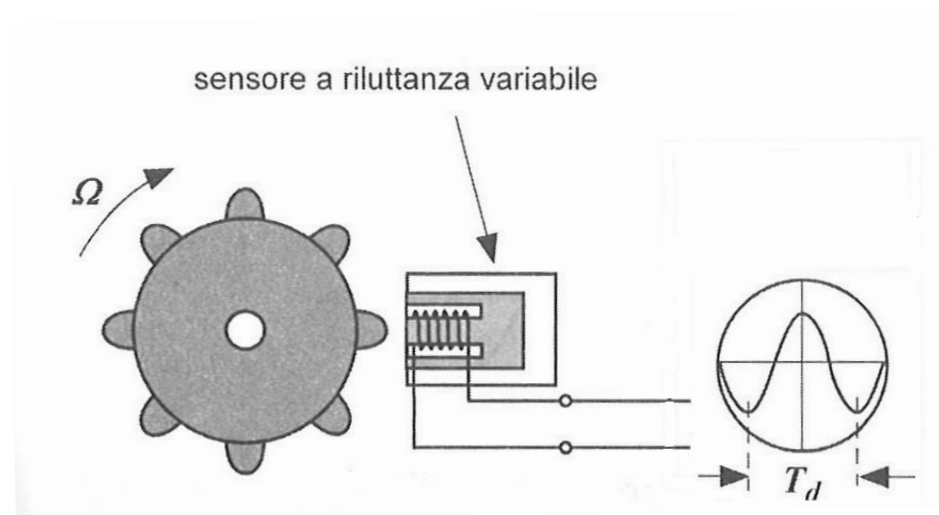
Questa ha una parte composta di materiale conduttore entro le quali si formano correnti parassite generate dalla rotazione dei magneti.

Se la scatola è libera di ruotare, essa inizia a ruotare nello stesso verso dei magneti per ridurre l'intensità delle correnti parassite.

Questa rotazione è contrastata da una molla collegata al fondo della scala e solidale con un indice, che fornisce l'indicazione sulla velocità di rotazione raggiunta.

### 11.3 Tachimetro a riluttanza variabile

E' costituito da una ruota dentata di materiale ferro-magnetico, ai cui denti è affacciato un sensore a riluttanza variabile, composto da un magnete permanente avvolto da spire di materiale conduttore. (vedasi figura)



Allorquando il dente si presenta davanti al sensore, si modifica la permeabilità magnetica del circuito e quindi anche il flusso magnetico.

Tale variazione di flusso comporta l'insorgere di una tensione in virtù della Legge di Faraday, la quale può essere prelevata da un oscilloscopio e fornire preziose informazioni sulla velocità angolare posseduta dall'albero motore.

### 11.4 Velocimetro laser

Talvolta la misura della velocità di un oggetto è eseguita mediante puntamento di un velocimetro laser sull'oggetto in movimento, parallelamente alla sua velocità.

Quest'ultima viene determinata sfruttando la differenza di frequenza fra quella del raggio emessa dal velocimetro e quella del raggio riflesso dall'oggetto in movimento, la quale viene modificata per effetto doppler.

Il velocimetro laser emette un'onda elettromagnetica con una lunghezza d'onda  $\lambda$  che si muove alla velocità della luce  $c$ , legata alla frequenza  $\nu$  dalla relazione

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = c \cdot T$$

ove  $T$  è il periodo.

In altri termini ad ogni intervallo di tempo  $T$  viene emesso un tratto di onda sinusoidale di lunghezza  $\lambda$ .

Seguendo il percorso di questi successivi tratti di onda è possibile determinare il ritardo, con il quale il ricevitore, posto vicino alla sorgente laser, recepisce questa successione di tratti di onda.

Da tale valore è possibile risalire alla frequenza dell'onda riflessa e alla velocità della superficie in movimento.

### 11.5 Encoder

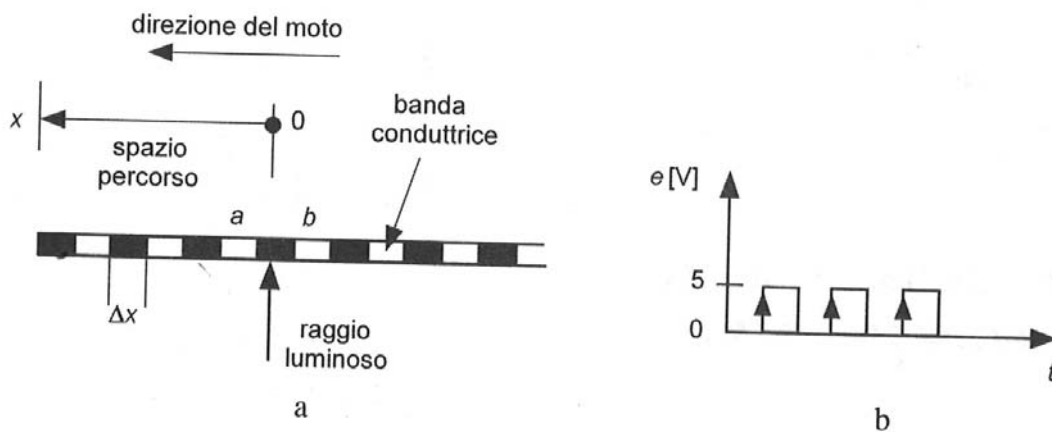
Per le misure di spostamenti lineari e rotatori vengono spesso utilizzati gli encoder, che sono dei trasduttori, nei quali la struttura base consiste in una successione di bande trasparenti (in grado di far passare un raggio luminoso) e di bande opache di uguale larghezza.

Esistono essenzialmente tre tipi di encoder:

- 1) encoder tachimetrici;
- 2) encoder incrementali,
- 3) encoder assoluti.

L'encoder tachimetrico mostrato di seguito in figura è in grado di generare un gradino di tensione, allorquando una banda trasparente viene attraversata da un raggio luminoso.

Il passaggio di tale raggio attraverso l'alternarsi delle bande trasparenti genera quindi una successione di gradini di tensione rilevabili mediante un fotodiodo ed un contatore digitale in grado di determinare il numero di gradini.



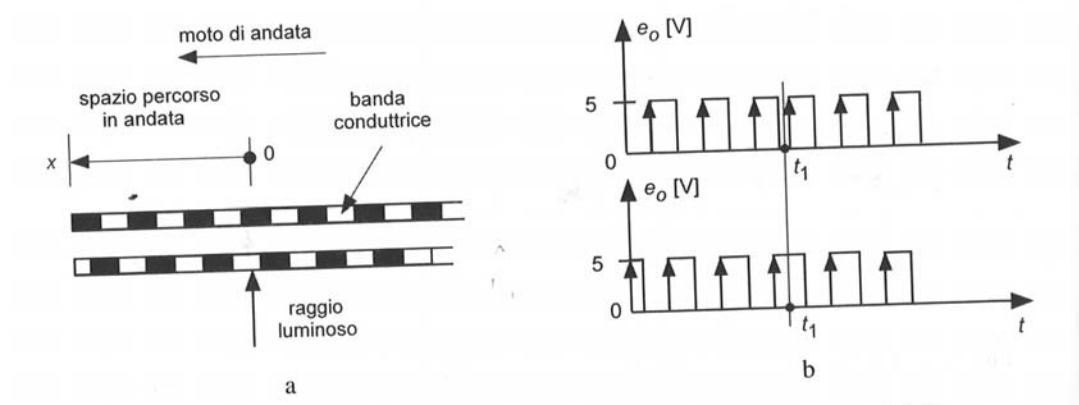
Ovviamente la misura dello spostamento  $x$  è fornita dal prodotto del numero di impulsi registrato dal contatore digitale per il doppio della larghezza della banda trasparente.

$$x = n \cdot 2 \cdot \Delta x \pm \Delta x$$

L'encoder tachimetrico presenta però l'inconveniente di non rilevare eventuali inversioni di moto. Per tale motivo viene utilizzato l'encoder incrementale costituito da due strisce solidali sfalsate di .

$$\frac{\Delta x}{2}$$

In tal modo l'inversione del moto è segnalata dal cambiamento della successione degli impulsi tra le due strisce, così come rilevabile dalla figura seguente



Gli encoder assoluti invece sono utilizzati per spostamenti lineari e rotatori limitati.



## CAPITOLO 12

### MISURE DI TEMPERATURA

#### 12.1 Concetti introduttivi

La temperatura costituisce un'altra grandezza, la cui conoscenza è fondamentale in molti processi industriali. Essa, come è noto, è legata all'energia cinetica delle molecole ed è caratterizzata da varie unità di misura.

Inizialmente il problema della misura delle differenze di temperatura fu risolto considerando due stati di riferimento: uno costituito da ghiaccio fondente, cui fu assegnato convenzionalmente il valore 0, il secondo costituito dall'acqua in ebollizione alla pressione di 720 mm di mercurio, cui fu assegnato il valore 100. L'intervallo costituito dai due valori fu diviso in 100 parti uguali e ad ognuna di esse fu assegnato un grado di temperatura.

I livelli di temperatura fuori e dentro l'intervallo furono misurati utilizzando termometri a dilatazione, sfruttando la capacità delle sostanze di variare il loro volume secondo la relazione

$$V_t = V_0(1 + \alpha t)$$

ove

- $V_t$  è il volume della temperatura  $t$ ;
- $\alpha$  è il coefficiente di dilatazione lineare per i metalli o volumetrico per i fluidi;
- $t$  è la temperatura;
- $V_0$  è il volume alla temperatura di zero gradi.

Il coefficiente  $\alpha$  è variabile sia con la temperatura e sia la variare della sostanza, per cui risulta estremamente difficoltoso confrontare misure ottenute con termometri diversi.

Per ovviare a tale inconveniente Lord Kelvin introdusse una scala termodinamica assoluta, la quale assume come temperatura di riferimento la temperatura del punto triplo dell'acqua, pari a 273,16K.

L'intervallo di temperatura tra la temperatura del ghiaccio fondente e quella relativa all'ebollizione dell'acqua viene diviso in 100 parti uguali, assegnando a ognuna di esse il valore di un grado Kelvin (1K).

Si vuole inoltre ricordare che il modello teorico del gas ideale è caratterizzato dalla Legge

$$p \cdot V = nRT$$

$$pv = \frac{R}{M} \cdot T = R_a \cdot T$$

ove

- $p$  è la pressione;
- $V$  è il volume occupato del gas;
- $n$  è il numero di moli nel volume  $V$ ;
- $v$  è il volume specifico;
- $M$  è la massa molecolare dell'elemento del fluido
- $R = 8.314 \text{ J/Kmol}$  ( $1,98 \text{ cal/Kmol}$ ) è la costante universale dei gas  $T$  è la temperatura in gradi Kelvin.

Se consideriamo il caso del gas ideale, una trasformazione a pressione costante è così caratterizzata

$$p_o = \frac{nRT_o}{V_o} = \frac{nRT}{V} = p$$

e cioè

$$\frac{V}{V_o} = \frac{T}{T_o}$$

Quindi si può dire che un termometro a gas ideale a pressione costante registra i cambiamenti di volume al variare della temperatura secondo la legge precedente.

Analogamente può dirsi che per un termometro a gas ideale a volume costante registra i cambiamenti di pressione il variare della temperatura secondo la legge

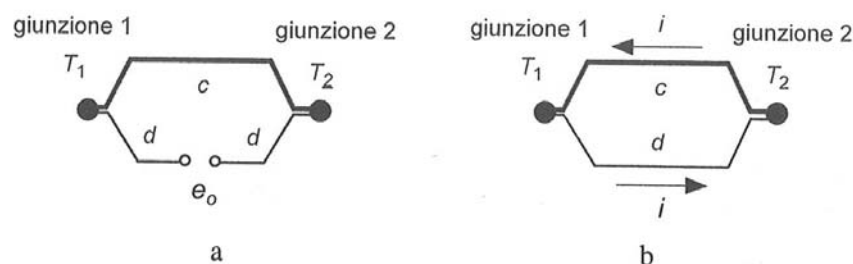
$$\frac{p}{p_o} = \frac{T}{T_o}$$

Ovviamente quello del gas ideale è un modello teorico che non trova rigoroso riscontro nei gas reali, ma che, se sussistono le ipotesi poste a base del modello, (bassa concentrazione di moli), non si commette un grave errore nell'assimilare il comportamento di un gas reale a quello del gas ideale.

Va però precisato che, in presenza di un gas reale, occorre tener conto delle variazioni di concentrazione di moli nel volume.

## 12.2 Termocoppie

Dalla fisica è noto che due fili  $a$  e  $b$ , di notevole diverso, uniti con due giunzioni poste a temperature differenti  $T_1 > T_2$ , sono in grado di generare una *f.e.m.*  $e_o$ , se il circuito è aperto, o una corrente  $i$  se il circuito è chiuso.



Se il circuito è aperto, la tensione  $e_o$  fra i due conduttori, prodotta dall'effetto Seebeck è funzione di  $T_1 - T_2$ ; in altri termini

$$e_o = f(T_1 - T_2)$$

Da questa espressione emerge che con una termocoppia si può misurare la differenza di temperatura di un corpo rispetto a quella di un altro corpo, una volta che l'operazione di calibratura individui la forma della funzione  $f$ .

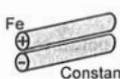
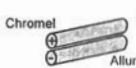

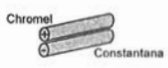

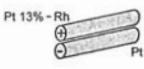
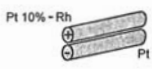
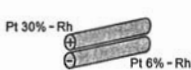
Se il circuito è chiuso, il passaggio della corrente  $i$ , innesca l'insorgere di due fenomeni: l'effetto Peltier e l'effetto Thomson, i quali possono inficiare le misure per valori elevati di  $i$ . E' questo il motivo per il quale per eseguire buone misure occorre utilizzare voltmetri ad alta impedenza di ingresso.

I metalli delle termocoppie vanno scelti, in modo da avere, a parità di  $T_1 - T_2$ , la massima variazione di tensione, cioè la massima sensibilità.

E' preferibile inoltre che:

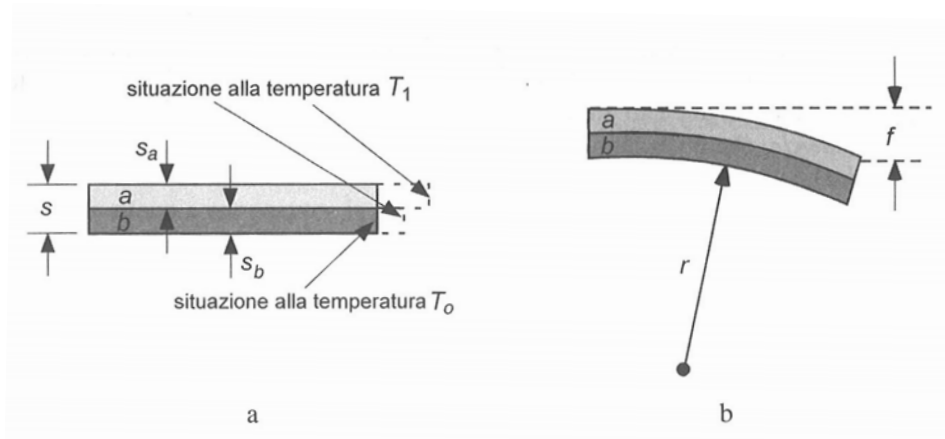
- la tensione sia legata alla temperatura da una legge lineare;
- termocoppia abbia buona resistenza meccanica, buona ripetitività e grande stabilità.

Nelle tabelle seguenti sono evidenziate alcuni tipi di termocoppie utilizzati nonché la loro correlazione con i vari ambienti di lavoro.

Indice e tipo di termocoppia		Note sull'impiego del materiale dei conduttori
J		Ambiente: riducente, inerte; non raccomandata per alte temperature.
K		Ambiente: ossidante, inerte; ampio campo di temperature.
T		Ambiente: leggermente ossidante, riducente, o inerte; buon comportamento in ambiente umido, utilizzate anche a basse temperature.
E		Ambiente: ossidante, inerte; alta sensibilità, cioè, alto valore della differenza di tensione per grado.
N		Come K; buona stabilità alle alte temperature.
R		Ambiente: ossidante, inerte; da non inserire in tubi metallici.
S		
B		Ambiente: ossidante, inerte; come R e S; utilizzate ad alte temperature.

### 12.3 Termometri bimetallici

Sono costituiti da due lamine di metallo, caratterizzate da differenti coefficienti di dilatazione lineare. Le lamine, quindi, una volta scaldate alla stessa temperatura, si dilatano in maniera differente, incurvandosi, come rappresentato in figura



Il raggio di curvatura  $r$  dipende dalla differenza di temperatura  $T_1 - T_0$  secondo l'espressione

$$r \cong \frac{2s}{3(\alpha_a - \alpha_b)(T_1 - T_0)}$$

Ove  $s$  è lo spessore complessivo delle due lamine;  $\alpha_a$  e  $\alpha_b$  i coefficienti di dilatazione lineare delle lamine  $a$  e  $b$ .

Uno dei due metalli è generalmente caratterizzato da un coefficiente di dilatazione molto piccolo. L'accuratezza varia in modo considerevole, mentre l'intervallo di funzionamento è compreso tra  $-50^\circ\text{C}$  e  $500^\circ\text{C}$  è molto frequente in campo industriale.

## 12.4 Trasduttori termoresistivi

Essi sfruttano la proprietà di alcuni materiali di variare in modo notevole la resistenza elettrica al variare della temperatura. Si dividono in:

- termoresistenze;
- termistori.

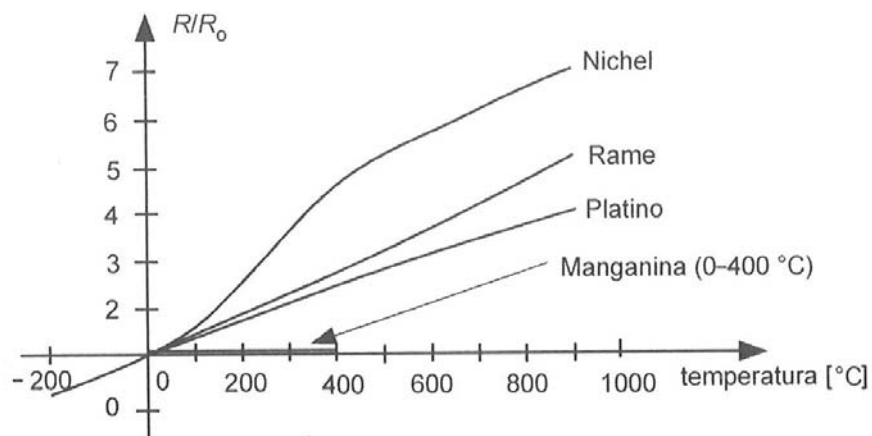
Le prime utilizzano resistenze metalliche per le quali la resistività  $\rho$  è legata alla temperatura dalla relazione

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot \{1 + a \cdot (T - T_0)\}$$

ove  $T_0$  è la temperatura di riferimento,  $T$  la generica temperatura ed  $a$  un coefficiente inversamente proporzionale al quadrato di  $T_0$ .

La suddetta formula è valida allorquando la resistività varia con la temperatura in modo lineare; in caso di andamenti non lineari  $\rho$  sarà fornita da un polinomio di grado superiore.

Nella figura che segue sono mostrati gli andamenti della curva  $R(T)$  per taluni materiali.



La variazione di resistenza prodotta da un cambiamento di temperatura può essere misurata con un ponte di Wheatstone, mediante l'utilizzo di galvanometri o voltmetri ad alta impedenza.

I termistori invece sono semiconduttori composti da una miscela di ossidi metallici, la cui resistenza è funzione della temperatura ed in particolare all'aumentare della temperatura la resistenza diminuisce in modo non lineare.

## **12.5 Pirometri**

Per la misura di alte temperature, oscillanti tra 1000 e 3000°C si utilizzano termocoppie speciali del tipo rodio-irridio/rodio, tungsteno/renio e boro/grafite.

Spesso però si ricorre ad un particolare tipo di termometro, chiamato pirometro, il cui funzionamento è basato sulle leggi dello scambio di energia tra due corpi neri.

I pirometri possono essere ad irraggiamento totale o ad irraggiamento parziale. Quello ad irraggiamento totale misura la potenza totale emessa dalla superficie di cui si vuole misurare la temperatura, mentre il pirometro ottico ad irraggiamento parziale misura la potenza emessa dalla superficie, ma solo nell'ambito di un intervallo di valori delle lunghezze d'onda, rientranti nel campo visibile dell'occhio umano.

## **12.6 Raccomandazioni per l'utilizzo dei termometri.**

Allorquando si eseguono misure di temperatura nei fluidi in maniera statica, soprattutto se la velocità del fluido è alta, insorgono errori causati sia dallo scambio termico tra trasduttore e ambiente, sia dall'impatto del fluido sul trasduttore.

Gli errori dovuti alla conduzione termica devono essere attentamente valutati nell'ambito delle misure di temperatura di un fluido in una condotta.

In tal caso infatti la misura viene effettuata, posizionando il sensore tramite un'asta immersa nell'ambiente.

Per eseguire una misura corretta occorre quindi valutare quanto il transito di calore lungo l'asta possa influire sul risultato della misura.

Inoltre se la temperatura del fluido è di gran lunga superiore a quella ambiente, l'irraggiamento tra il sensore di temperatura e la parete della condotta può modificare sensibilmente il risultato della misura.

Gli errori conseguenti prendono il nome di errori dovuti all'irraggiamento.

Esistono poi errori correlati alla velocità del fluido nella condotta in quanto l'impatto del filetto fluido sul sensore può alterare in maniera significativa il risultato della misura.



## CAPITOLO 13

### MISURE DI PRESSIONE

#### 13.1 Generalità

Dalla fisica si è appreso che tutte le molecole di un fluido sono dotate di energia cinetica e allorché urtano delle superfici vengono diffuse in differenti direzioni.

Tale variazione genera una forza perpendicolare alla superficie, che, riferita all'unità di superficie stessa, prende il nome di pressione del fluido.

E' ovvio che la pressione è intimamente correlata alla temperatura e alla densità del fluido, in quanto tali grandezze influenzano l'intensità e la frequenza delle collisioni delle molecole.

Gli strumenti per misurare la pressione prendono il nome di manometri o trasduttori di pressione.

Le pressioni in gioco nel settore industriale sono estremamente diversificate, per cui, di volta in volta, dovranno essere scelti opportunamente gli strumenti idonei ad adoperare nel campo dei valori di pressione da misurare.

Per pressioni superiori a quella atmosferica sono utilizzati manometri a deformazione elastica; per pressione attorno a quella atmosferica sono impiegati manometri a colonna di liquido, per pressioni bassissime occorre utilizzare particolari tipi di strumenti, che esulano dalla presente trattazione. Per comodità dello Studente si riporta la tabella, nella quale sono inserite le varie unità di misura della pressione e i vari fattori di conversione.

	Pa	bar	atm	Kgf/cm <sup>2</sup>	lbf/in <sup>2</sup>	torr	mmH <sub>2</sub> O
Pa	1	10 <sup>-5</sup>	9.86923 · 10 <sup>-6</sup>	1.01972 · 10 <sup>-5</sup>	1.45038 · 10 <sup>-4</sup>	7.50062 · 10 <sup>-3</sup>	1.01972 · 10 <sup>-1</sup>
bar	10 <sup>5</sup>	1	0.986923	1.01972	14.5038	750.062	10 197.2
atm	1.0132 · 10 <sup>5</sup>	1.01325	1	1.03323	14.6959	760	10 332.3
Kgf/cm <sup>2</sup>	98066.5	0.980665	0.967841	1	14.2233	735.559	10 <sup>4</sup>
lbf/in <sup>2</sup>	6894.76	0.0689476	0.0680460	0.0703070	1	51.7158	703.084
torr	133.322	1.33322 · 10 <sup>-3</sup>	1.31579 · 10 <sup>-3</sup>	1.35951 · 10 <sup>-3</sup>	1.93368 · 10 <sup>-2</sup>	1	13.5951
mmH <sub>2</sub> O	9.80665	9.80665 · 10 <sup>-5</sup>	9.67841 · 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	1.42233 · 10 <sup>-3</sup>	7.35559 · 10 <sup>-2</sup>	1

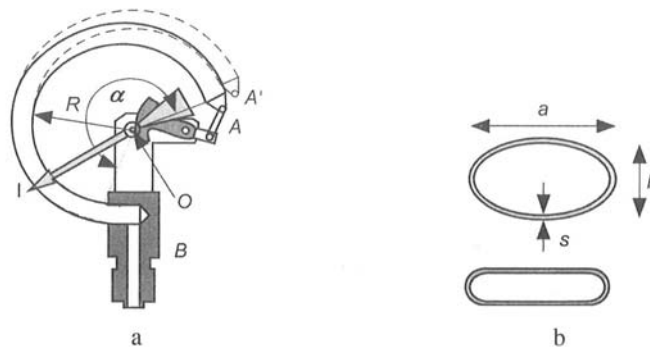
### 13.2 Manometri a deformazione

Lo strumento per la misura della pressione più diffuso è il manometro di Bourdon. Esso è realizzato con un tubo piegato ad arco di cerchio con un centro a sezione ellittica. Il tubo è collegato tramite un raccordo forato con l'ambiente in pressione ed è riempito dallo stesso fluido.

La pressione dentro il tubo tende a raddrizzarlo spostando l'estremo mobile da A a A'; tale spostamento è proporzionale alla pressione rilevata.

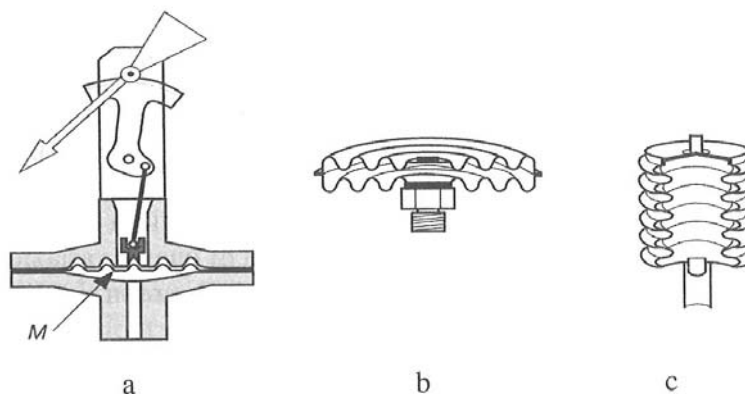
I manometri Bourdon vengono utilizzati per intervalli di pressione da pochi bar a 2000 bar.

Un esempio di manometro a membrana è rappresentato in figura.



### 13.3 Manometro a membrana

La misura delle pressioni in questo manometro è legata alla misura di uno spostamento di una membrana, *M* bloccata tra due flange, così come rappresentato in figura.



La pressione misurata con tale sistema è la pressione effettiva, in quanto una delle due camere delimitate dalla membrana è in collegamento con l'atmosfera.

La membrana presenta delle ondulazioni in modo da eliminare fenomeni di instabilità e ottenere una dipendenza lineare tra pressione e spostamento.

### **13.4 Trasduttori piezoelettrici e ad estensimetri**

I trasduttori piezoelettrici hanno caratteristiche comuni con i trasduttori di spostamento in quanto, come questi ultimi, il componente sensibile alla pressione è un cristallo piezoelettrico.

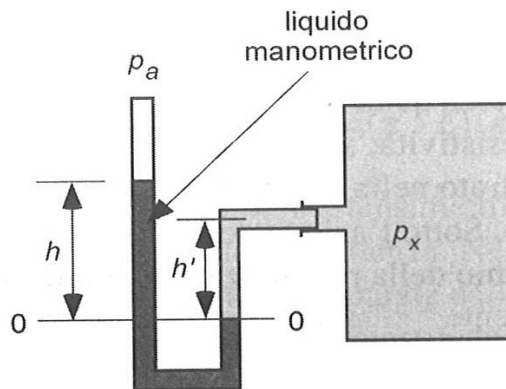
Questo, sottoposto ad una pressione  $P$ , si deforma, generando una carica elettrica  $Q$  di segno opposto su due superfici parallele proporzionale alla deformazione subita e di conseguenza alla pressione.

Se sulle superfici si posizionano due piastrine metalliche si ottiene un condensatore piano e la deformazione che ha generato la carica  $Q$  si traduce in una tensione proporzionale alla deformazione stessa, consentendo la misura della pressione rilevata.

Nei trasduttori ad estensimetri la pressione deforma una membrana, su cui sono incollati degli estensimetri, collegati ad un ponte di Wheatstone per cui le deformazioni della membrana sono tradotte in una tensione elettrica proporzionale ad una pressione rilevata.

### 13.5 Manometro a dislivello di liquido

Pressioni oscillanti tra  $\pm 1$  bar, si utilizzano manometri ad U, il cui schema è mostrato in figura



Il manometro è collegato con l'ambiente alla pressione assoluta  $p_x$  maggiore di quella atmosferica.

Assumendo come livello di riferimento il segmento O-O si può scrivere

$$p_a + \gamma \cdot h = p_x + \gamma_x \cdot h'$$

Ove:

- $p_a$  = pressione sul menisco superiore;
- $h$  = distanza tra i due menischi;
- $h'$  = distanza tra l'ingresso del manometro alla pressione di  $p_x$  e il menisco inferiore;
- $\gamma$  = peso specifico del liquido del manometro;
- $\gamma_x$  = peso specifico del fluido dell'ambiente in pressione.

Di norma  $\gamma_x$  è di gran lunga più piccolo di  $\gamma$ , per cui il suo valore può essere trascurato e la formula precedente diventa

$$p_x - p_a = \gamma \cdot h$$

Da tale relazione emerge che conoscendo la distanza tra i due menischi è possibile risalire direttamente alla misura della pressione  $p_x$  una volta nota la pressione  $p_a$ .

Se il ramo libero del manometro viene chiuso e all'interno si genera un vuoto spinto allora la formula diventa

$$p_x = \gamma \cdot h$$

Tale accorgimento viene di solito impiegato per misurare pressioni assolute inferiori a quella atmosferica.

## CAPITOLO 14

### MISURE DI PORTATA E DI VELOCITA' DEI FLUIDI

#### 14.1 Generalità

Nell'ambito delle misure industriali assume fondamentale importanza procedere alla misura della portata massica o della portata volumetrica di un fluido.

Per tale scopo vengono utilizzati i contatori i quali misurano la quantità di fluido che defluisce in un determinato intervallo di tempo.

Spesso si risale alla portata massica e alla portata volumetrica mediante una misura indiretta della velocità del fluido in una condotta, sfruttando il legame che intercorre tra quest'ultima e la caduta di pressione originata da un'ostruzione opportunamente inserita nel condotto.

Quando è presente un'ostruzione, se il moto è di tipo turbolento, la perdita di pressione  $\Delta p$  è proporzionale al quadrato della velocità.

Dalla misura di tale differenza di pressione si può risalire alla misura della velocità del fluido, nonché alla sua portata volumetrica o alla sua portata massica, una volta che sia conosciuta la densità del fluido stesso.

La relazione che intercorre tra portata massica e caduta di pressione dipende dalla geometria della ostruzione nonché dalle caratteristiche del moto ed in particolare dal numero di Reynolds.

In proposito si ricorda che il numero di Reynolds definito dalla relazione

$$Re = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu}$$

in cui

- $\mu$  è la viscosità dinamica
- $D$  è la lunghezza caratteristica del fenomeno esaminato, che, nel caso di flusso in condotte, coincide con il diametro di queste ultime
- $\rho$  è la densità del fluido

- $V$  è la velocità media del fluido

misura l'importanza relativa tra le forze di inerzia e le forze viscosi ed è in grado di caratterizzare il regime di moto. Quest'ultimo sarà laminare (andamento parallelo dei singoli filetti fluidi) se Reynolds è inferiore a 2000, sarà turbolento (filetti fluidi caratterizzati da vortici) se Reynolds supera il valore di 4000.

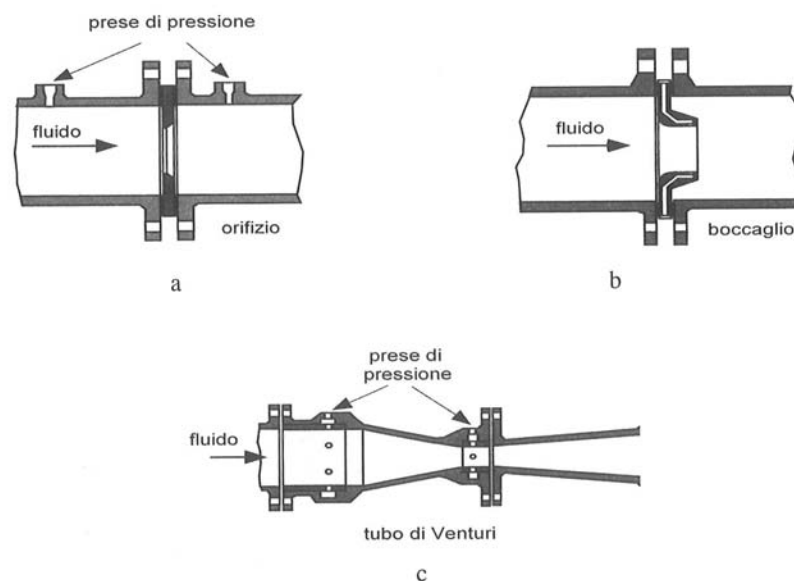
Lo Studente farà un utile esercizio per dimostrare che, dimensionalmente, Reynolds è il rapporto tra le suddette forze e per individuare le unità di misura nel sistema internazionale delle varie grandezze in gioco.

## 14.2 Dispositivi di ostruzione

Di norma vengono utilizzati vari dispositivi di ostruzione, quali:

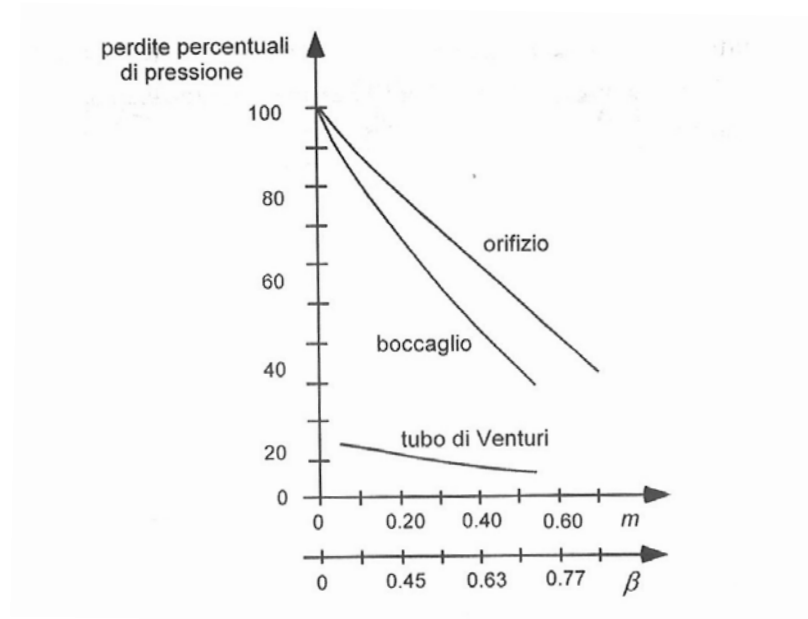
- orifizi;
- diaframmi;
- boccagli;
- tubo Venturi.

In figura sono rappresentati i diversi dispositivi di strozzamento.

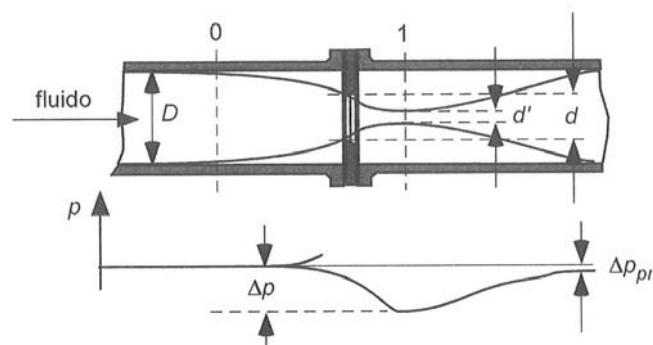


Invece di seguito si riporta in apposito grafico l'andamento delle perdite di pressione in funzione del diametro della ostruzione per i vari tipi di strozzamento, chiarendo che le perdite di pressione sono espresse in valore percentuale e che il valore  $M$  riportato in ascissa è il parametro ottenuto dividendo il quadrato del diametro dell'ostruzione per il quadrato del diametro del condotto.

Il parametro  $\beta$  chiamato coefficiente di strozzamento è invece il rapporto tra il diametro  $d$  dell'ostruzione e il diametro  $D$  del condotto.



La figura seguente mostra il caratteristico profilo dei filetti fluidi a monte e a valle di un orifizio.



La sezione 0 è relativa alla zona in cui non vi è perturbazione della vena fluida, mentre la sezione 1 è relativa alla massima contrazione della vena.

Il valore  $\Delta p$  è proprio la differenza di pressione fra le due sezioni.



Scrivendo l'equazione di Bernoulli tra le due sezioni si ottiene la seguente espressione, valida per fluidi incomprimibili e non viscosi.

$$\frac{v_0^2}{2} + \frac{p_0}{\rho} = \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho}$$

ove

- $v$  e  $p$  sono rispettivamente la velocità media e la pressione media sulla sezione.
- $\rho$  è la densità del fluido.

Combinando la precedente espressione, con l'equazione di continuità

$$v_0 \cdot S_0 = v_1 \cdot S_1$$

(con  $S_0$  ed  $S_1$  le sezioni del condotto e della massima costrizione della vena) si ottiene

$$v_1 = \sqrt{\frac{p_0 - p_1}{\rho} \cdot \frac{2}{1 - \left(\frac{S_1}{S_0}\right)^2}}$$

Pertanto, ricordando che la portata massica  $W$  è uguale a

$$W = v_1 \cdot \rho \cdot S_1$$

si ha

$$W = \sqrt{2\rho(p_0 - p_1)} \cdot \frac{S_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_1}{S_0}\right)^2}}$$

La portata volumetrica sarà invece

$$Q = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_1)}{\rho}} \cdot \frac{S_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_1}{S_0}\right)^2}}$$

L'esame delle due formule evidenzia che le portate massica e volumetrica sono intimamente correlate alla differenza di pressione  $\Delta p$  tra le sezioni 0 e 1 e al valore della sezione di massima contrazione della vena  $S_1$ .

Per tener conto che si sono adottate ipotesi semplificative, quali quella di fluido ideale e per tener conto che non si può conoscere aprioristicamente né la posizione né il valore di detta sezione, si fa riferimento a valori di portate effettive quale la portata massica effettiva  $We$  che viene stimata tramite la seguente espressione

$$We = cd \cdot Wr$$

In cui  $cd$  è il coefficiente di efflusso determinato sperimentalmente e  $Wr$  è la portata di riferimento pari a

$$Wr = \frac{sd}{\sqrt{1-m}} \cdot \sqrt{2\rho(p_a - p_b)}$$

ove

- $sd$  è l'area della luce dell'orifizio
- $m$  è uguale a  $\frac{sd}{S_0}$  che è il parametro che definisce l'ostruzione
- $p_a$  e  $p_b$  sono le pressioni valutate in posizioni standard distanti di una lunghezza  $a$  e  $b$ , a monte e a valle dell'ostruzione

La portata di riferimento è inoltre influenzata dal numero di Reynolds e dipende, così come si evince dalle formule dalle due prese di pressione, dalle dimensioni di condotta e dall'orifizio.

Lo stesso coefficiente di efflusso è dipendente oltre che dalle posizioni delle prese di pressione, anche dal numero di Reynolds.

Di gran lunga più complicata è la trattazione teorica per ricavare una relazione tra  $W$  e  $\Delta p$  nel caso di fluidi comprimibili.

In questo caso si adotta una relazione simile alla precedente, nella quale compare il coefficiente di comprimibilità  $\epsilon$  fornito da opportune tabelle o ricavabile mediante espressioni matematiche.

$$Wr = \frac{sd \cdot cd \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 - \left(\frac{sd}{S_0}\right)^2}} \cdot \sqrt{2\rho(p_0 - p_1)}$$

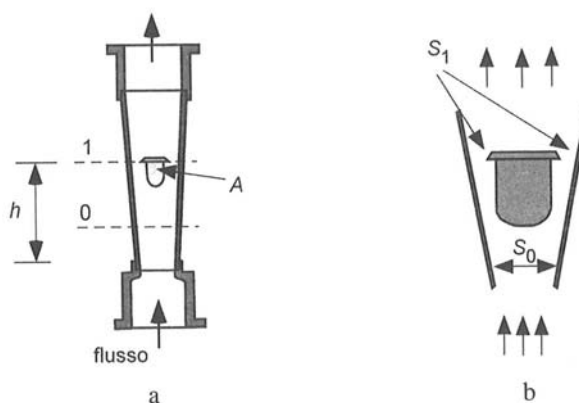
Il valore della densità  $\rho$  va invece determinato in funzione dei valori di pressione, misurata a monte dello strozzamento e dei valori di temperatura, misurata ad una distanza a monte dello strozzamento almeno pari a cinque volte il diametro della condotta.

### 14.3 Flussometri

I flussometri adoperati per la misura di portata e velocità sono di varia natura:

- flussometri ad aria variabile
- flussometri a spinta
- flussometri a vortice.

I flussometri ad aria variabile sono costituiti da un condotto conico verticale percorso da un fluido dal basso verso l'alto come mostrato in figura.



Dentro il corpo conico è posto il galleggiante A la cui densità è superiore a quella del fluido.

La spinta di quest'ultimo sul galleggiante tende a contrastare quella del suo peso, diminuito dalla spinta di Archimede.

In condizioni stazionarie le forze agenti si equilibrano e il galleggiante si ferma ad una certa altezza  $h$ .

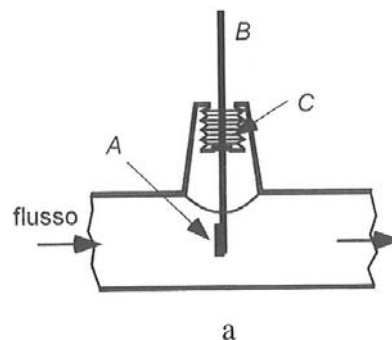
Al variare della velocità varia la spinta del fluido sul galleggiante che modifica l'altezza  $h$  in modo da mantenere costante la differenza di pressione tra la sezione 0 e la sezione 1.

Se la velocità diminuisce, cala la perdita di pressione e il galleggiante comincia a scendere.

L'utilizzo di tale strumento serve soprattutto ad evidenziare la legge che lega la portata all'altezza  $h$  del galleggiante, alla densità del fluido e al numero di Reynolds.

Il flussometro a spinta è particolarmente adatta per la misura di portata di fluidi ad alta densità.

Esso è rappresentata in figura



Il fluido colpendo il piattello di area  $A$  costringe l'asta che lo sostiene a spostarsi ruotando intorno al centro  $C$ .

Lo spostamento dell'estremità  $B$  viene rilevato da un sensore.

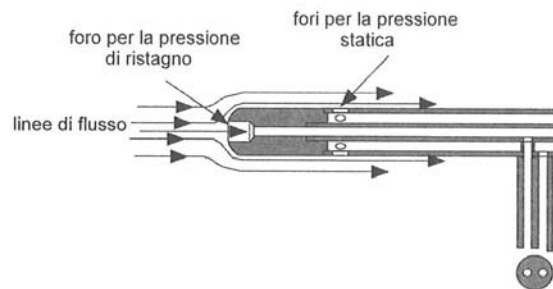
La pressione sul piattello è proporzionale alla pressione dinamica  $\frac{\rho v^2}{2}$ .

Il flussometro a vortici utilizza un accelerometro piezoelettrico in grado di misurare le vibrazioni prodotte dal rapido apparire e scomparire dei vortici di Karman che compaiono e scompaiono rapidamente a valle di un ostacolo posto nella condotta.

Con tali flussometri si possono misurare portate di fluidi in forma sia liquida che gassosa.

## 14.4 Tubo di Pitot

Il tubo di Pitot rappresentato in figura



è costituito da due tubi coassiali, uno dei quali ha un foro all'estremità, che sono investiti frontalmente dal flusso di velocità  $V$ .

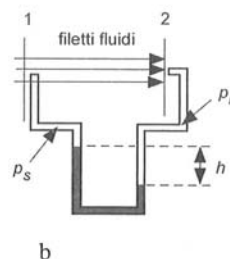
L'energia cinetica delle particelle di fluido che entrano nel foro centrale si trasforma in un aumento di energia potenziale (energia di pressione), mentre il tubo esterno è forato lateralmente per essere a contatto con la pressione del fluido stesso.

I due tubi sono collegati con un manometro differenziale che misura la differenza di pressione.

In altri termini il fluido, investendo frontalmente il tubo di Pitot trasforma la loro energia cinetica in pressione, che allorquando la velocità si annulla assume il suo valore massimo il quale prende il nome di pressione di ristagno  $p_r$ .

I filetti di fluido che invece lambiscono i fori laterali dello strumento trasferiscono all'interno del tubo la pressione statica  $p_s$  del fluido.

La differenza tra pressione di ristagno e quella statica, misurata dal manometro differenziale è detta pressione dinamica  $p_d$ , la quale è pari a  $\gamma \cdot h$  ove  $h$  è il livello tra i due menischi rappresentati in figura



Applicando l'equazione di bilancio dell'energia tra le sezioni 1 e 2, si dimostra che per fluidi incompruibili la velocità  $V_1$ , nella sezione 1 è fornita dalla seguente espressione

$$V_1 = \sqrt{2 \frac{p_2 - p_1}{\rho}} = \sqrt{2 \frac{p_d}{\rho}}$$

Per i fluidi comprimibili invece l'espressione si trasforma in

$$V_1 = \epsilon \sqrt{2 \frac{p_d}{\rho_1}}$$

In cui  $\epsilon$  è un parametro determinato sperimentalmente che dipende dalla pressione dinamica, dalla pressione statica e dall'esponente della isentropica che caratterizza la trasformazione del fluido, mentre  $\rho_1$  è la densità del fluido nella sezione 1.

### **14.5 Anemometro a filo caldo**

Tale strumento è composto da un supporto su cui è posizionato un filo percorso da una corrente elettrica, il quale viene investito dal fluido avente velocità  $V$ .

Questo trasduttore sfrutta per la misura di tale velocità, la caratteristica del conduttore di variare la sua resistenza elettrica in funzione della temperatura.

Il conduttore di norma è costituito da un filo di tungsteno avente diametro 8 micron, lunghezza 1 mm e resistenza  $1\Omega$ , attraversato da una corrente elettrica  $i$  che sviluppa per effetto Joule una potenza  $W$  data dall'espressione

$$W = R \cdot i^2$$

Il filo a contatto con il fluido in moto, varia, tenendo la corrente costante, la sua temperatura e quindi la sua resistenza in funzione della velocità  $V$  del fluido.

Dalla misura della variazione di resistenza può quindi risalirsi alla stima della velocità. In tal caso l'anemometro prende il nome di anemometro a corrente costante.

Invece nell'anemometro a temperatura costante, la temperatura del filo viene mantenuta costante al variare della velocità del fluido, agendo sull'intensità della corrente  $i$ .

In questo modo si mantiene inalterato il valore della resistenza e misurando la corrente, con un amperometro si può risalire alla velocità del fluido mediante una relazione lineare tra il quadrato della corrente  $i$  e la radice quadrata della velocità del fluido stesso.

## 14.6 Esercizi

Sapendo che la viscosità dinamica dell'acqua alla temperatura di 12 °C vale 1,235 cP, calcolare il numero di Reynolds relativo al flusso di tale fluido in una tubazione avente diametro 100 mm e caratterizzato da una portata di 40 m<sup>3</sup>/h.

### Svolgimento

Si ricordi che Reynolds=  $Re = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu}$  ove

- $\mu$  è la viscosità dinamica
- $D$  è la lunghezza caratteristica del fenomeno esaminato, che, nel caso di flusso in condotte, coincide con il diametro di queste ultime
- $\rho$  è la densità del fluido
- $V$  è la velocità media del fluido.

Utilizzando le unità del S.I

$$D = 100 \text{ mm} = 0.1 \text{ m}$$

$$Q \text{ portata} = 40 \text{ m}^3/3600 \text{ s} = 1.11 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \text{area della sezione del tubo} = 0.1 \times 0.1 \times 3.14 / 4 = 7.85 \times 10^{-3}$$

$$\text{Ricordando che } 1 \text{ poise (P)} = 0.1 \text{ Pa s} \quad 1 \text{ cP} = 0.001 \text{ Pa s}$$

$$\text{Pertanto } \mu = 1.235 \text{ cP} = 1.235 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$$

$$\text{Inoltre, ritenendo il fluido incompressibile, } V = Q / A = 1.11 \times 10^{-2} / 7.85 \times 10^{-3}$$

$$= 1.41 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{da cui } Re = \frac{10^3 \times 1.41 \times 10^{-1}}{1.235 \times 10^{-3}} = 114170$$

## CAPITOLO 15

### MISURE DI UMIDITA'

#### 15.1 Generalità

Si ricorda che l'umidità rappresenta la massa d'acqua allo stato di vapore miscelata nell'aria secca.

La stessa atmosfera terrestre è caratterizzata da una miscela di questo tipo.

In moltissime applicazioni tecniche, soprattutto in relazione alle condizioni microclimatiche e a quelle che interessano il comfort ed il benessere fisiologico, l'umidità rappresenta un parametro fondamentale, di cui occorre tener conto.

Si definisce titolo o umidità associata il rapporto

$$x = \frac{M_v}{M_a}$$

ove

$M_v$  costituisce la massa di vapore presente nell'aria

$M_a$  è la massa dell'aria secca.

Il titolo può quindi assumere qualsiasi valore positivo nell'intervallo  $0 \div \infty$  (aria secca – vapor d'acqua puro).

Si definisce invece grado igrometrico o umidità relativa il rapporto

$$U = \frac{P_v}{P_s}$$

ove

$P_v$  è la pressione del vapore nella miscela aria-vapore

$P_s$  è la pressione di saturazione del vapore alla temperatura operativa



In aria satura

$$P_v = P_s$$

Per legare queste due variabili si può fare riferimento o al diagramma psicrometrico di Mollier che presenta il titolo in ordinate e la temperatura in ascisse oppure procedere per via analitica con l'equazione

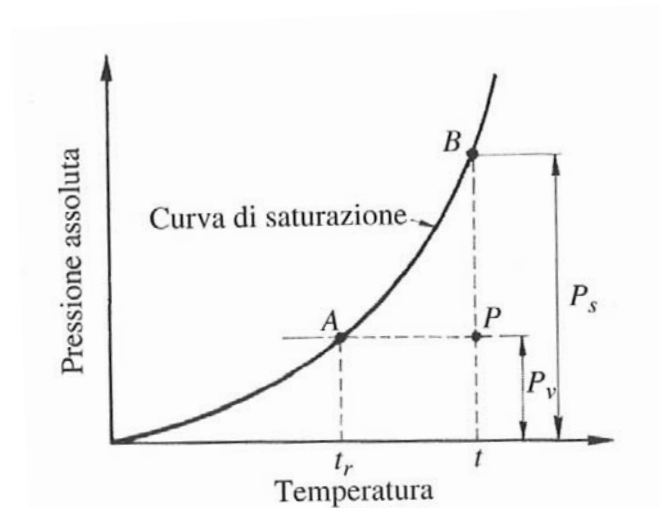
$$U = \frac{P_t}{P_s} \cdot \frac{x}{x + 622}$$

ove

$P_t$  rappresenta la pressione totale della massa d'aria

$x$  rappresenta il titolo

Si consideri la curva di saturazione del vapor d'acqua



Se si traccia per il punto  $P$  la parallela per l'asse delle ordinate essa interseca la curva di saturazione nel punto  $B$ ; come è noto la  $P_s$  corrispondente al punto  $B$  è la pressione di saturazione alla temperatura  $t$  e rappresenta la massima pressione che può assumere il vapor d'acqua a quella temperatura.

Se invece si traccia per  $P$  la parallela all'asse delle ascisse, la curva di saturazione viene intersecata nel punto  $A$ , cui corrisponde una temperatura  $t_r$  che è la temperatura minima alla quale la miscela d'acqua può avere la pressione parziale di vapore pari a  $P_v$ .

La temperatura  $t_r$  si chiama temperatura di rugiada della miscela.

## 15.2 Strumenti di misura

In pratica la misura dell'umidità relativa di una miscela viene effettuata attraverso la misurazione delle temperature a bulbo secco (asciutto)  $T_a$  e a bulbo umido  $T_b$ .

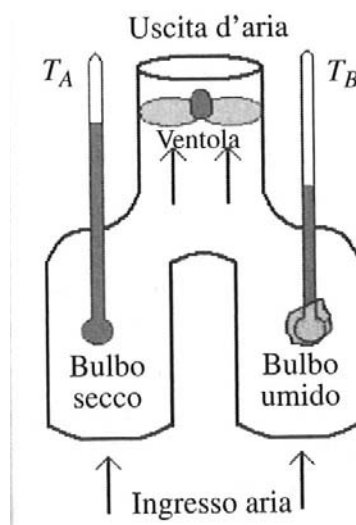
La temperatura a bulbo secco dell'aria umida non è altro che la temperatura che si misura con un comune termometro.

Mentre per misurare la temperatura a bulbo umido si utilizza un secondo termometro il cui bulbo viene coperto da una garza imbevuta d'acqua e fatto muovere molto rapidamente per potersi arricchire ulteriormente di vapore in modo che l'acqua della garza evapora nell'aria in quantità proporzionale alla capacità dell'aria di assorbire umidità.

L'evaporazione dell'acqua avviene attraverso il calore fornito dal termometro stesso la cui temperatura scende al di sotto di quella a bulbo asciutto.

Quando lo scambio termico si è stabilizzato la temperatura del termometro non si abbassa più e rappresenta quindi la temperatura a bulbo umido che è quindi sempre minore di quella a bulbo secco.

Nella figura è rappresentato uno psicrometro. Tale elemento a forma di Y rovesciato costituito da due schermi cilindrici in acciaio inox all'interno dei quali sono posizionati due termometri a mercurio, uno dei quali presenta il bulbo avvolto da una garza bagnata.



I due condotti confluiscono in un corpo cilindrico in cui è alloggiata una ventola che forza il movimento di aspirazione dell'aria.

A stabilizzazione avvenuta vengono individuate le temperature a bulbo asciutto e a bulbo umido  $T_a$  e  $T_b$ .

La trasformazione che permette il passaggio da  $T_a$  a  $T_b$  è di tipo isoentalpico per cui

$$h_a - h_b = Q - L$$

ove

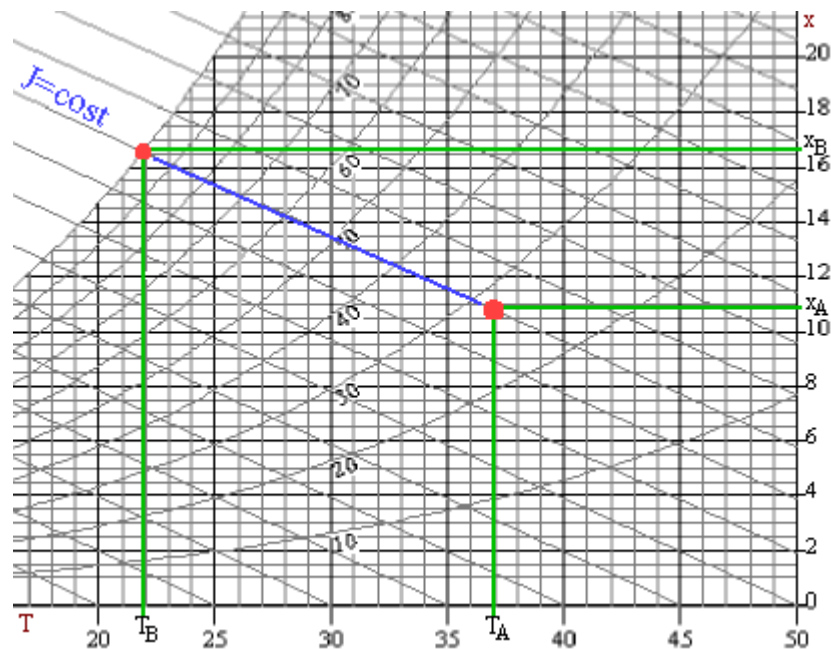
$Q$  è il calore scambiato, che per un sistema isolato e adiabatico vale 0

$L$  è il lavoro compiuto che, trascurando quello della ventola, può essere assunto pari a 0

Pertanto

$$h_a = h_b$$

Le trasformazioni descritte possono essere tracciate con delle linee sul diagramma psicrometrico come in figura



La procedura per la determinazione dell'umidità è la seguente: le temperature a bulbo asciutto e a bulbo umido misurate si riportano sul diagramma in ascisse, si determina il punto di intersezione  $B$  tra la verticale passante per  $T_B$  e la curva

$U=100\%$  individuando così sia il valore di umidità associata o titolo  $x_B$  sia l'isoentalpica relativa; il punto  $A$  si determina mediante l'intersezione fra la verticale per  $T_A$  e l'isoentalpica e permette di individuare il valore del titolo corrispondente  $x_A$ .

In tal modo si risale all'umidità relativa dell'aria.

## CAPITOLO 16

### TARATURA STATICA DI UN DINAMOMETRO

#### 16.1 Generalità

Nel presente paragrafo si vogliono illustrare gli aspetti salienti concernenti la taratura statica di un dinamometro ad estensimetri a resistenza metallici.

Si ricorda che il dinamometro è in grado di eseguire una misura indiretta della forza attraverso la misura della deformazione che essa induce.

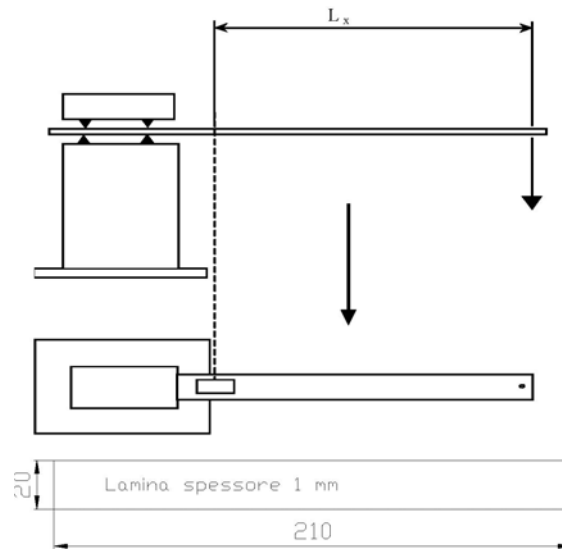
La relazione che lega la forza alla deformazione può essere valutata, in via teorica, attraverso un modello matematico; in via sperimentale la determinazione di tale relazione consente di ricavare la curva di taratura statica e di esprimere un giudizio quantitativo sia sulla bontà del modello di previsione, sia sulle misure effettuate.

Per eseguire la taratura di norma viene utilizzata una catena strumentale costituita da:

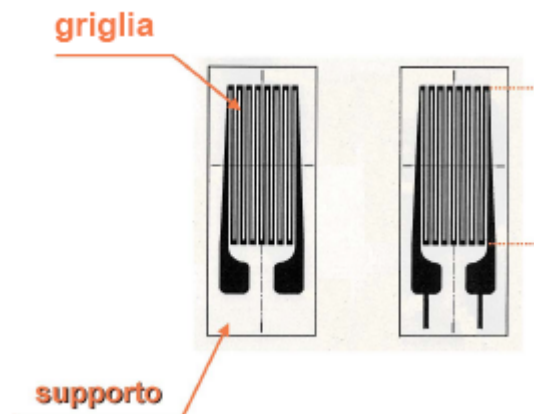
- 1) dinamometro;
- 2) sistema di pesatura;
- 3) modulo di condizionamento del segnale;
- 4) amplificatore del segnale;
- 5) convertitore analogico/digitale;
- 6) dispositivo di visualizzazione/acquisizione.

Il dispositivo sperimentale è costituito da una lamina metallica di basso spessore (ad esempio 1 mm) con modulo di elasticità  $E = 210 \text{ GPa}$ , una densità di  $7800 \text{ Kg/m}^3$ .

Un sistema di norma utilizzato è rappresentato in figura



Nella figura successiva è illustrato un tipico estensimetro elettrico a resistenza metallico costituito essenzialmente da un supporto in resina e da una griglia.



Si ricorda che la relazione base che caratterizza un estensimetro è

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

ove

$K$  = Gauge factor

$\varepsilon$  = deformazione griglia

$R$  = resistenza griglia

$\Delta R$  = variazione resistenza griglia

## **16.2 Modalità di posizionamento degli estensimetri**

Lo sperimentatore dopo aver rilevato i parametri caratteristici dell'estensimetro, quali il fattore di taratura, il fattore di sensibilità trasversale, resistenza e dopo aver rilevato il valore della temperatura ambiente, procede all'incollaggio degli estensimetri.

Esso è preceduto dall'abrasione con carta vetrata della zona di applicazione, la quale viene successivamente pulita e raschiata.

Si procede poi alla misura della resistenza elettrica dell'estensimetro mediante un multimetro digitale e si prepara la zona di incollaggio, applicando un leggero strato di adesivo, sul quale viene posto l'estensimetro stesso, su cui si esercita con le dita una leggera compressione.

Alla fine di tale operazione si ricontrolla la misura della resistenza elettrica e si procede alla saldatura dei terminali ed al fissaggio dei cavi.

Dopo ognuna di tali operazioni viene sempre ricontrollata la misura della resistenza elettrica con multimetro digitale.

Terminate tutte le precedenti operazioni, di norma, si applica un leggero strato protettivo al di sopra degli estensimetri.

Lo sperimentatore dovrà tener conto che ogni adesivo presenta sue peculiari caratteristiche. Gli adesivi ad azione rapida, costituiti essenzialmente da cianoacrilati, polimerizzano in tempi brevissimi e possono quindi essere utilizzati solo per prove di breve durata ed a temperatura ambiente.

Gli adesivi ad azione lenta, costituiti essenzialmente da resine epossidiche o resine fenoliche possono essere utilizzati per prove di lunga durata e a temperature e pressioni anche elevate.

### 16.3 Modello matematico di previsione

Lo schema illustrato nel primo paragrafo è relativo ad una trave incastrata ad un estremo e libera all'altro la quale, anche in riferimento alla figura sottostante possono essere utilizzate le seguenti espressioni, ove

$\varepsilon$  è la deformazione

$\sigma$  è la tensione

$E$  è il modulo di elasticità

$M$  è il momento flettente

$P$  è la forza applicata all'estremità

$L$  è la lunghezza della trave incastrata;

$J$  è il momento di inerzia della sezione rettangolare della trave avente base  $b$  e altezza  $h$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

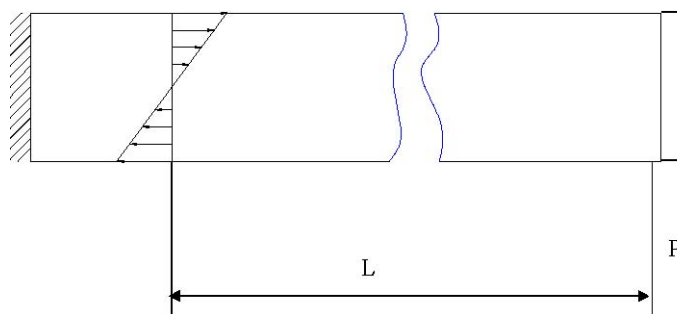
$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$M = P \cdot L$$

$$J = \frac{bh^3}{12}$$

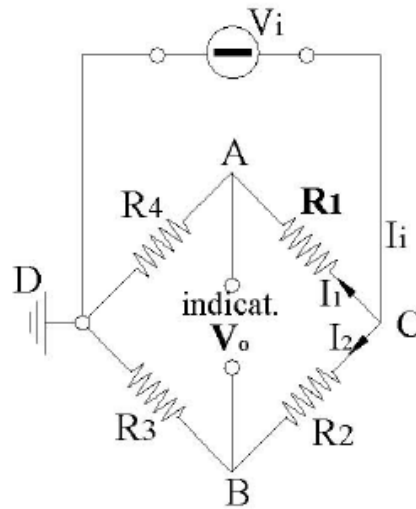
$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_f} = \frac{M \cdot h}{2 \cdot J}$$

$$\varepsilon = \frac{Mh}{2EJ} = 6 \frac{PL}{Ebh^2}$$



Si ricorda che in riferimento al ponte di Wheastone rappresentato in figura vale la relazione





$$\left( \frac{\Delta V_0}{V_i} \right) = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

ove

$\Delta V_0$  è lo squilibrio di tensione misurato dall'indicatore

$V_i$  è la tensione di alimentazione del ponte

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

Al fine di compensare gli effetti interferenti della temperatura si impiega per  $R_2$  un estensimetro applicato sullo stesso materiale del provino che non sia sollecitato.

## 16.4 Taratura

Al fine di procedere alla taratura dello strumento lo sperimentatore procederà dapprima alla taratura teorica, attraverso le seguenti fasi:

- 1) misura con calibro delle caratteristiche geometriche delle lamine;
- 2) incollaggio di un estensimetro in prossimità del vincolo;
- 3) misura con calibro della posizione degli estensimetri incollati sulle facce della lamina;
- 4) determinazione della curva di taratura teorica attraverso le relazioni e considerando un'opportuna incertezza sulla misura della massa (di norma pari all'1%) ed un valore di accelerazione di gravità pari a  $9,80665 \text{ ms}^{-2}$ .

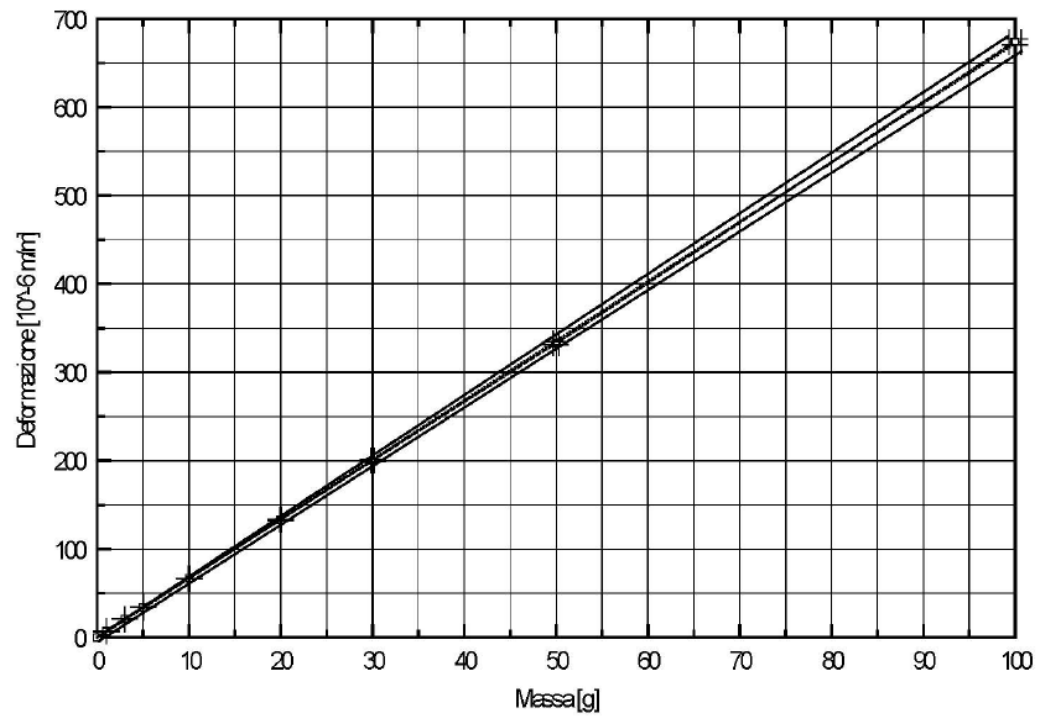
Le masse che di volta in volta vengono utilizzate sono pari a grammi 1, 3, 5, 10, 20, 50, 100 e 200.

Per quanto concerne la taratura sperimentale le fasi sono:

- a) collegamento dei terminali degli estensimetri alla centralina ed al ponte, impostando opportunamente il fattore di taratura;
- b) accensione della centralina e attesa per circa 10 minuti fino ad ottenere la stabilizzazione dei valori;
- c) posizionamento del piattello sul dinamometro e azzeramento del ponte con le resistenze compensatrici;
- d) posizionamento progressive delle masse sul piattello, rilevando di volta in volta il valore della deformazione corrispondente (costruzione della curva di carico);
- e) con la medesima successione si tolgono le masse e si rilevano le deformazioni, costruendo così la curva di scarico;
- f) le operazioni di cui ai punti d) ed e) vengono ripetute per tre volte;
- g) costruzione di un grafico di tutti i valori ottenuti, evidenziando eventuali incertezze di isteresi, risoluzione, ripetibilità e sensibilità.

Dopo aver eseguito tutte queste operazioni si confrontano le risultanze della taratura teorica e della taratura sperimentale, al fine di determinare la compatibilità dei risultati.

Una tipica curva di taratura è rappresentata in figura



## CAPITOLO 17

### STUDIO DINAMICO DI UNO STRUMENTO

#### 17.1 Generalità

Uno strumento viene definito dinamicamente lineare, allorquando è possibile descrivere il moto del suo equipaggio mobile mediante un'equazione differenziale lineare a coefficienti costanti, che leghi la grandezza in ingresso (misurando) alla grandezza in uscita.

Un'equazione differenziale di tal genere può essere del tipo:

$$a \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = y(t)$$

ove

$y(t)$  è la grandezza in ingresso

$x(t)$  è la grandezza in uscita.

La soluzione di tale equazione è del tipo  $x(t) = x'(t) + x''(t)$  ove  $x'(t)$  rappresenta la soluzione dell'omogenea associata, mentre  $x''(t)$  è l'integrale particolare.

Sul piano fisico la soluzione dell'omogenea associata rappresenta il transitorio dello strumento, mentre l'integrale particolare descrive la risposta a regime.

Lo studio dinamico di norma viene condotto per mezzo di due ingressi di prova particolari: il primo utilizza la risposta a gradino che è particolarmente adatta a studiare il transitorio e quindi la  $x'(t)$ , mentre il secondo fa riferimento alla risposta in frequenza che è idonea ad evidenziare le caratteristiche dinamiche nel comportamento a regime.

Se l'equazione differenziale è particolarmente semplice come quella del tipo  $x = \frac{b}{a}y$ , nella quale la variabile tempo non compare in forma esplicita, si può ritenere che essa sia correlabile ad un comportamento dinamico ideale caratterizzato da una risposta istantanea.

Un tipico esempio può essere fornito dal trasduttore di spostamento per il quale valgono le seguenti relazioni

$$R = \rho \frac{Y}{S} \qquad r(t) = \rho \frac{y(t)}{S}$$

dove con S si è indicata la sezione del filo che costituisce la resistenza;

quindi la relazione che lega la differenza di potenziale  $e(t)$  alla generica posizione di  $y(t)$  e alla resistenza  $r(t)$  è del tipo

$$e(t) = r(t)I = r(t) \frac{E}{R} = \frac{r(t)}{R} E = \frac{\rho \cdot y(t) / S}{\rho \cdot Y / S} E = \frac{y(t)}{Y} E$$

dove la variabile tempo  $t$  non compare esplicitamente, ma solo come variabile indipendente della posizione  $y = y(t)$ .

Orbene la relazione  $e = \frac{E}{Y}y$  esprime anche la *curva di graduazione* del potenziometro, impiegato come trasduttore di posizione. Inoltre la derivata  $\frac{de}{dy} = \frac{E}{Y}$  rappresenta proprio la *sensibilità* del trasduttore espressa in  $[V/m]$ .

Allorquando l'equazione dinamica di uno strumento coincide con la curva di graduazione, si è in presenza di strumenti di ordine zero.

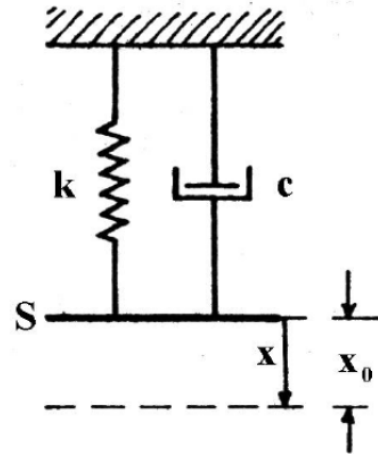
Lo strumento invece si definisce del primo ordine allorquando esso è in grado di immagazzinare energia, sotto una sola forma, in almeno uno dei suoi elementi costitutivi.

Per comprenderne il funzionamento si fa riferimento allo schema riportato in figura, nel quale si ipotizza l'utilizzo di un componente  $S$  privo di massa che è collegato al telaio mediante un elemento elastico di costante  $K$  e uno smorzatore viscoso di costante  $C$ .

Supponendo di spostare manualmente l'elemento  $S$  di una quantità  $x_0$ , all'istante  $t=0$  si lascia il suddetto elemento.

Ovviamente l'elemento elastico di costante  $K$  tenderà a riportare  $S$  nella posizione iniziale e durante lo spostamento verso tale posizione lo smorzatore viscoso eserciterà una forza avente direzione opposta al moto.

Imponendo l'equilibrio delle forze durante lo spostamento, si potrà scrivere, avendo trascurata la massa di  $S$ , la seguente espressione:



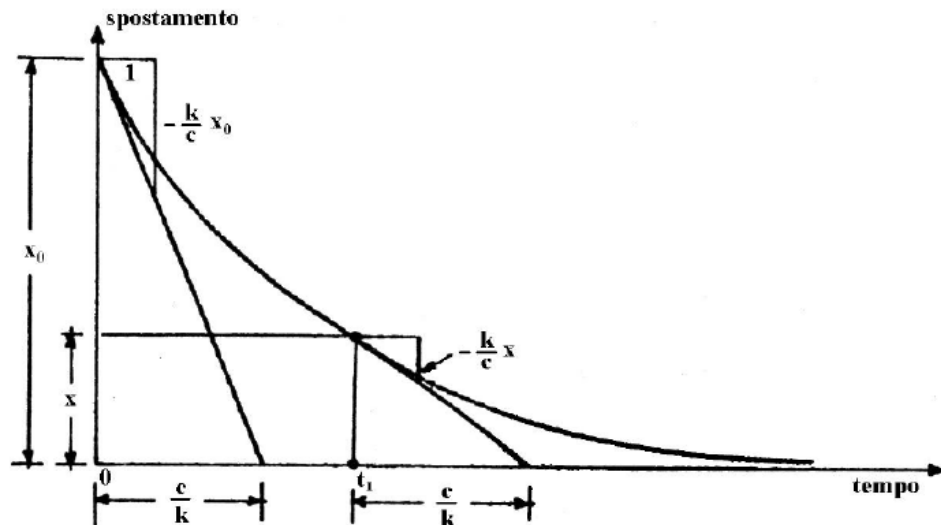
$$Kx = -c \dot{x}$$

Tale espressione è un'equazione differenziale del primo ordine omogenea, la cui soluzione generale è

$$x(t) = x_0 \cdot e^{-\frac{k}{c}t}$$

Ove il rapporto  $\frac{c}{k} = \lambda$  prende il nome di costante di tempo dello strumento del primo ordine.

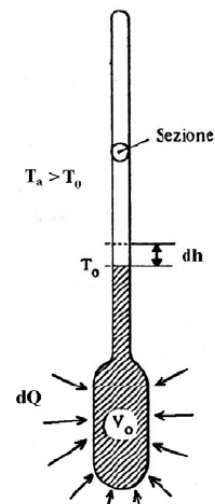
La predetta soluzione presenta quindi il seguente grafico rispetto ad un sistema di assi cartesiani ortogonali, aventi in ascisse i tempi ed in ordinate gli spostamenti.



In tale grafico è evidente che  $x_0$  rappresenta lo spostamento all'istante  $t=0$  (condizioni iniziali) e che la costante di tempo  $\frac{c}{K}$  presenta un significato geometrico ben preciso.

Il classico studio di uno strumento del primo ordine può farsi risalire alla dinamica di un termometro a liquido, quale quello rappresentato in figura.

Se si vuole conoscere la dinamica con la quale un termometro a liquido risponde ad una grandezza in ingresso costituito da un gradino di temperatura, si può ritenere che in ogni intervallo di tempo  $dt$ , che precede il raggiungimento dell'equilibrio termico, il fluido contenuto nel bulbo riceve una quantità di calore  $dQ$  dall'ambiente a temperatura  $T_a$  maggiore della temperatura  $T_0$  alla quale si trova il fluido.



In virtù di tale trasferimento di energia la temperatura  $T$  del fluido termometrico aumenta e valgono le seguenti espressioni

Calore ceduto dall'ambiente

$$dQ = kA(T_a - T)dt$$

Calore acquistato dal fluido

$$dQ = mc \cdot dT$$

dove

- $m$  è la massa del fluido
- $c$  è il calore specifico
- $k$  è il coefficiente di scambio termico
- $A$  è la superficie di scambio termico.

$$mc \cdot dT = kA(T_a - T)dt$$

$$mc \cdot \frac{dT}{dt} = kAT_a - kAT$$

$$\frac{mc}{kA} \cdot \frac{dT}{dt} + T = T_a$$

che è l'equazione differenziale rappresentativa della dinamica con cui il termometro a liquido risponde al gradino di temperatura in ingresso.

In analogia a quanto osservato per lo strumento meccanico di prima  $\lambda = \frac{mc}{kA}$  è la costante di tempo.

Sempre in riferimento allo strumento del primo ordine e nello schema precedentemente studiato, si può ipotizzare che all'indicatore  $S$ , all'istante  $t=0$ , venga applicata in modo istantaneo una forza costante  $F_0$  in tal caso l'equazione differenziale che descrive il moto di  $S$  diventa

$$c \dot{x} + kx = F_0$$

Tale equazione è sempre del primo ordine ma non è omogenea e pertanto la soluzione ha la forma

$$x(t) = x' + x''$$

ove

$x'$  è l'integrale generale della omogenea associata

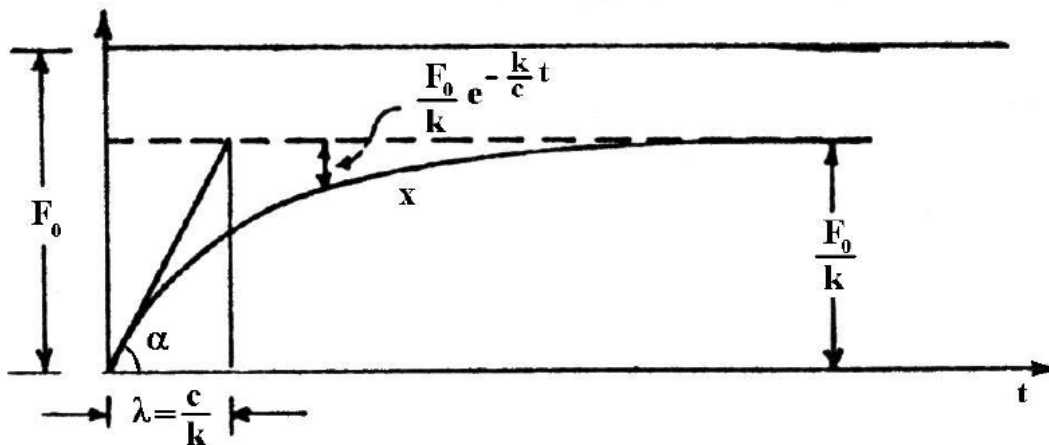
$x''$  è l'integrale particolare

La soluzione completa, somma dei due integrali è pertanto



$$x(t) = \frac{F_0}{K} \left( 1 - e^{-\frac{kt}{c}} \right)$$

Tale funzione è rappresentata in figura e cioè in un sistema di assi cartesiani ortogonali avente i tempi posti sulle ascisse e le forze sulle ordinate.



Lo Studente svolgerà un utile esercizio esaminando il significato geometrico della costante di tempo  $\lambda$ , nonché il valore della funzione allorquando  $t=\lambda$ .

Come detto, allorquando si vuole studiare la rapidità dello strumento nelle condizioni di regime, è conveniente fruire della risposta in frequenza.

Tale studio comporta che l'equipaggio mobile dello strumento stesso sia interessato da un segnale periodico qualsiasi, quale ad esempio un segnale puramente sinusoidale con frequenza variabile.

L'equazione differenziale che descrive il moto dell'indicatore dello strumento sarà del tipo

$$c \dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t$$

La soluzione di tale equazione è sempre del tipo  $x(t) = x' + x''$  ove  $x'$  e  $x''$  sono rispettivamente l'integrale generale e l'integrazione particolare.

Allorquando viene utilizzato un ingresso sinusoidale elementare e allorquando la frequenza  $\omega$  non è troppo elevata, lo strumento riesce in moltissimi casi ad indicare un uscita sinusoidale, della stessa frequenza del segnale di ingresso, ma con uno sfasamento  $\phi$  in ritardo.

## CAPITOLO 18

### MISURE DI LIVELLO

#### **18.1 Generalità**

Nel settore industriale è estremamente diffusa la necessità di misurare il livello di fluidi, fanghi, solidi granulari, ecc., racchiusi all'interno di serbatoi, silo o vasche.

La conoscenza del livello è anche necessaria sia per i cicli di produzione, sia per motivi di sicurezza e sia per motivi di natura economiche e fiscali.

Il sistema di misura che deve essere adoperato va opportunamente scelto in relazione alla natura dei fluidi e dei solidi granulari ed è quasi sempre costituito da un trasduttore e da un trasmettitore di segnale.

Di norma i Costruttori forniscono tabelle nelle quali consigliano la scelta del tipo di sistema di misura e di trasduttore da utilizzare in funzione delle condizioni di stoccaggio e del materiale contenuto negli involucri.

Nella seguente tabella, fornita da OMEGA Eng. Inc., sono riportate le diverse tipologie dei sistemi di misura in funzione sia della temperatura massima di esercizio, sia dell'accuratezza e sia della natura dei fluidi e dei solidi contenuti nei serbatoi.

Tipologia	$T_{\max}$ (°C)	SC	Accuratezza <sup>1</sup>	PU	Liquidi			Solidi		
					V	M	PL	S	PO	G CO
Gorgogliamento	UL		1-2 %FS	G	F	P	F			
Capacitivo	1090		1-2 %FS	G	F-G	F	G-L	P	F	F P
Interruttore a conduzione	980		1/8 in	F	P	F	L	L	L	L L
Diaframma	180		0,5 %FS	G	F	F			F	F P
Pressione differenziale	650		0,1 %RC	E	G-E	G	P			
Galleggiante dinamometrico	450		0,5 %FS	E	P	P	F-G			
Galleggiante semplice	260		1 % FS	G	P	P	F			
Laser	UL	X	0,5 in	L	G	G		F	F	F F
Traguardo	370		0,25 in	G	F	P	F			
Interruttore a microonde	200	X	0,5 in	G	G	F	G		G	G F
Interruttore ottico	125	X	0,25 in	G	F	E	F-G	F	F	P F
Radar	230	X	0,12 in	G	G	F	P		P	F P
Radiazione nucleare	UL	X	0,25 in	G	E	E	G	F	G	E E
Nastro resistivo	110		0,5 in	G	G	G				
Interruttore a pala rotante	260		1 in						G	F P
Tubo a immersione	90		0,5 in	F	P	P				
Nastro	150		0,1 in	E	F	P	G		G	F F
Termico	450		0,5 in	G	F	F	P	F		
RDT/SDF	105		3 in	F	F	F			G	G F
Ultrasuoni	300	X	1 %FS	F-G	G	G	F-G	F	F	F G
Interruttore a vibrazioni	150		0,2 in	F	G	G	F		F	G G

PU: Puliti, V: Viscosi, M: Melmosi, PL: Plurifase, S: Schiumosi, PO: Polverosi, G: Granaglie, CO: Collosi, RDT: Riflettometria nel dominio del tempo, SDF: Sensore a differenza di fase, FS: % Fondo Scala, RC: % del Rilevamento Corrente, UL: Non Limitato, SC: Senza Contatto, E: Eccellente, G: Buono, F: Sufficiente, L: Limitato, P: Scarso.

Nei serbatoi cilindrici verticali la relazione che intercorre tra il livello  $H$  ed il volume  $V$  del fluido è di tipo lineare ed è rappresentata dalla seguente formula:

$$V = S \cdot H$$

Ove:

$S$  = Superficie di base del serbatoio

Per serbatoi cilindrici orizzontali, per serbatoi sferici o di particolare forma la dipendenza del volume dal livello è di tipo generico e si può esprimere mediante la relazione  $V = f(H)$

I Costruttori forniscono spesso i valori di tale relazione funzionale.

I principali misuratori di livello fanno riferimento a metodi meccanici, sistemi di misura elettrici o a dispositivi definiti a “tempo di volo”.

Esistono infine dispositivi di misura speciali che vengono utilizzati anche per casi particolari.

## **18.2 Metodi meccanici**

I metodi meccanici concernono essenzialmente i dispositivi a traguardo, i dispositivi a spinta idrostatica, i dispositivi a gorgogliamento e i dispositivi a pressione differenziale.

### **18.2.1 Dispositivi a traguardo**

Uno dei metodi più semplici per misurare il livello di un fluido presente in un serbatoio è quello di utilizzare lungo tutta l'altezza del recipiente una finestra trasparente corredata di regolo graduato, oppure un tubo trasparente calibrato e graduato.

La misura viene effettuata con metodo ottico e non è agevole trasformare il livello osservato in un segnale utilizzabile. Ciò comporta che tale sistema non è molto idoneo per le applicazioni di tipo industriale.

Inoltre in presenza di schiume e di addensamenti sulla parete interna della finestra la misura viene snaturata o addirittura impedita.

### **18.2.2 Dispositivi a spinta idrostatica**

Tale dispositivo prevede l'utilizzo di galleggianti che funzionano sul principio della spinta di Archimede fornita dalla seguente relazione:

$$F = \rho \cdot g \cdot V .$$

ove

$F$  è la forza di Archimede

$\rho$  è la massa volumica del fluido

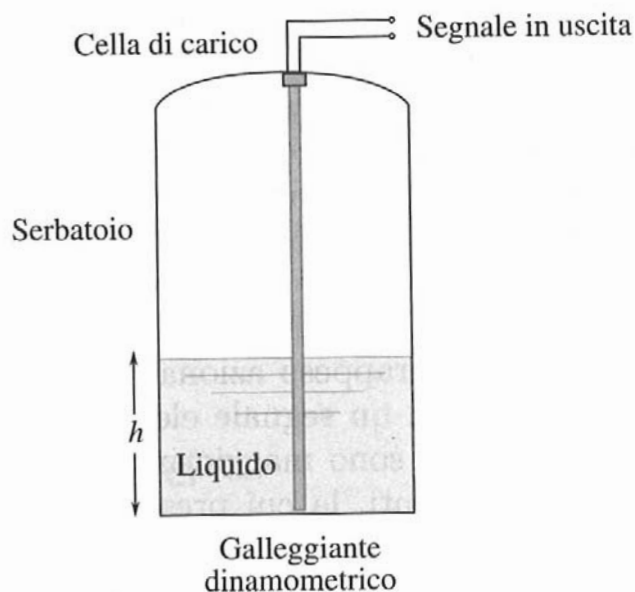
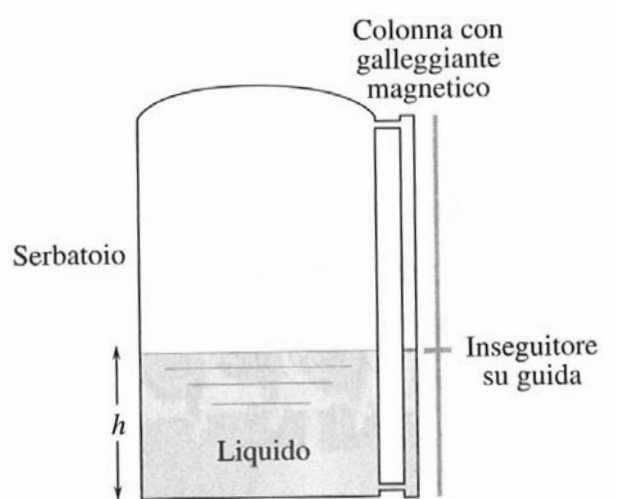
$V$  è il volume della parte immersa del galleggiante

La posizione del galleggiante, ovvero il livello del liquido, una volta veniva letta all'esterno mediante l'uso di cavi con pulegge di rimando e contrappeso. Quest'ultimo azionava un potenziometro esterno che generava un segnale elettrico proporzionale al livello indicato dal galleggiante.

Oggi, invece si utilizzano molto i galleggianti equipaggiati da magneti permanenti, la cui presenza viene individuata all'esterno mediante rivelatori di intensità del campo magnetico.

Spesso i galleggianti magnetici sono inseriti all'interno di tubi di materiale amagnetico posto in parallelo al serbatoio.

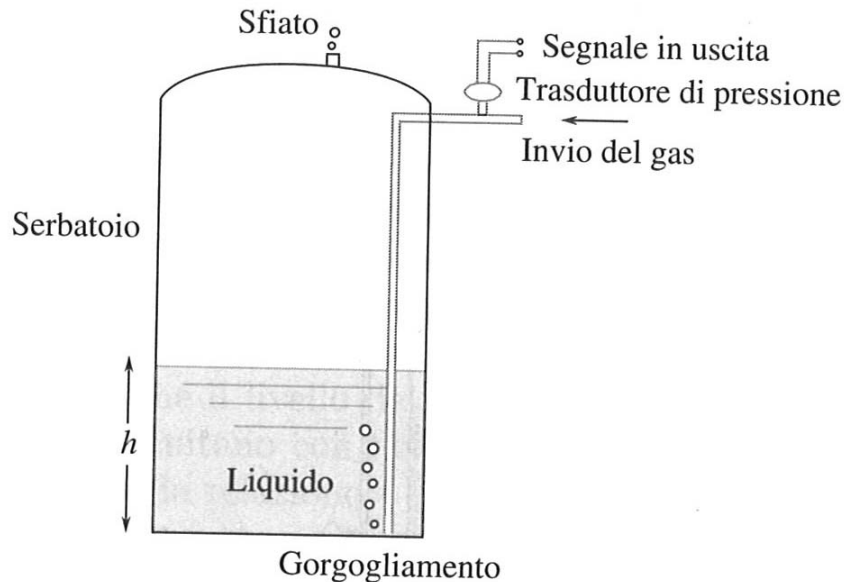
Altro metodo è quello di utilizzare una cella di carico posta in cima al serbatoio in grado di misurare la forza  $F$  dovuta alla spinta di Archimede.



Tale forza è direttamente proporzionale alla quota di volume immerso di galleggiante, che corrisponde al livello  $h$  raggiunto dal liquido

### 18.2.3 Dispositivi a gorgogliamento

Tale dispositivo è rappresentato in figura ed è usato frequentemente per la misura di livello di serbatoi che operino a pressione atmosferica.



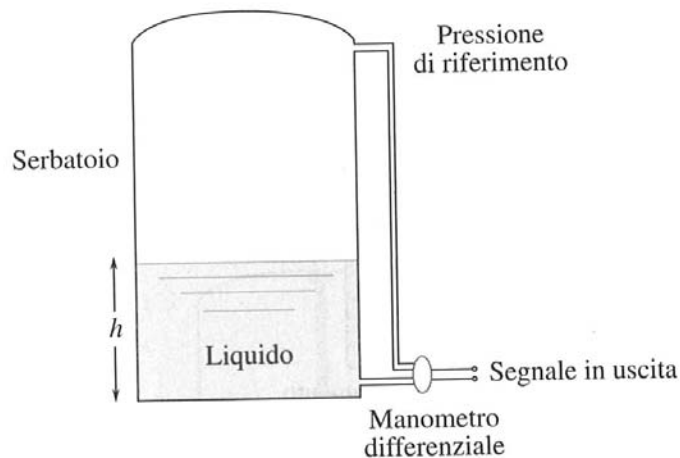
Il sistema è composto da un piccolo tubo cavo inserito nel serbatoio stesso, la cui estremità aperta viene ubicata in corrispondenza del fondo. All'interno del tubicino viene insufflato del gas fino a quando esso gorgoglia dall'estremità aperta.

Allorquando ciò accade, la pressione misurata dal trasduttore è di poco superiore a quella idrostatica della colonna di liquida contenuta nel serbatoio.

Di norma si impiega quale gas di gorgogliamento l'aria; in taluni casi e cioè quando vi siano rischi di ossidazione del liquido, viene utilizzato gas inerte costituito da azoto.

### 18.2.4 Dispositivi a pressione differenziale.

Tale dispositivo è versatile ed estremamente semplice e viene per lo più utilizzato in serbatoi che si trovino a pressione diversa da quella atmosferica.



Nella figura soprastante è schematizzato il principio di funzionamento, caratterizzato dalla seguente Legge

$$p - p' = \rho \cdot g \cdot h$$

Ove

- $p$  è la pressione misurata dal trasduttore in corrispondenza del fondo del serbatoio;
- $p'$  è la pressione di riferimento misurata mediante una presa collegata con la zona del vapore sovrastante il liquido.

Il manometro differenziale in grado di misurare la differenza di pressione è collegato ad un trasduttore in grado di emettere un segnale elettrico continuo facilmente utilizzabile anche per i controlli. Tale dispositivo è però caratterizzato da una importante limitazione: sia la massa volumica, sia la pressione di vapore sono fortemente influenzati dalla temperatura, per cui, al fine di evitare errori grossolani occorre compensare gli effetti di tale grandezza.



### **18.3 Sistema di misura elettrici**

I misuratori di livello di natura elettrica si fondano essenzialmente sulla misura delle variazioni di resistenza o di reattanza dei rispettivi sensori

#### **18.3.1 Dispositivi resistivi**

Nei trasduttori resistivi, la variazione della resistenza elettrica dei sensori viene correlata alla profondità di immersione del liquido. In presenza di fluidi conduttivi, può essere utilizzata una coppia di elettrodi, di cui uno posto sul fondo e l'altro costituito da una serie di  $n$  elementi tra loro separati, posti lungo la parete del serbatoio in modo da formare con il fluido una rete di resistenza in parallelo.

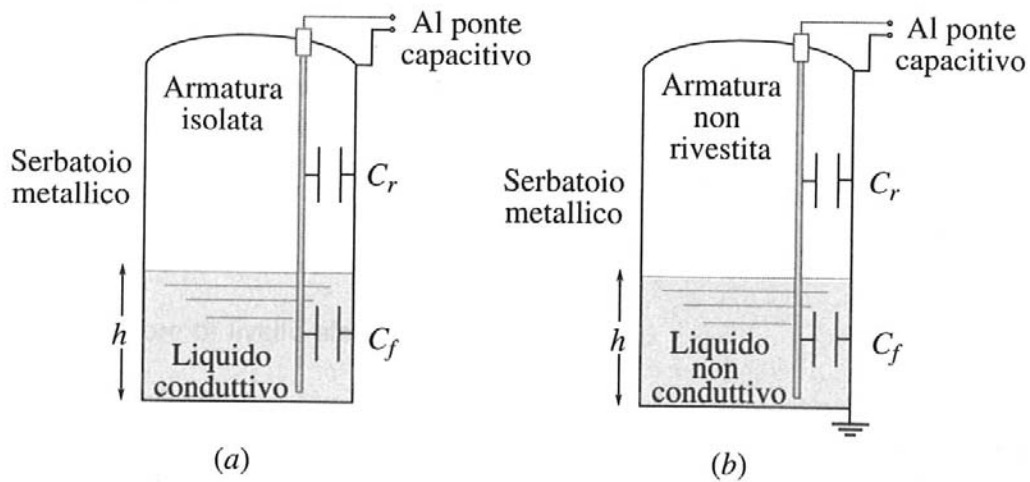
Man mano che il livello del fluido sale, le resistenze degli elettrodi sulla parete si cortocircuitano con l'elettrodo sul fondo e la resistenza totale  $R$  diminuisce secondo la relazione

$$R = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)^{-1}$$

Ove  $R$  è la resistenza totale, la cui variazione può essere misurata mediante un ponte di Wheatstone.

#### **18.3.2 Dispositivi capacitivi**

Attraverso una variazione di capacità può essere misurato il livello del fluido secondo le figure sotto riportate.



I trasduttori capacitivi utilizzano la proprietà dei fluidi di avere una costante dielettrica relativa  $\epsilon$  notevolmente diversa da quella dell'aria.

Le armature del condensatore sono costituite da un'asticella di acciaio inox, inserita all'interno del serbatoio e dalla parete di quest'ultimo.

Quando il serbatoio è vuoto ai capi delle armature si misura la capacità  $C$  fornita dalla seguente formula:

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

Ove

$S$  è la superficie nominale delle armature

$d$  è la distanza nominale tra le stesse

$\epsilon_r$  è la costante dielettrica relativa dell'aria o dei vapori del fluido.

Man mano che nel serbatoio il livello del liquido sale le armature si ritrovano sempre più immerse nel mezzo fluido che ha una costante dielettrica relativa  $\epsilon$  maggiore di  $\epsilon_r$

La costante dielettrica assoluta aumenta quindi con continuità ed in modo direttamente proporzionale a livello  $h$  fino a livello massima  $H$ .

In pratica è come se vi fossero due condensatori in parallelo per i quali le superfici delle armature variano con  $h$  ed in modo inversamente proporzionale tra di

loro; il condensatore con le superfici delle armature che aumentano ha come dielettrico il liquido e l'altro l'aria.

La capacità totale del trasduttore risulterà quindi somma delle due capacità

$$C = C_f + C_r = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \cdot \frac{h}{H} + \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \cdot \left(1 - \frac{h}{H}\right)$$

Al fine di migliorare la qualità delle misura, talvolta si procede a misurare contemporaneamente sia la variazione della resistenza R dei sensori sia la variazione della loro capacità C.

In tal modo si procede a misurare il livello mediante la misura della variazione dell'impedenza  $Z = R + 1$

$$Z = R + 1 \frac{1}{j2\pi f C}$$

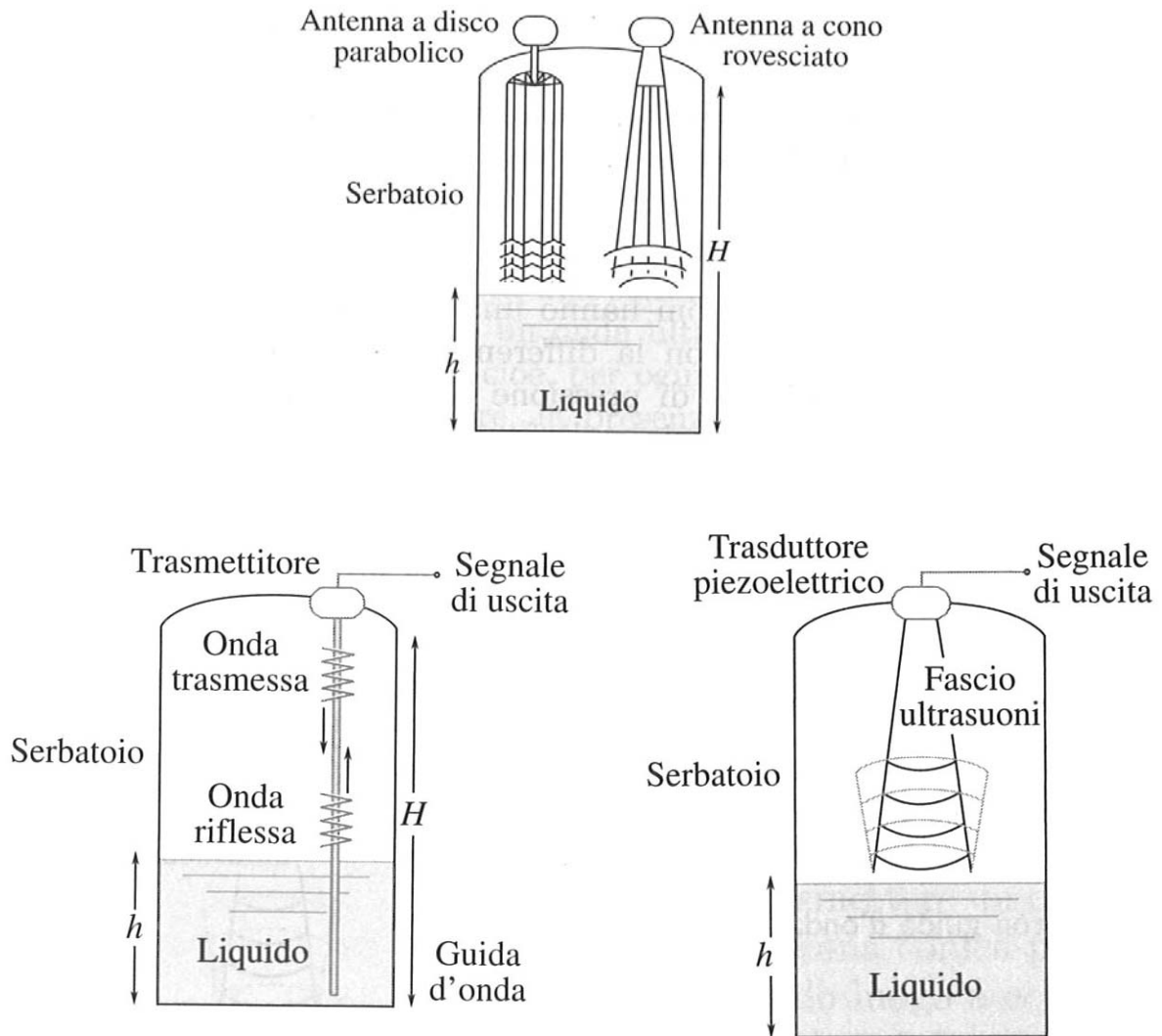
Ove

f è la frequenza del segnale elettrico che alimenta il circuito.

#### **18.4 Dispositivi a tempo di volo**

Con tali dispositivi la misura del livello avviene attraverso la misura del tempo di volo di un'onda opportuna.

Nelle figure seguenti sono rispettivamente raffigurati indicatori di livello elettromagnetico (radar), indicatori di livello radar con guida d'onda ed indicatori di livello ad ultrasuoni.



In corrispondenza della copertura è installato un emettitore che invia verso la superficie del liquido un impulso e avvia il conteggio di un cronometro elettronico.

Le onde quando incontrano la superficie liquida vengono riflesse e tornano verso l'alto dove un ricevitore posizionato vicino all'emettitore ne rileva l'arrivo e arresta il conteggio del cronometro.

Se  $H$  è l'altezza del serbatoio,  $C$  è la velocità dell'onda nel mezzo si può scrivere

$$2(H - h) = C \cdot t$$

Da cui

$$h = H - \frac{1}{2} C \cdot t$$

## CAPITOLO 19

### MISURE DI VISCOSITA'

#### 19.1 Generalità

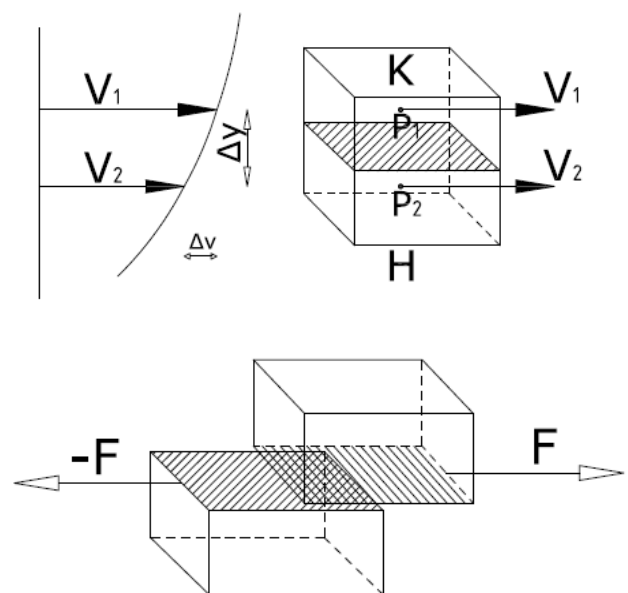
Allorquando i fluidi reali sono in movimento, si manifesta un'importante proprietà: la viscosità.

Essa rappresenta l'attrito interno che si palesa tra strati fluidi in movimento relativo tra loro ed è dovuta al moto di agitazione molecolare, che provoca un fenomeno diffuso, mediante il quale le molecole di due strati fluidi contigui interferiscono tra loro, passando nei due sensi dall'uno all'altro strato.

Orbene se i due strati contigui hanno differenti velocità si viene a stabilire uno scambio di quantità di moto fra le molecole che passano da uno strato all'altro, in guisa che le molecole relative allo strato più lento, passando a quello più veloce, assorbono una certa quantità di moto ed esercitano su quest'ultimo un'azione di rallentamento, mentre le molecole che passano dallo strato più veloce a quello più lento finiscono per cedere energia a quest'ultimo, tenendo ad accelerarlo.

L'ostacolo quindi che si frappone allo scorrimento relativo fra due strati sarà sicuramente costituito da una forza tangenziale.

Pertanto, considerando due volumetti elementari  $K$  e  $H$  nell'interno dei punti  $P_1$  e  $P_2$  e supponendo che allo strato superiore competa una velocità  $V_1$  maggiore della velocità  $V_2$  relativa allo strato inferiore, si stabilisce un fenomeno diffusivo di molecole da  $H$  a  $K$  e da  $K$  a  $H$  avente per risultato una forza tangenziale  $-F$ , uguale ed opposta alla



precedente, con cui lo strato inferiore tende a rallentare quello superiore.

Dicendo  $A$  la superficie di contatto tra i volumetti

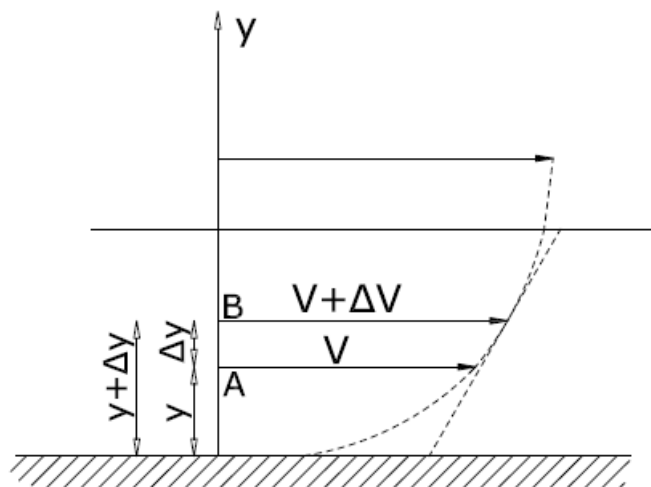
$$\tau \left( \frac{F}{A} \right)$$

Per determinare tale sforzo consideriamo un fluido dotato di moto orizzontale, in modo che ogni strato abbia velocità con intensità diversa rispetto agli strati contigui, ma con la stessa direzione e lo stesso verso.

In figura è rappresentata è rappresentata una parete su cui scorre un fluido.

Diciamo  $y$  un'asse ortogonale alla velocità del fluido e  $V$  la velocità che compete allo strato  $A$ .

Lo strato  $B$ , a distanza  $\Delta y$  dallo strato  $A$ , ha velocità  $V + \Delta V$  ed ha in comune con lo strato  $A$  una superficie  $S$ .



La forza tangenziale che si manifesta fra i due strati è fornita da

$$F = \mu S \frac{\Delta V}{\Delta y}$$

e quindi lo sforzo tangenziale sarà

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{\Delta V}{\Delta y}$$

Tale relazione, detta Legge di Newton, caratterizza molti fluidi che si dicono appunto Newtoniani.

Il coefficiente di viscosità  $\mu$  è una grandezza caratteristica di stato di un fluido ed è rappresentativo della massa di molecole che diffonde da uno strato all'altro.

Il suo valore è influenzato dalla temperatura e precisamente, per i gas, esso aumenta all'aumentare della temperatura.

Ciò è facilmente spiegabile se si considera che un aumento di temperatura induce nei gas un aumento dell'agitazione molecolare e conseguentemente un maggiore scambio diffusivo di molecole tra strati contigui.

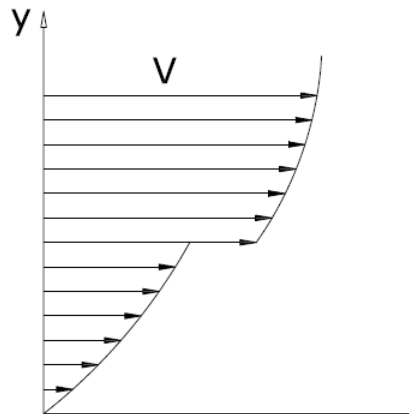
Nei liquidi invece il coefficiente di viscosità da una parte tende ad aumentare con la temperatura a causa dell'aumento di agitazione molecolare, e dall'altra tende a diminuire in quanto aumenti di temperatura riducono le forze di coesione molecolare.

Tra questi meccanismi di norma prevale il secondo, per cui quasi tutti i liquidi sono caratterizzati da un coefficiente di viscosità che diminuisce al crescere della temperatura.

Il rapporto  $\frac{\Delta V}{\Delta y}$  rappresenta il gradiente di velocità e fornisce la variazione di velocità che si ha passando da strato a strato nella direzione  $y$ .

L'esame della Legge di Newton ci consente di fare alcune importanti considerazioni:

1. se non c'è moto relativo tra strati fluidi adiacenti (cioè  $\Delta V = 0$ ), gli sforzi tangenziali sono nulli.
2. I profili di velocità non possono ammettere discontinuità, in quanto questa indurrebbe sforzi tangenziali infiniti e quindi fisicamente impossibili. A questo proposito si ricordi la discontinuità nel profilo di velocità significa, in termini matematici, considerare variazioni finite di velocità  $\Delta V$  per valori di  $\Delta y \rightarrow 0$ .



3. Gli sforzi tangenziali, pur essendo influenzati dal coefficiente di viscosità, dipendono in maniera rilevante dai gradienti di velocità, per cui in un fluido come l'aria, seppure caratterizzato da modesti valori di  $\mu$ , è possibile misurare apprezzabili sforzi tangenziali nelle regioni (immediate vicinanze alle pareti dei corpi), nelle quali risultano elevati i gradienti di velocità.

Se consideriamo un fluido che investe una superficie alare, esso avrà, nel moto relativo, uno strato sottilissimo che resta attaccato alla parete dell'ala, frenando nel contempo, a causa delle forze tangenziali che nascono dalla viscosità, gli strati fluidi adiacenti.

Pertanto in prossimità della parete si stabilisce un gradiente di velocità che sarà certamente massimo sulla superficie dell'ala e va diminuendo man mano che ci si allontana da essa in direzione normale.

Teoricamente l'azione frenante esercitata dal profilo alare dovrebbe risentirsi sino a distanza infinita, ma, in pratica, già ad una certa distanza  $\delta$  dalla parete il valore del gradiente di velocità si è talmente ridotto da potersi ritenere nullo.

Potremo quindi ritenere che la regione fluida intorno al profilo è suddivisa in due parti.

La prima, nelle immediate vicinanze del corpo, è caratterizzata da gradienti trasversali di velocità e quindi dalla presenza di sforzi tangenziali.

Tale zona, entro la quale si risentono gli effetti della viscosità del fluido, prende il nome di strato limite ed ha uno spessore assai piccolo, dell'ordine del millimetro.

Nella seconda zona, di gran lunga più ampia, non sono invece apprezzabili gli effetti della viscosità.

Spesso può essere necessario determinare, in maniera aprioristica, se gli effetti della viscosità siano o meno trascurabili in una regione di fluido.

Ciò viene reso possibile considerando un particolare rapporto, detto numero di Reynolds, che è così definito:

$$\text{Re } y = \rho \frac{Vl}{\mu}$$

Ove:

$\rho$  è la densità

$\mu$  è il coefficiente di viscosità

$V$  è la velocità

$l$  è una "lunghezza caratteristica" del moto in esame.

Tale rapporto è suscettibile di un'importante interpretazione fisica. Esso infatti rappresenta il rapporto tra le forze d'inerzia ( $ma$ ) e le forze viscosi ( $\tau S$ ) e



pertanto fornisce una misura dell'importanza relativa delle prime rispetto alle seconde.

Infatti si ha con l'analisi dimensionale:

$$\frac{(ma)}{(zS)} = \frac{(ma)}{\left(\mu \frac{V}{y} S\right)} = \frac{(M)(LT^{-2})}{\left(\mu \frac{LT}{L} L^2\right)} = \frac{(MLT^{-2})}{(m)(L^2T^{-1})(L)} = \frac{M}{L^3} \frac{(LI)(L)}{\mu} = \left(\rho \frac{VI}{\mu}\right)$$

Orbene, allorquando il numero di Reynolds è un numero molto piccolo significa che le forze viscosive sono rilevanti rispetto a quelle d'inerzia, mentre per numeri di Reynolds grandi le forze viscosive sono trascurabili rispetto a quelle d'inerzia ed il fluido può essere trattato “come se fosse” un fluido non viscoso.

## 19.2 Le categorie dei fluidi

Con riferimento alla Legge di Newton prima rappresentata, si può senz'altro affermare che i fluidi di tipo Newtoniano presentano una relazione lineare tra sforzo e scorrimento, indipendentemente dal gradiente di velocità.

I fluidi viscosi presentano anche categorie per le quali non risulta valida la legge di Newton. Pertanto tali tipi di fluidi vengono definiti non Newtoniani; per essi la relazione che lega lo sforzo di taglio ed il gradiente di velocità non è più lineare e, pertanto, il valore della viscosità non è più costante, ma varia per ciascun tipo di fluido in funzione del gradiente di velocità.

## 19.3 Viscosimetri

I viscosimetri sono strumenti utilizzati per la misura della viscosità e si fondano su un principio generale, secondo il quale il fluido oggetto di indagine è sottoposto ad un moto all'interno di dispositivi di geometria nota, valutando gli effetti prodotti dalle forze viscosive.

La misura della viscosità può essere effettuata in modo relativo ed in modo assoluto. Nel primo caso si pone a confronto il liquido in esame con un liquido di riferimento di caratteristiche conosciute.

I viscosimetri assoluti invece forniscono risultati indipendenti dallo strumento utilizzato, in quanto viene definito un modello di comportamento per il fluido e per il moto cui esso è sottoposto e presuppongono la conoscenza dello sforzo di taglio e del relativo gradiente di velocità.

Poiché la viscosità è influenzata dalla temperatura, occorre che i viscosimetri siano dotati anche di sistemi atti al rilievo di questa grandezza in modo da garantire la ripetibilità della misura.

## **19.4 Tecniche di misura**

Tali tecniche tese a rilevare le caratteristiche reologiche dei fluidi si suddividono in:

- Tecniche capillari;
- Tecniche a sfera cadente;
- Tecniche rotazionali.

Nella prima categoria sono presenti i viscosimetri in grado di misurare il valore della viscosità sulla base di una misura di flusso o di una pressione differenziale.

Le tecniche a sfera cadente determinano la viscosità a partire dalla misura del tempo impiegato da un corpo di densità nota a rotolare o a cadere nel fluido oggetto di indagine.

Le tecniche rotazionali sono caratterizzate dalla determinazione della viscosità a partire da una misura di una coppia e di una velocità di un rotore.

### **19.4.1 Viscosimetri a capillari**

Nel viscosimetro capillare un campione di fluido viene convogliato attraverso un capillare di lunghezza  $L$  e diametro  $2R$  e vengono inseriti a monte e a valle del

capillare stesso due sensori di pressione in grado di misurare la differenza di pressione  $\Delta P$  fra i due capi dello stesso.

Essendo conosciuta la portata  $Q$ , la viscosità  $\mu$  viene determinata mediante la Legge di Poiseuille. Pertanto

$$\mu = \frac{\pi R^4}{8L} \frac{\Delta P}{Q}$$

La portata di fluido  $Q$  è controllata da una pompa, che di norma viene installata a valle del capillare al fine di evitare turbolenze.

### 19.4.2 Viscosimetri a capillare a carico idrostatico

Tale viscosimetro è costituito da un piccolo serbatoio contenente il fluido di cui si intendono misurare le proprietà reologiche, che defluisce all'interno di un capillare di diametro  $2R$  e lunghezza  $L$ .

Il fluido che defluisce nel capillare viene raccolto alla base dello stesso in un recipiente tarato che consente la misura del volume di fluido elaborato, mentre il serbatoio di testa è alimentato in modo da mantenere costante il carico idrostatico misurato rispetto alla sezione iniziale del capillare.

La differenza di pressione tra ingresso e uscita di quest'ultimo consente al fluido di defluire; misurando il tempo di efflusso ed il volume di liquido si risale al valore della viscosità, utilizzando le stesse formule del caso precedente.

I dispositivi vengono anche classificati in relazione alla tipologia di capillare. Si parla di capillare lungo o corto in funzione del rapporto tra la lunghezza  $L$  ed il diametro  $D$  del capillare.

Il viscosimetro a capillare lungo viene utilizzato per misurare la viscosità assoluta mentre quello a capillare corto viene adoperato per la misura della viscosità relativa, in quanto viene operato il confronto tra il valore della viscosità ottenuto dalla misura con quella di un fluido noto.

I viscosimetri a capillare corto (rapporto  $L/D$  compreso variabile tra 1 e 10) comprendono anche i cosiddetti viscosimetri a tazza, che consentono di determinare

il valore della viscosità a partire dalla misura del tempo impiegato dal campione di volume noto a defluire attraverso un orifizio praticato nel contenitore.

### 19.4.3 Viscosimetri a sfera

Tali strumenti consentono di ottenere il valore della viscosità, misurando il tempo impiegato da un corpo sferico o cilindrico, per attraversare il campione di fluido, percorrendo una distanza determinata sotto l'azione della propria forza peso.

I viscosimetri a sfera cadente sono soprattutto adatti per la misura di viscosità assoluta di fluidi Newtoniani trasparenti, sia gas che liquidi.

Il campione di fluido è depositato entro un tubo di vetro, chiuso all'estremità con tappi a vite e circondato da una camicia per la circolazione del liquido termostatico, montato su un telaio con una inclinazione prefissata rispetto all'orizzontale.

Sul tubo sono anche riportati due riferimenti ad una distanza prefissata. Si riempie il condotto con il fluido da esaminare e la sferetta, di densità e raggio noti, viene lasciata cadere all'interno del tubo.

Viene misurato l'intervallo di tempo  $\Delta t$  che la sfera impiega per percorrere il tratto compreso tra i due riferimenti.

Dalla misura dell'intervallo di tempo si risale al valore della viscosità tramite la relazione

$$\mu = k(\rho_f - \rho_s)\Delta t$$

ove:

$\mu$  è la viscosità;

$k$  è una costante strumentale che dipende dal diametro della sfera, dalla geometria del tubo, dal valore dell'accelerazione di gravità;

$\rho_f$  è la densità del fluido

$\rho_s$  è la densità della sferetta

#### **19.4.4 Viscosimetri rotazionali**

Tali strumenti consentono di effettuare misure assolute e sono basati su un rilievo di una coppia resistente che si oppone alla rotazione di un corpo rigido a causa della viscosità del liquido.

In altri termini si pone in rotazione, mediante motori elettrici, dei rotori di geometria definita che vengono immersi nel campione di fluido contenuto in un recipiente, chiamato statore.

Durante il suo moto il rotore tende a trascinare il fluido a causa della viscosità ed anche lo statore, a sua volta, tenderà ad essere posto in rotazione nella direzione del rotore.

Mediante la misura della coppia che impedisce la rotazione dello statore si può risalire alla determinazione delle forze viscosse e da queste ultime all'entità della viscosità.

La coppia resistente viene per lo più rilevata mediante trasduttori che forniscono segnali facilmente elaborabili.

In particolare il corretto utilizzo del dispositivo richiede che tra i due cilindri il moto non diventi turbolento e pertanto occorre controllare i valori della velocità angolare.

Nota la geometria del sistema, attraverso la misura del momento torcente agente sul cilindro esterno e della velocità angolare del rotore interno, si ricavano le curve caratteristiche reologiche del fluido, determinando i diversi gradienti di velocità ed i corrispondenti sforzi tangenziali al variare della velocità angolare del rotore.

I viscosimetri rotazionali si differenziano tra loro per la geometria; in particolare le geometrie principali sono quelle a cilindrico coassiali concentrici, a piatti paralleli e a cono piatto.