

Corso di misure meccaniche, termiche e collaudi



Misure di portata

Prof. Rodolfo Taccani

Dipartimento di ingegneria ed architettura

1



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Dipartimento di
Ingegneria
e Architettura

Introduzione

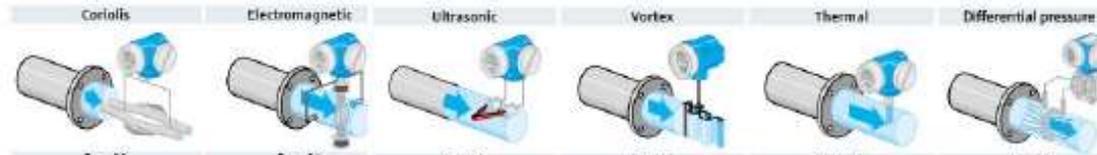
Misuratori di portata in volume:

- misuratori ad area costante e a caduta di pressione
- tubi di pitot per misure medie
- misuratori a caduta di pressione costante e ad area variabile (rotametri)
- misuratori a turbina
- misuratori ad elica (o ventola)
- misuratori elettromagnetici
- misuratori ultrasonici
- misuratori a distacco di vortici
- anemometro a filo caldo
- misuratori laser

Misuratori di portata in massa:

- misuratori “Coriolis”
- misuratori “termici”

Introduzione



	Coriolis Page 30	Electromagnetic Page 34	Ultrasonic Page 38 Inline Clamp on	Vortex Page 42	Thermal Page 46	Differential pressure Page 50
Liquid applications						
• Liquids in general (e.g. water)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓✓
• Very low flow rates (< 2 l/h)	✓✓	✓✓	✗	✗	✗	✗
• Very high flow rates (> 100 000 m ³ /h)	✗	✓✓	✓✓	✗	✗	✓✓
• Non-conductive liquids	✓✓	✗	✓✓	✓✓	✓	✓✓
• Viscous liquids (> 50 cP)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓✓
• Cryogenic fluids (e.g. liquified natural gas)	✓✓	✗	✗	✓✓	✗	✓✓
• Hygienic applications	✓✓	✓✓	✗	✗	✓	✗
Gas/steam applications						
• Gas flow in general (e.g. natural gas, air)	✓✓	✗	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
• Wet/dirty gases (e.g. biogas)	✓✓	✗	✓✓	✗	✓✓	✗
• Low flow rates (< 20 l/min)	✓✓	✗	✓✓	✗	✓✓	✓
• High flow rates	✓✓	✗	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
• Steam	✓	✗	✗	✓✓	✗	✓✓
Special applications						
• Slurries, suspended solids	✓	✓✓	✗	✗	✗	✓
• Liquid/liquid mixtures (e.g. oil/water)	✓✓	✓✓	✗	✓✓	✓	✓✓
• Liquid/gas mixtures (e.g. water/air)	✓	✓	✗	✓	✓	✓
• Corrosive liquids (e.g. acids, alkalis)	✓✓	✓✓	✗	✓	✓	✓✓
• Corrosive gas flows (e.g. HCl vapor)	✓✓	✗	✗	✓	✓	✓✓
• Applications in mining (e.g. ore slurry)	✗	✓✓	✗	✗	✗	✗
• Bidirectional metering (forward/reverse)	✓✓	✓✓	✓✓	✗	✗	✓✓
• Measurement from outside without process interruption	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Range of applications						
• Nominal diameters	DN 1 to 400	DN 2 to 3000	DN 15 to 4000	DN 15 to 300	DN 15 to 1500	DN 10 to 12 000
• Process pressure	max. 400 bar	max. 40 bar	Depending on sensor	max. 250 bar	max. 40 bar	max. 420 bar
• Process temperature	-196 to +350 °C	-40 to +180 °C	-40 to +200 °C	-200 to +450 °C	-40 to +130 °C	-200 to +1000 °C

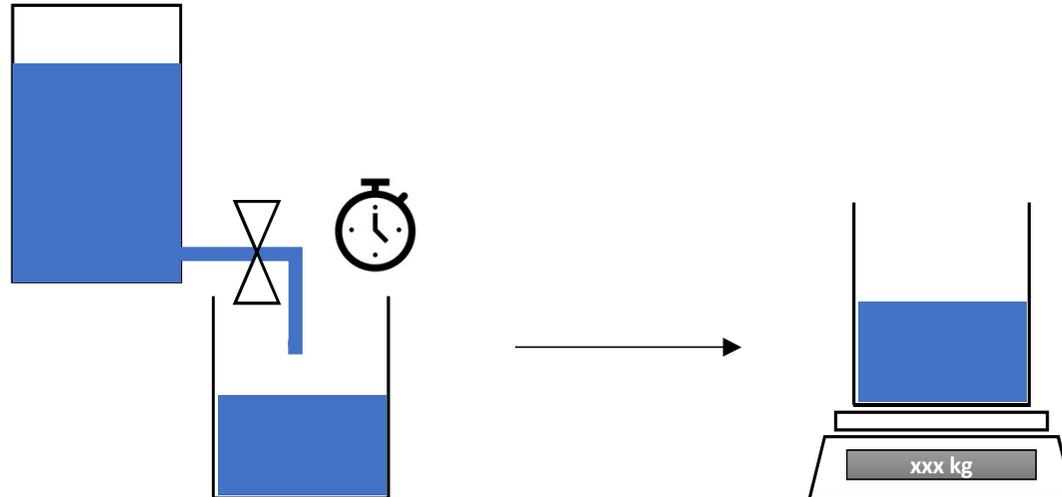
[Emerson]

Definizioni

La portata è una grandezza che misura la quantità di un fluido che attraversa una superficie nell'unità di tempo (differenziandosi così dal flusso che non è dipendente dal tempo). Il concetto di portata si lega alla legge di conservazione della massa:

$$\frac{M_{in}}{\Delta t} = \frac{M_{out}}{\Delta t} \leftrightarrow \dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \leftrightarrow \left(\frac{\rho V}{\Delta t}\right)_{in} = \left(\frac{\rho V}{\Delta t}\right)_{out}$$

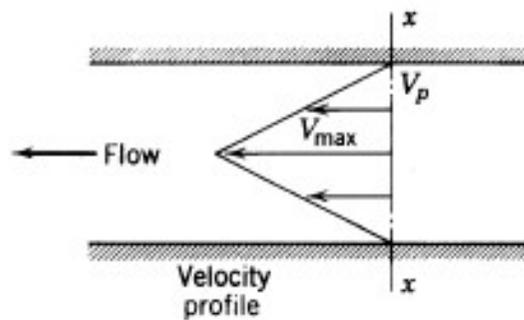
E dalla queste definizioni, si può illustrare il metodo più semplice ed efficace per la misura della portata:



Definizioni

Si osserva quindi come la portata sia legata alla velocità media del fluido:

$$\frac{\rho V}{\Delta t} = \int \frac{\Delta x dA}{\Delta t} = \int v_p dA \rightarrow \bar{v} = \frac{\int v_p dA}{A}$$



Pertanto:

$$\dot{m} = \rho A \bar{v} = \text{costante}$$

Definizioni

$$\frac{M_{in}}{\Delta t} = \frac{M_{out}}{\Delta t} \leftrightarrow \left(\frac{\rho V}{\Delta t}\right)_{in} = \left(\frac{\rho V}{\Delta t}\right)_{out}$$

Misure dirette:

- Portata volumetrica: $\dot{q} = A\bar{v} \left(\frac{m^3}{s}\right)$

esempio: con il contatore del gas a membrana misuro direttamente la variazione di volume nell'unità di tempo

- Portata massica: $\dot{m} = \rho A\bar{v} \left(\frac{kg}{s}\right)$

esempio: misurazione del variazione del peso di un serbatoio tramite cella di carico nell'unità di tempo.

Definizioni

Misure indirette:

- **Caduta di pressione:** dalla quale si ricava l'energia cinetica del fluido e conseguentemente la portata (es. venturimetro).

$$E_c = \frac{1}{2} \rho c^2$$

Fattori che rendono difficoltose le misure di portata:

- in un condotto la **velocità del fluido non è omogenea**;
- il **gradiente di velocità non è omogeneo**;
- la **distribuzione di velocità** nel condotto è condizionata dal **percorso** (curve, variazioni di diametro, ostacoli determinano turbolenze);
- **dipendenza dalla temperatura**;
- difficoltà (o impossibilità) di **taratura dei sensori**.

Ecco perché molto spesso è difficile chiudere i bilanci di massa negli impianti.

Il numero di Reynolds

Il numero di Reynolds (Re) è un gruppo adimensionale usato in fluidodinamica, dato dal rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosive.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad \text{oppure:} \quad Re = \frac{v L}{\nu}$$

dove:

v : velocità media del fluido

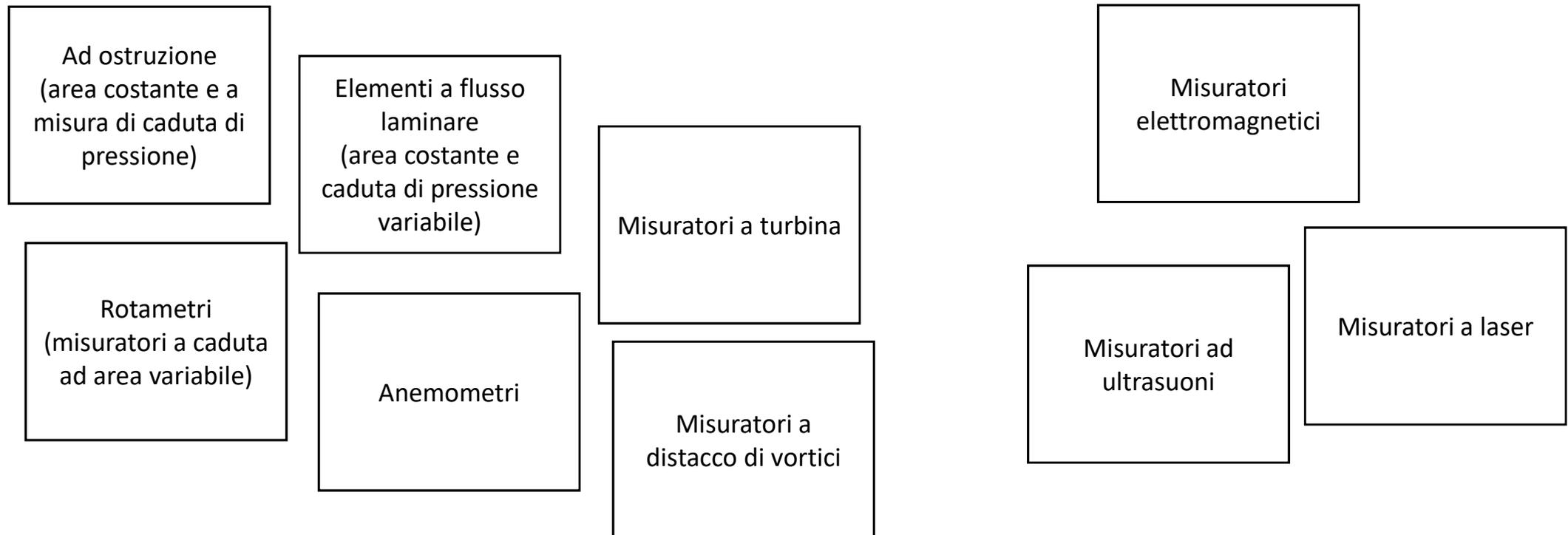
μ = viscosità dinamica,

ν = viscosità cinematica: $\nu = \eta / \rho$, ρ - densità del fluido,

L = lunghezza caratteristica (equivale al diametro $2r$ se la sezione del condotto è circolare; se la sezione non è circolare è il cosiddetto diametro equivalente $De = 4S/P$ dove S è l'area sezione e P il perimetro bagnato).

Esso può indicare se un fluido sia in regime laminare o turbolento. In un condotto un fluido viene considerato in regime laminare se il valore numerico di Re è inferiore a 2000, turbolento se superiore a 10000. Se $2000 < Re < 10000$ si è in regime di transizione.

Misuratori di portata volumetrica

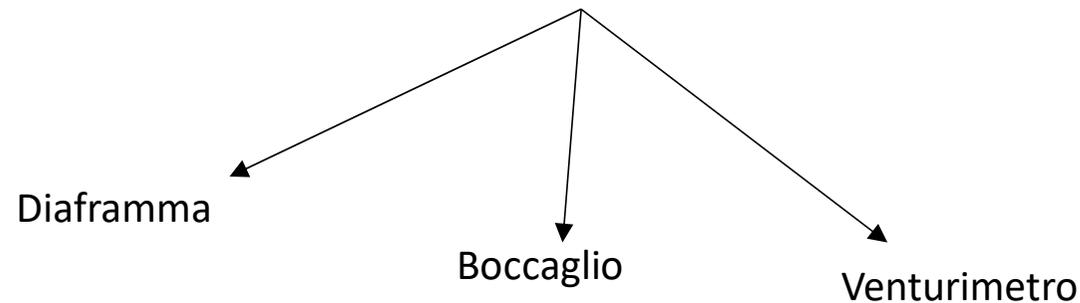


Misuratori ad ostruzione (area costante, caduta di pressione variabile)

Metodo di misura comunemente usato, si fa uso di una restrizione dell'area libera di efflusso nella condotta che trasporta il fluido.

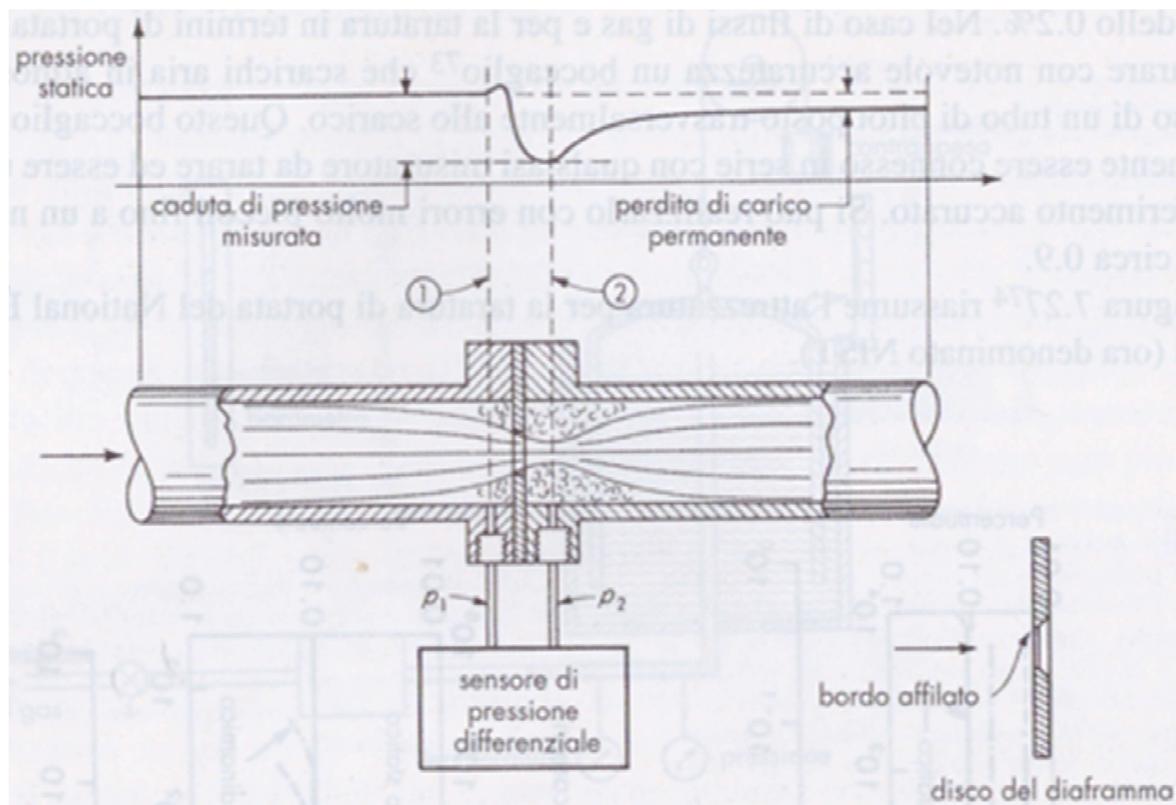
Questo restringimento del flusso causa una caduta di pressione che dipende dalla portata.

Rilevando la caduta di pressione, si risale quindi alla portata



Questo tipo di strumenti vengono solitamente inseriti in linea, in rami appositamente predisposti per la misura della portata.

Misuratore di portata a diaframma



Misuratore di portata a diaframma

Per fluidi incomprimibili, che si propagano lungo una sola direzione ed in assenza di attrito, scambi di calore o variazione di quota, dalla legge di conservazione della massa:

$$\dot{m} = \rho \bar{v}_1 A_{1,f} = \rho \bar{v}_2 A_{2,f} \rightarrow \bar{v}_1 = \bar{v}_2 \frac{A_{2,f}}{A_{1,f}}$$

Mentre, essendo per la legge di Bernoulli $p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = \text{costante}$:

$$p_1 + \rho \frac{\bar{v}_1^2}{2} + \rho gh_1 = p_2 + \rho \frac{\bar{v}_2^2}{2} + \rho gh_2$$

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2) + \rho g \Delta h \Big|_{\Delta h=0} = \frac{\rho}{2} \bar{v}_2^2 \left(1 - \left(\frac{A_{2,f}}{A_{1,f}} \right)^2 \right)$$

$$Q = \bar{v}_2 A_{2,f} = \frac{A_{2,f}}{\sqrt{1 - (A_{2,f}/A_{1,f})^2}} \sqrt{2 \frac{(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Misuratore di portata a diaframma – fluidi incompressibili

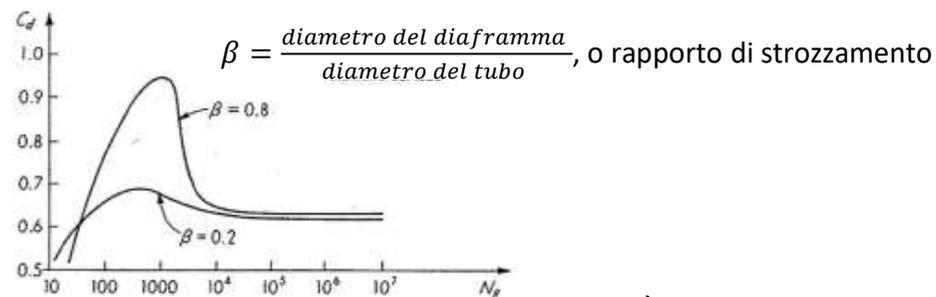
Le aree A_{1f} e A_{2f} sono le aree della sezione trasversale del flusso e non l'area della sezione del tubo o del diaframma.

Per una valutazione corretta della portata abbiamo bisogno di coefficienti correttivi (variano al variare della portata).

Si definisce un coefficiente di efflusso C_d che mette in relazione la portata reale attraverso il dispositivo con quella teorica:

$$Q_a = \frac{C_d A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Dove Q_a è la portata reale di flusso



Per un flusso incompressibile C_d varia solo con il numero di Reynolds
Per un fluido comprimibile C_d dipende da Reynolds, dal rapporto delle pressioni e dall'esponente isoentropico del gas.

È sufficiente che la taratura basta sia effettuata con un solo tipo di fluido

C_d è definito per diametri dei tubi superiori a 40mm, rapporti β tra 0.2 e 0.7 e Re fino a 10000.

Misuratore di portata a diaframma – fluidi comprimibili

$$Q_a = \frac{C_d A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Non più valida in quanto la densità è variabile

Considerando il processo isoentropico:

$$q_m = \alpha \varepsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho_1}$$

α , coefficiente di portata

$\varepsilon_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta p}{k p_1}$, coefficiente di comprimibilità

$$\alpha = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

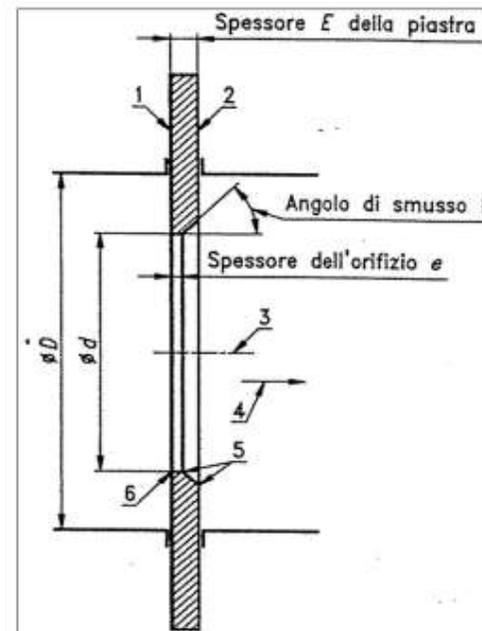
$\beta = d/D$, rapporto di strozzamento

C , coefficiente di efflusso

Misuratore di portata a diaframma – Diaframmi

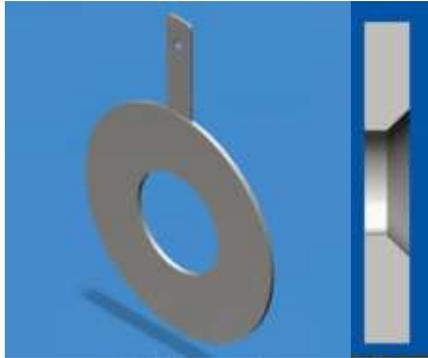
Esiste una normativa (**UNI EN ISO5167**) che regola le caratteristiche geometriche e l'installazione dei diaframmi e che da indicazioni riguardo:

- Natura del fluido
- Condizioni di flusso
- Tratti minimi rettilinei a monte e valle
- Geometrie dei condizionatori di flusso
- Circolarità del condotto
- Geometria del dispositivo
- Prese di pressione



Misuratore di portata a diaframma – Diaframmi secondo la ISO 5167

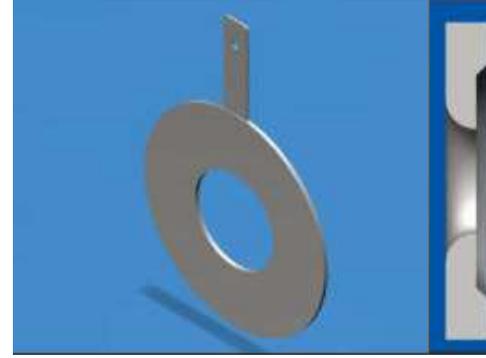
Diaframma classico



Diaframma simmetrico



Diaframma a quarto di cerchio

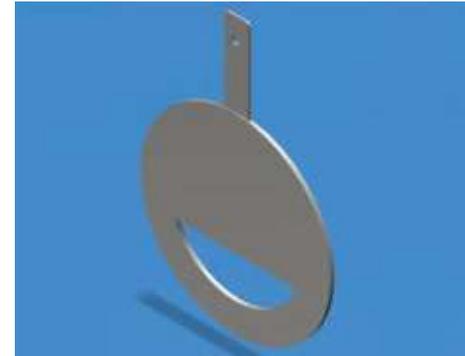


Impiegati in fluidi molto viscosi, su tubazione con piccoli diametri (> 25 mm) e su fluidi con basso numero di Reynold

Diaframma eccentrico



Impiegato in applicazioni in cui i fluidi possono avere solidi in sospensione, in caso di gas contenente liquidi e in caso di misura su tubazione orizzontale. Geometria di costruzione opposta (alto-basso) applicata su liquidi con gas (alto) o liquidi con solidi (basso).

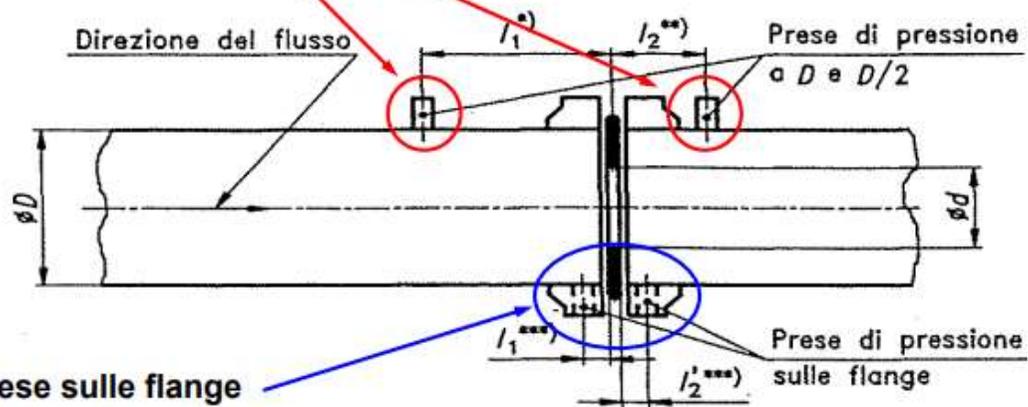


Impiegato in sostituzione dei diaframmi eccentrici, con fluidi a elevata concentrazione di solidi o di aria in sospensione. Il vantaggio consiste nell'elevata capacità di scarico.

Misuratore di portata a diaframma – Prese di pressione

➤ Prese a D e $D/2$

⇒ Più economico, non si devono modificare le flange



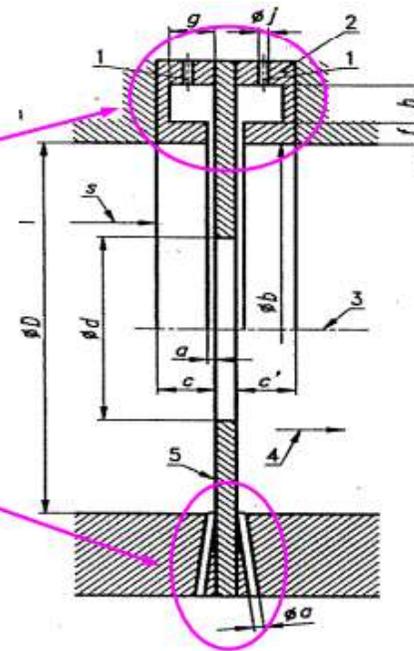
➤ Prese sulle flange

Misuratore di portata a diaframma – Prese di pressione

Prese di pressione

➤ Prese agli angoli

- ⇒ Anello portante con fessura anulare
 - ⇒ Sono più stabili, l'effetto di smorzamento non si presta per misure dinamiche
- ⇒ Prese singole
 - ⇒ Sentono il ΔP maggiore → sistema più sensibile
 - ⇒ Problemi di flusso non uniformato, discontinuità

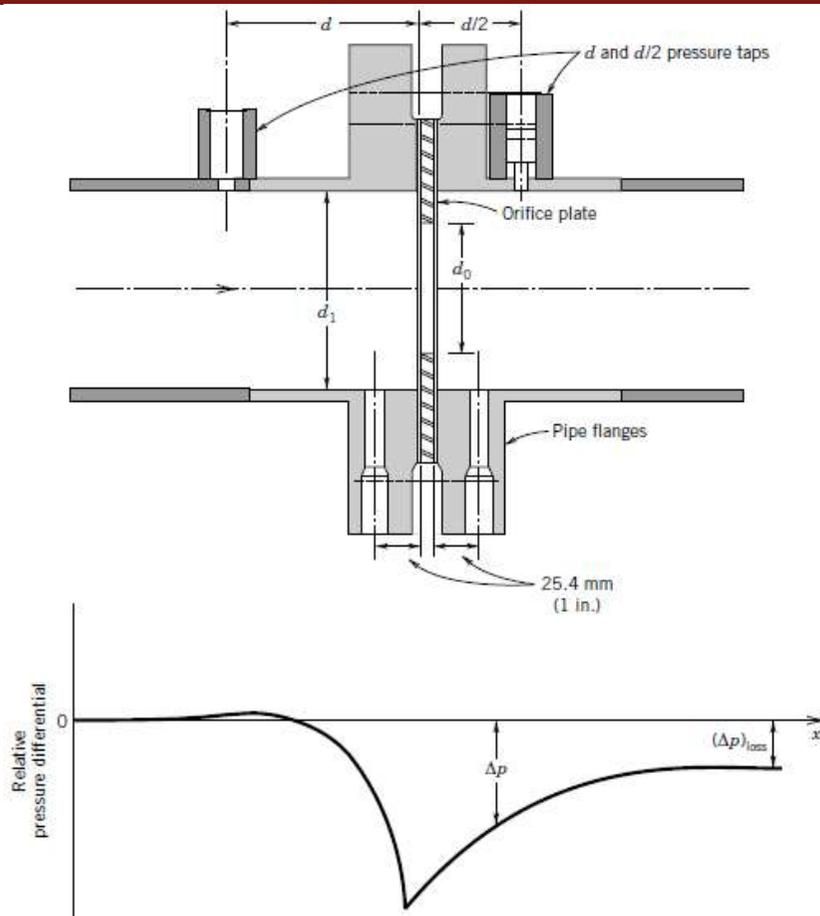


La normativa da indicazioni sulla incertezza

del coefficiente di efflusso:

0.6% per $\beta \leq 0,6$ - $\beta\%$ per $0,6 < \beta < 0.75$

Misuratore di portata a diaframma – Prese di pressione



Il diaframma induce una perdita di carico permanente (la più elevata rispetto a qualsiasi altro misuratore di portata). Tale difetto si può compensare aumentando la potenza di pompaggio.

In prima approssimazione la perdita di carico può essere calcolata in base alla variazione di pressione misurata ed al rapporto di strozzamento:

$$(\Delta p)_{loss} = \Delta p(1 - \beta^2)$$

Una considerazione finale per questa classe di strumenti è legata alla legge di funzionamento della misura:

$$Q \propto \sqrt{\Delta p}$$

Solitamente si ritiene che uno strumento risulta inaccurato per misure inferiori al 10% del suo fondo scala.

$$\varepsilon_Q \propto \sqrt{\varepsilon_{\Delta p}} = \sqrt{0.1} \cong 30\%$$

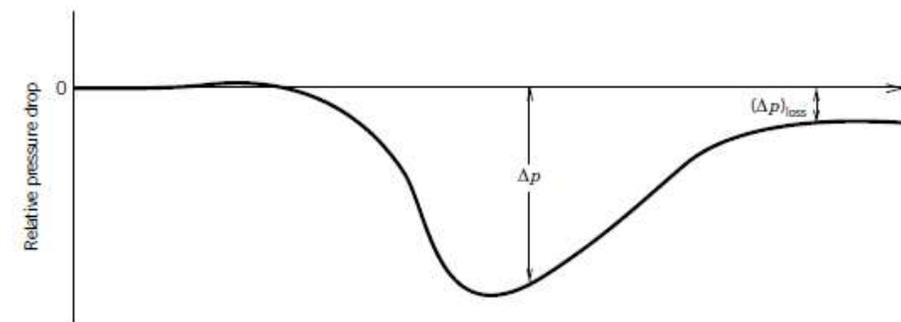
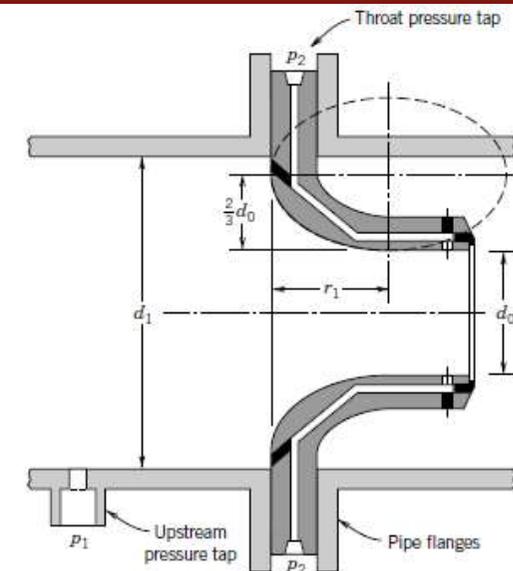
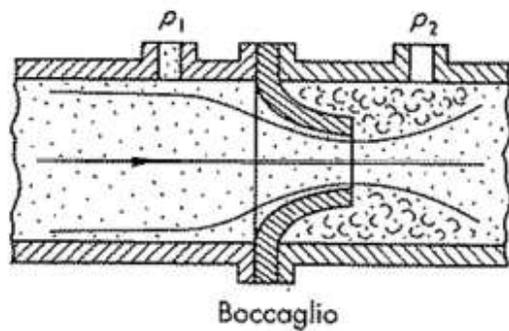
Questa non-linearità genera infine anche delle difficoltà nelle misure di portata variabile, dove il misuratore può rilevare una misura di portata in eccesso rispetto al valore reale.

Misuratore di portata a boccaglio

I boccagli sono più costosi dei diaframmi ma più economici dei venturimetri. Vengono spesso usati per flussi di vapore ad alta velocità in quanto maggiormente stabili in funzione di temperatura ed elevate velocità di propagazione dei fluidi.

Il boccaglio, come il diaframma introduce una forte perdita di carico e presenta valori minori di rapporti di strozzamento.

Non possono infine essere usati quando il fluido misurato contiene una fase solida (es. pietrisco) in quanto si rischierebbe l'intasamento.



Misure 2016 - Taccani



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Dipartimento di
Ingegneria
e Architettura

Misuratore di portata a tubo venturi

Progettati con variazioni di area meno repentine, hanno coefficienti di efflusso maggiori (fino a 0.99) rispetto a boccaglio e diaframma. Il divergente è più lungo del convergente per limitare le perdite di carico dovute all'allargamento della sezione, notoriamente più elevate di quelle d'imbocco. A causa delle ridotte perdite di carico sono preferiti quando si devono misurare elevate portate (es. acquedotti), dove si può ottenere grossi risparmi sul pompaggio o per misurare la portata dei ventilatori.

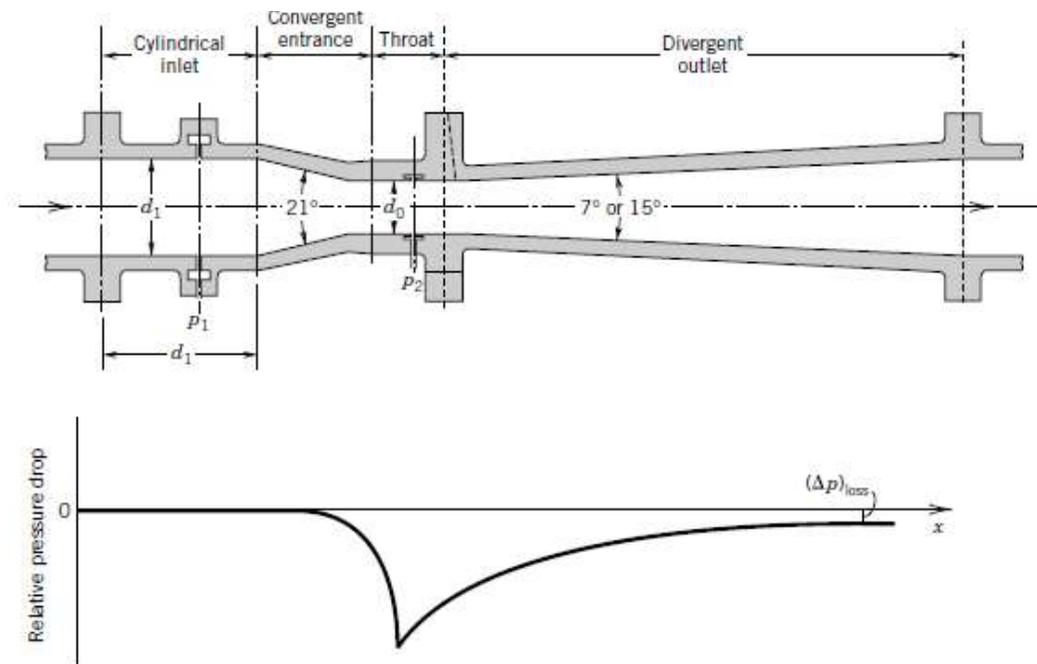
$$Q = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{2 \frac{(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Vantaggi:

- geometria interna regolare, difficile l'intasamento (adatti per fluidi con solidi in sospensione)
- misure di ottima precisione su un vasto campo di portate (da poche unità a molte migliaia di m³/h).

Svantaggi:

- notevole distanza tra le prese di pressione (presa di alta pressione a 7÷10 diametri a valle della strozzatura);
- sistema costoso e ingombrante



Misuratore di portata – comparazione di perdite di carico

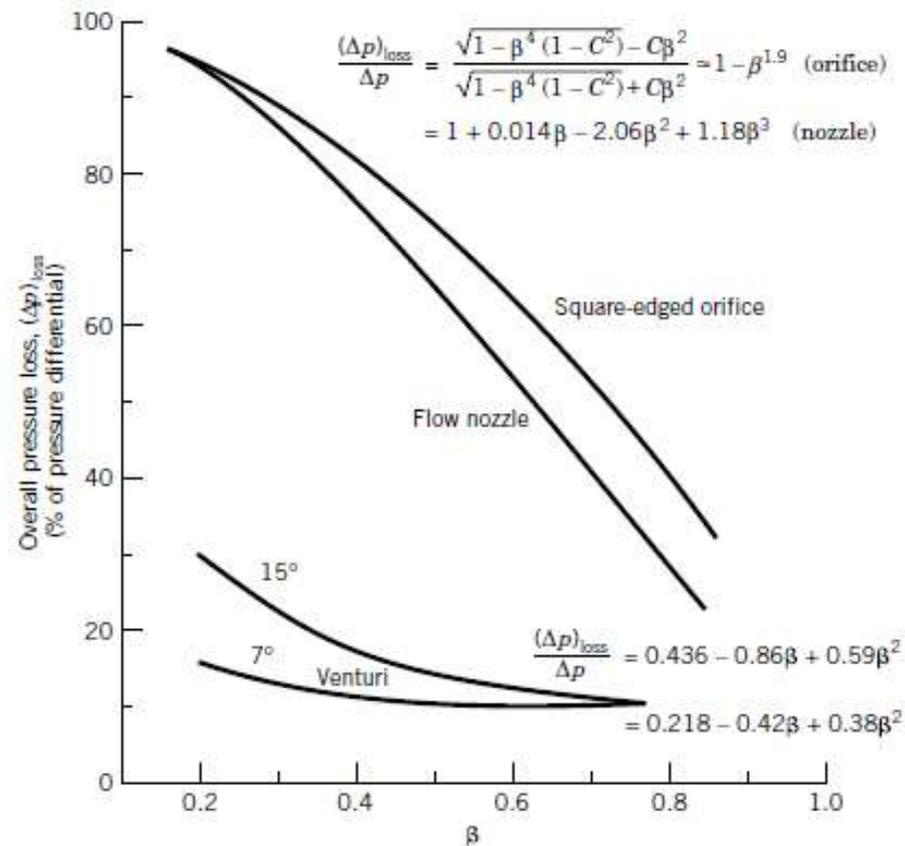
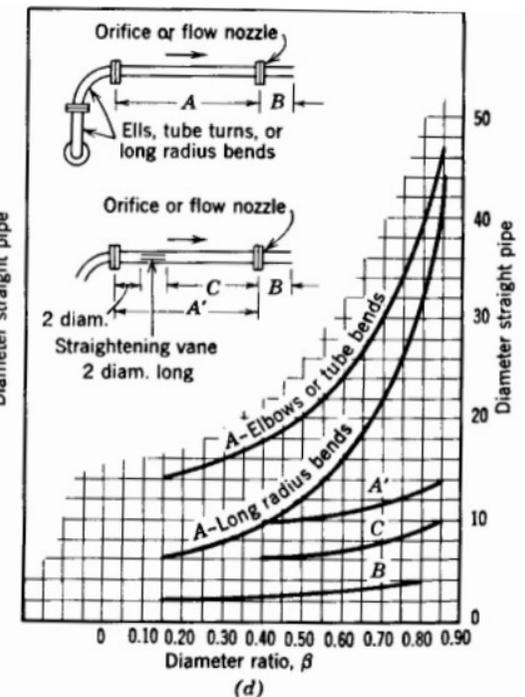
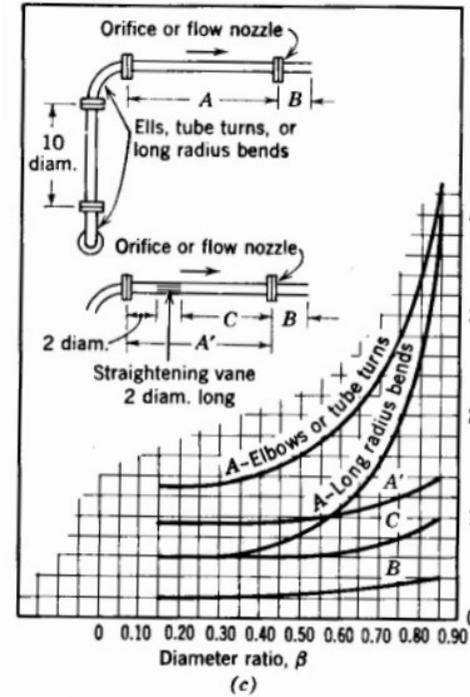
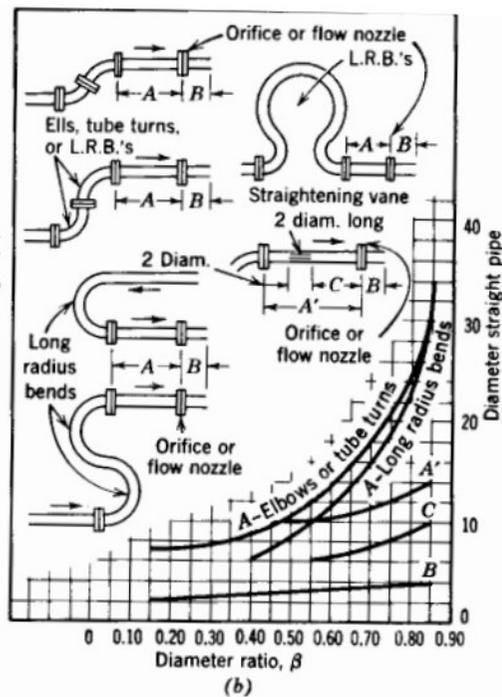
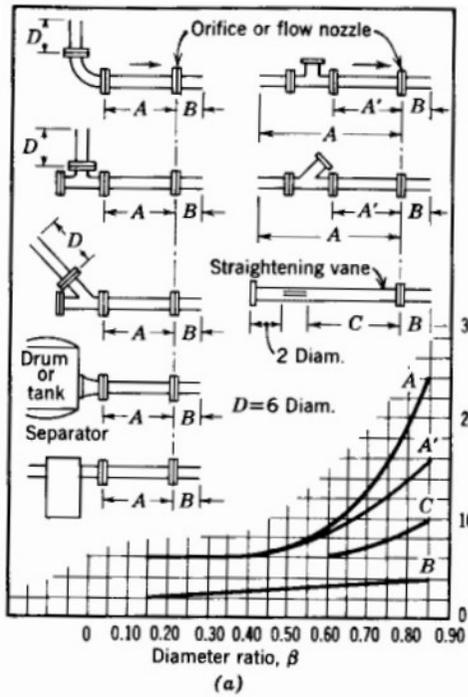


Figure 10.7 The permanent pressure loss associated with flow through common obstruction meters. (Courtesy of American Society of Mechanical Engineers, New York, NY; compiled and reprinted from reference 1.)

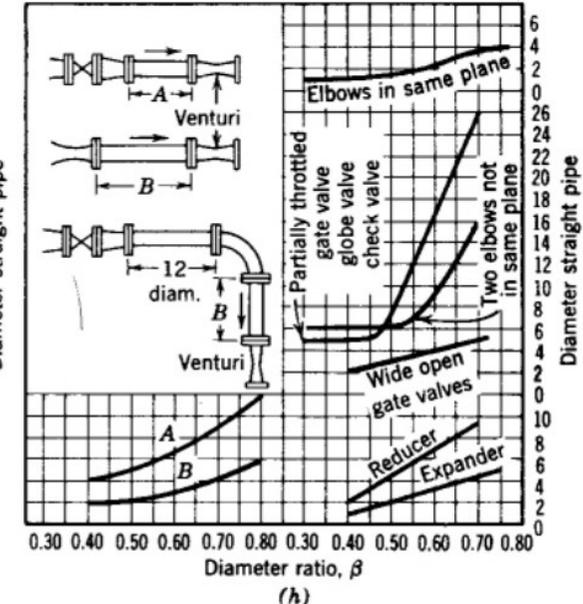
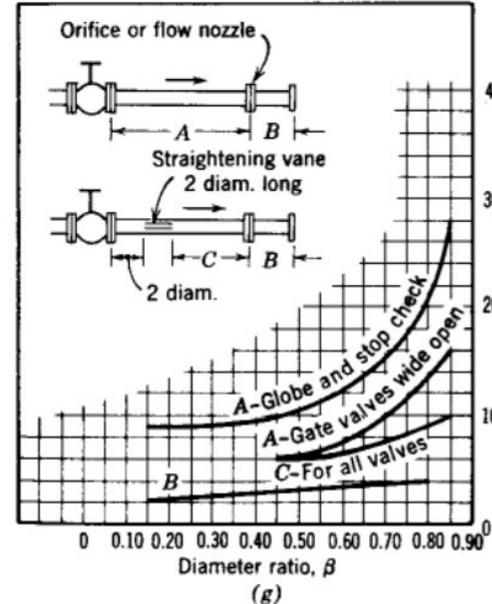
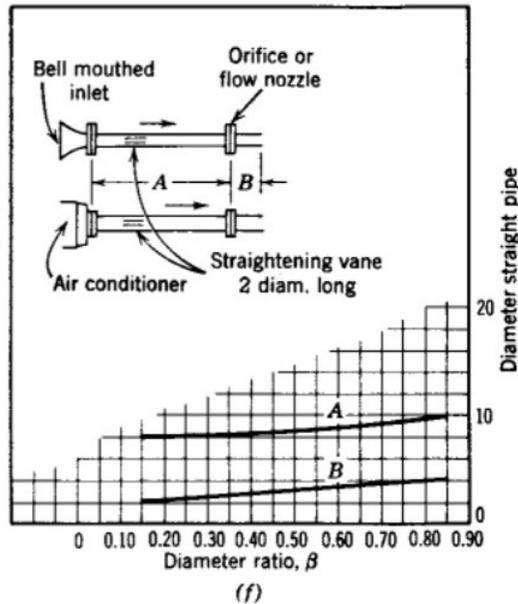
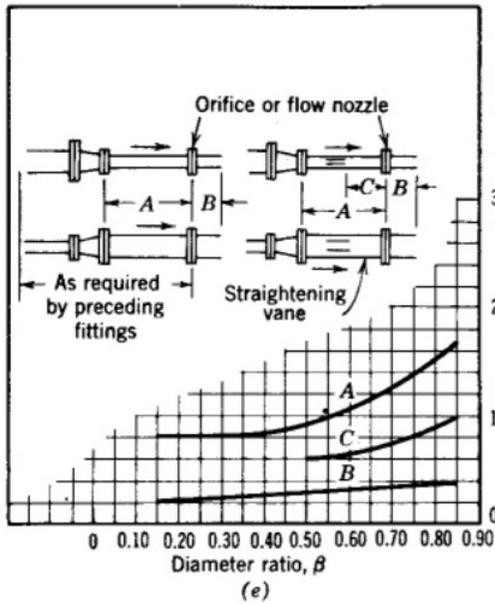
Distanze richieste per l'installazione di diaframmi, boccagli e

venturimetri



Distanze richieste per l'installazione di diaframmi, boccagli e

venturimetri



Misuratori ad area costante e caduta di pressione variabile: elementi a flusso laminare

Sono progettati per operare nel regime di flusso laminare $Re < 2000$.

La forma più semplice di un elemento a flusso laminare è un tubo di piccolo diametro (capillare).

Per $Re < 2000$ la relazione di Hagen-Poiseuille per il flusso viscoso per fluidi incomprimibili dà:

$$Q_a = \frac{\pi D^4}{128 \mu L} \cdot \Delta p$$

Q = portata volumica [m^3/s]

D = diametro interno del tubo [m]

μ = viscosità del fluido [$N \cdot s/m^2$]

L = lunghezza del tubo tra le prese di pressione [m]

Δp = perdita di carico [Pa]

Il singolo tubo capillare può trattare solo piccole portate per Re tali da mantenere il flusso in campo laminare.

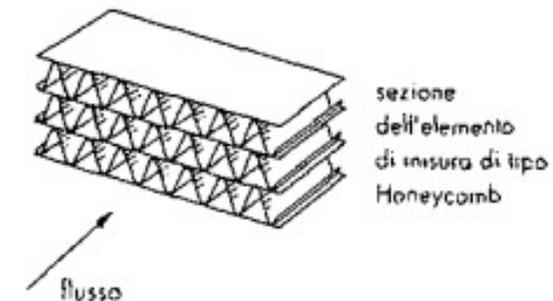
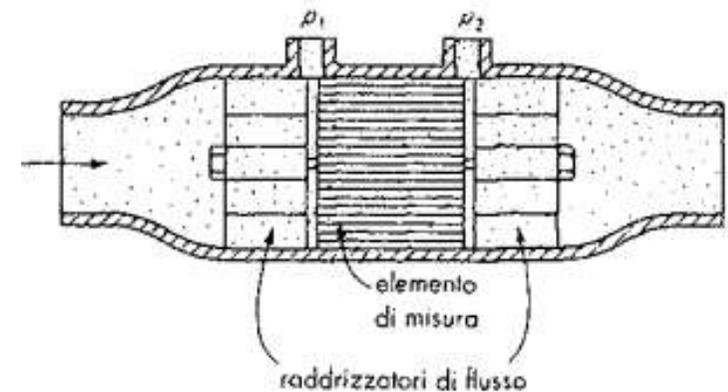
Per portate maggiori si possono utilizzare più capillari in parallelo, tubi grandi riempiti di piccole sfere, elementi tipo honeycomb

↑ relazione lineare tra la portata e la caduta di pressione

↓ intasamento a causa di fluidi sporchi

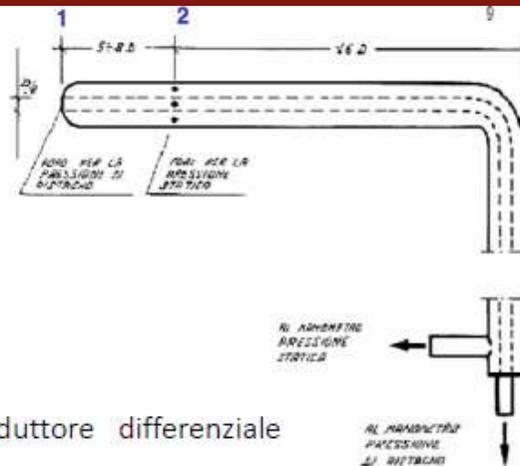
↓ costo elevato

↓ elevate perdite di carico



Tubo di Pitot

Lo strumento più comune per la misura della velocità di un flusso è il tubo di Pitot, costituito da una sonda con un foro frontale per la pressione totale e 4 fori laterali, a distanza opportuna dalla testa della sonda, per la misura della pressione statica. I due segnali di pressione vengono portati all'esterno tramite due tubi concentrici (quello interno per la pressione totale).



Il collegamento ad un manometro o trasduttore differenziale consente di calcolare il modulo della velocità.

Applicando Bernoulli tra la sez. 1 e la sez. 2 avremo:

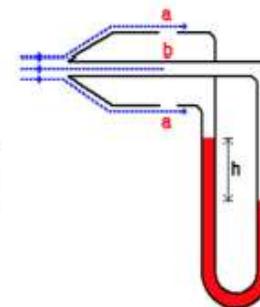
$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = 0$$

Considerando inoltre, che la velocità interna (u_1) è quella del liquido di ristagno, perciò nulla, e che non vi è differenza di altezza ($z_2 = z_1$)

$$\frac{v_2^2}{2} = \frac{p_2 - p_1}{\rho}$$



$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$



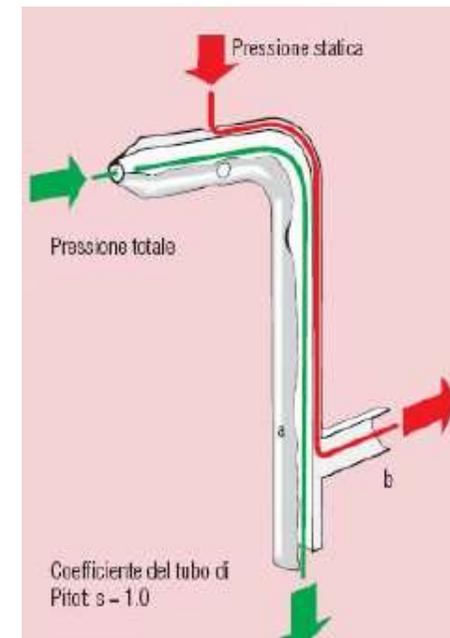
Tubo di Pitot

Il tubo di Pitot per misure di velocità puntuali può essere tarato per portate volumetriche, se specificatamente posizionato all'interno del condotto in modo.

Considerato che la velocità di un fluido all'interno di una condotta può variare in base alla posizione della linea di flusso, si può ottenere la velocità media per mezzo di molteplici acquisizioni effettuate *scansionando* la sezione trasversale del condotto, dalla quale si può ricavare la misura totale di portata.

Tale sistema:

- Risulta adeguato per uso dal laboratorio
- Si presta per misure di gas che si propagano ad alta velocità
- È economico e di facile realizzazione
- Richiede la conoscenza della densità del fluido a priori



Tubo di Pitot *auto-mediante*

In alternativa si può usare un tubo di pitot “automediante”.

Il tubo è dotato di un determinato numero di forellini (prese di pressione), disposte lungo la sua lunghezza, in modo che le pressioni generate da ognuno di essi

(imputabili alle diverse velocità componenti il profilo), vengano ad essere mescolate dentro il tubo, determinando così una pressione mediata per la misura.

Il valore statico viene rilevato da un foro disposto a valle del senso di flusso. (precisione. 1 – 2%)

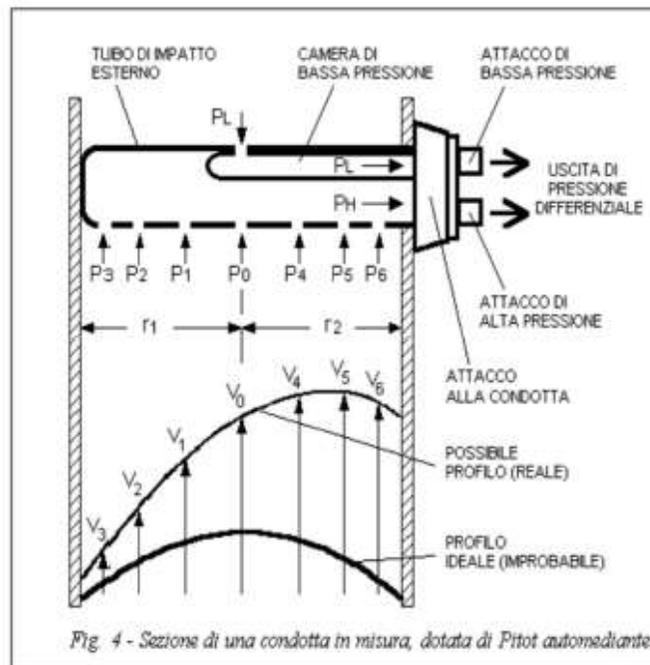


Fig. 4 - Sezione di una condotta in misura, dotata di Pitot auto-mediante.



MISURE 2016 - Test 1

Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Principio di funzionamento

Un rotametro è composto da un tubo verticale con forma conica, in cui un galleggiante assume una determinata posizione lungo la direzione verticale, corrispondente ad una data portata che scorre nel tubo.

Il fluido, percorrendo il rotametro dal basso verso l'alto investe il galleggiante e l'oltrepassa.

Il galleggiante crea una perdita di pressione localizzata dovuta al restringimento della sezione di passaggio.

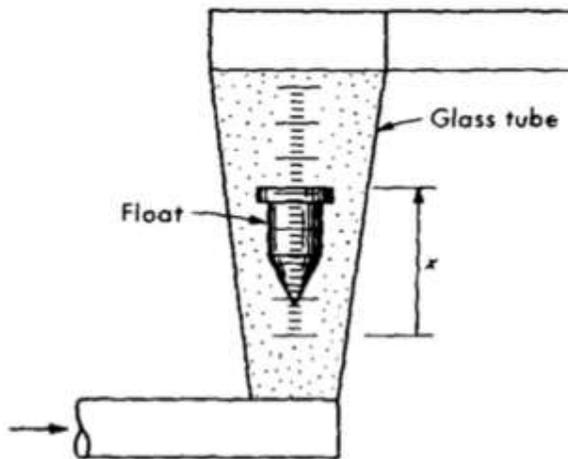


Figure 2016 - Tacchini

Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Principio di funzionamento

Per una certa portata, quando si bilanciano le forze verticali di pressione differenziale, di gravità, di viscosità e di galleggiamento, il galleggiante rimane in equilibrio.

- Forza gravità – forza di galleggiamento = cost
- la forza diretta verso l'alto data dalla caduta di pressione (ΔP) * l'area della sezione trasversale del galleggiante = cost
- area galleggiante = cost $\rightarrow \Delta P = \text{cost}$

Per un'area di passaggio del flusso fissata, ΔP varia con la il quadrato della portata, quindi, per mantenere il $\Delta P = \text{cost}$ al variare della portata, l'area deve variare. La conicità del galleggiante garantisce la variabilità dell'area.

L'area del misuratore varia con continuità con lo spostamento verticale.

La posizione del galleggiante è l'uscita del misuratore; può essere resa lineare con la portata facendo variare l'area della sezione del tubo in modo lineare con lo spostamento verticale.



Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Per un fluido incomprimibile si ottiene il seguente risultato:

$$Q_t = \frac{C_d(A_t - A_f)}{\sqrt{1 - [(A_t - A_f)/A_t]^2}} \cdot \sqrt{2gV_f \frac{w_f - w_{ff}}{A_f w_{ff}}}$$

Q = portata volumetrica, m^3/s

C_d = coefficiente di efflusso

A_t = area del tubo, m^2

A_f = area del galleggiante, m^2

V_f = volume del galleggiante, m^3

w_f = peso specifico del galleggiante, kg/m^3

w_{ff} = peso specifico del fluido, kg/m^3

Se la variazione di C_d con la posizione del galleggiante è piccola e se $[(A_t - A_f)/A_t]^2$ è sempre molto minore di uno, allora abbiamo:

$$Q = K(A_t - A_f)$$

Se il tubo è costruito in modo tale che A_t vari in modo lineare con la posizione del galleggiante x abbiamo: $Q = K_1 + K_2 x$

Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Il galleggiante viene realizzato in materiali differenti per ottenere la differenza di densità.

Alcune forme, come la sfera, non richiedono guide, altre sono mantenute in posizione centrale da fili di guida.

I tubi in genere sono realizzati in vetro ad alta resistenza per permettere l'osservazione diretta della posizione del galleggiante.

Quando è necessaria una resistenza maggiore si usano tubi in metallo e la posizione viene rilevata magneticamente.

Se si desidera un segnale elettrico correlato alla posizione del galleggiante si usa un trasduttore di spostamento.

Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

- Usati per piccole e medie portate
- Industria chimica, petrolchimica, farmaceutica, alimentare, trattamento acque
- Necessitano un'installazione verticale (flusso dal basso verso l'alto).
- Richiedono una taratura rispetto a pressione e temperatura standard di riferimento.
- Con opportune correzioni possono essere poi usati in condizioni di esercizio differenti.
- Applicazioni a fluidi monofasici
- Economici (100 – 300€ a seconda della precisione)



Caratteristiche tecniche (Krohne)

Precisione: 1 – 2% FS

Portata: acqua: 0.4 – 10000 l/h

aria: 0.007 – 180 m³/h

Temperatura di processo: -40 – 100°C

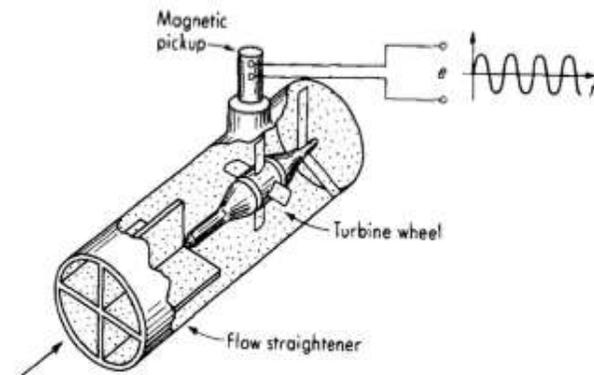


Misuratori a turbina

Principio di funzionamento

Se si inserisce una turbina in un tubo contenente fluido in movimento la velocità di rotazione della turbina dipenderà dalla portata del fluido.

Riducendo l'attrito dei cuscinetti e mantenendo le perdite al minimo si può progettare una turbina la cui velocità vari linearmente con la portata.



La velocità si ottiene misurando la frequenza con cui le palette della turbina passano per un determinato punto usando un dispositivo magnetico di prossimità.

Se si vuole un segnale analogico in tensione in uscita gli impulsi possono essere inseriti in un convertitore frequenza-tensione.

Caratteristiche tecniche tipiche

Campi di portata: min 0,3 l/min ... max 60 l/min

Viscosità: 0,5 ÷ 1,5 cP

Condizioni di esercizio:

- Temperatura: $-20^{\circ}\text{C} \div +80^{\circ}\text{C}$
- Pressione: max 10 bar per fluidi a $T=20^{\circ}\text{C}$



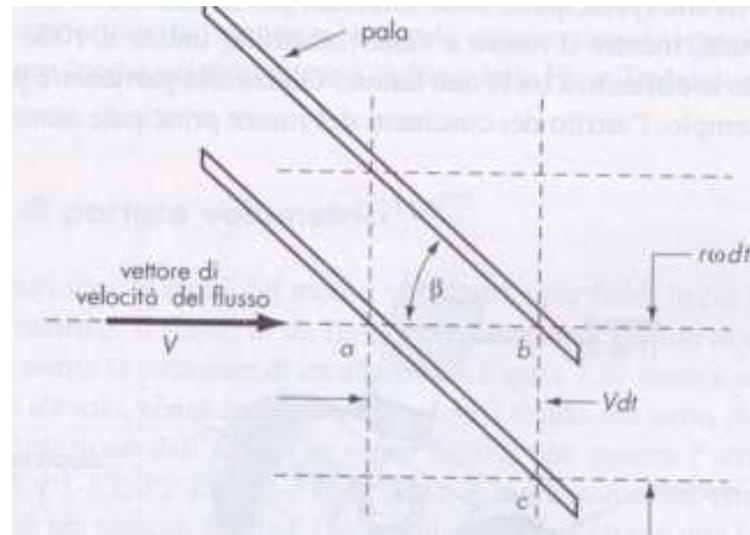
MISURE 2016 - Turbina

26

Misuratori a turbina

Per flussi monodimensionali e supposto il sistema di misura ideale (il rotore non dà coppie, il cui effetto è quello di produrre ritardi), in un intervallo di tempo dt , mentre il fluido si muove da a a b , il rotore si muove da c a b e:

$$\frac{\omega r dt}{v dt} = \tan \beta \rightarrow \omega = \frac{v}{r} \tan \beta$$



Per flussi monodimensionali velocità e portata sono proporzionali, pertanto la velocità del rotore risulta proporzionale alla portata.

Misuratori ad elica (o ventola)

Le eliche o ventole misurano un **flusso gassoso**.

Sono **misuratori puntuali di velocità**, costituiti da un'elica sostenuta da un perno, collegato ad un anello di protezione, sul quale viene innestato il manico.

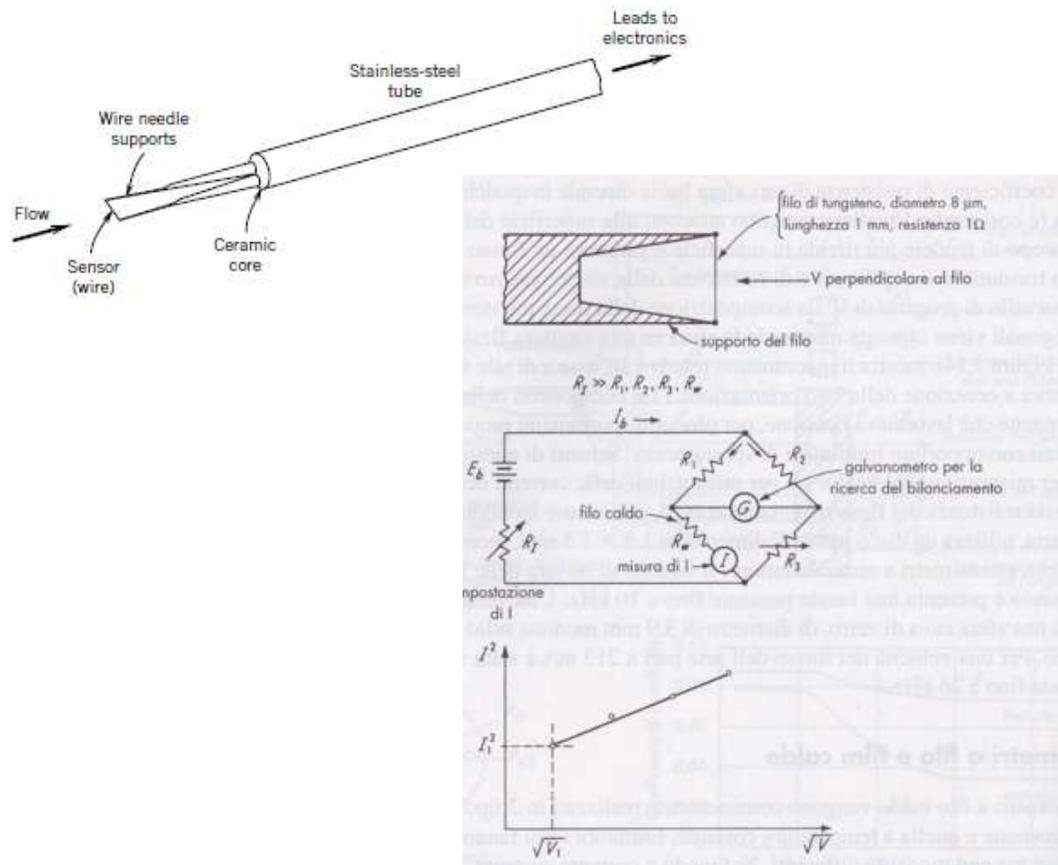
Per effettuare la misura, si orienta lo strumento in modo che l'**asse di rotazione** dell'elica sia **parallelo alla direzione del moto del fluido**.

Attraverso un **contascatti analogico o digitale** si registra il moto dell'elica: in questo modo lo strumento fornisce in uscita direttamente la velocità.

Questo dispositivo, detto anche **anemometro a ventolina**, non trova grandi applicazioni industriali; viene utilizzato solitamente per misurare la velocità negli **impianti di riscaldamento e di condizionamento**, sia all'interno dei condotti che all'esterno delle bocchette di emissione.



Anemometri a filo caldo



Modello a corrente costante

Il filo viene percorso da una corrente costante; in condizioni di equilibrio il calore prodotto al suo interno per effetto Joule viene bilanciato dalle perdite di calore dovute ai fenomeni convettivi alla sua superficie:

$$i^2 R = hA(T_{wire} - T_{flow})$$

h – coefficiente di scambio termico del sensore

A – area di scambio termico

Poiché il coefficiente convettivo del sensore è funzione della velocità della vena, la temperatura di equilibrio può anche essere usata per una misura indiretta della velocità del flusso.

La misura di temperatura viene quindi ricavata dal una misura della resistenza elettrica del filo

Modello a temperatura costante

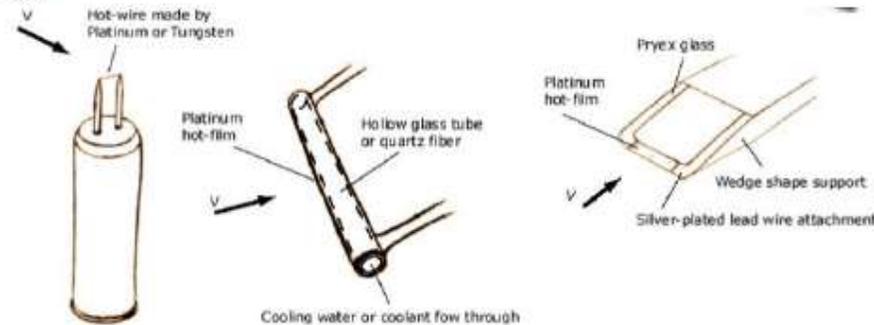
La temperatura è misurata a seguito di un bilanciamento della corrente che serve a mantenere costante la temperatura del sensore.

Anemometri a filo caldo

Gli anemometri a filo caldo sono usati sia per la **ricerca in fluidodinamica**, sia per misure e controlli di flussi d'aria nel campo del **condizionamento dell'aria**, della **qualità dell'aria**, e dell'**igiene industriale**.

I sistemi di misura per la ricerca in fluidodinamica utilizzano 1, 2 o 3 sensori molto sottili in grado di seguire anche flussi ad elevata turbolenza nel campo tridimensionale.

Nel campo della misura industriale si predilige invece un sensore più robusto che misura la velocità media.



Anemometri a filo caldo

Anemometro a filo caldo

I **vantaggi** di questo tipo di strumento sono:

- **misura diretta** della portata senza bisogno di effettuare correzioni sulla pressione o sulla temperatura;
- sensibilità alle **basse velocità**;
- **accuratezza e ripetibilità** delle misure;
- **risposta veloce** ai cambiamenti di velocità e di temperatura;
- insensibilità alle componenti trasversali della velocità.

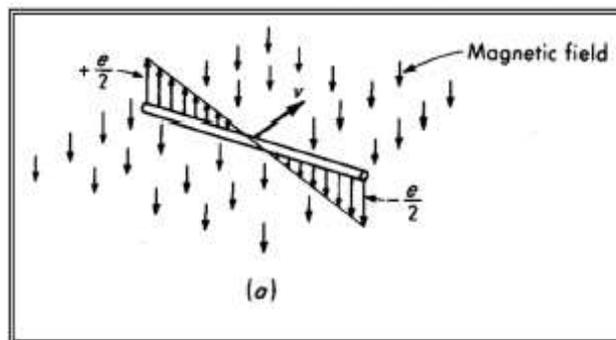
Gli anemometri a filo caldo sono **molto delicati**. Le sue varianti a film o a piastrina (resistenza), sono più robuste ma hanno una risposta più lenta.



Misuratori elettromagnetici

Principio di funzionamento

I misuratori di portata elettromagnetici si basano sul principio di induzione. Se un conduttore di lunghezza l si muove con una velocità trasversale v attraverso un campo magnetico di intensità B si genera una forza elettromotrice agente sulle particelle cariche del conduttore. Si induce così un gradiente di potenziale attraverso il conduttore.



→ Gradiente di potenziale attraverso il conduttore

$$e = B l v$$

B : densità del flusso di campo

l : lunghezza del conduttore

V : velocità del conduttore

Collegando le estremità ad un circuito esterno la tensione indotta produrrà un flusso di corrente i

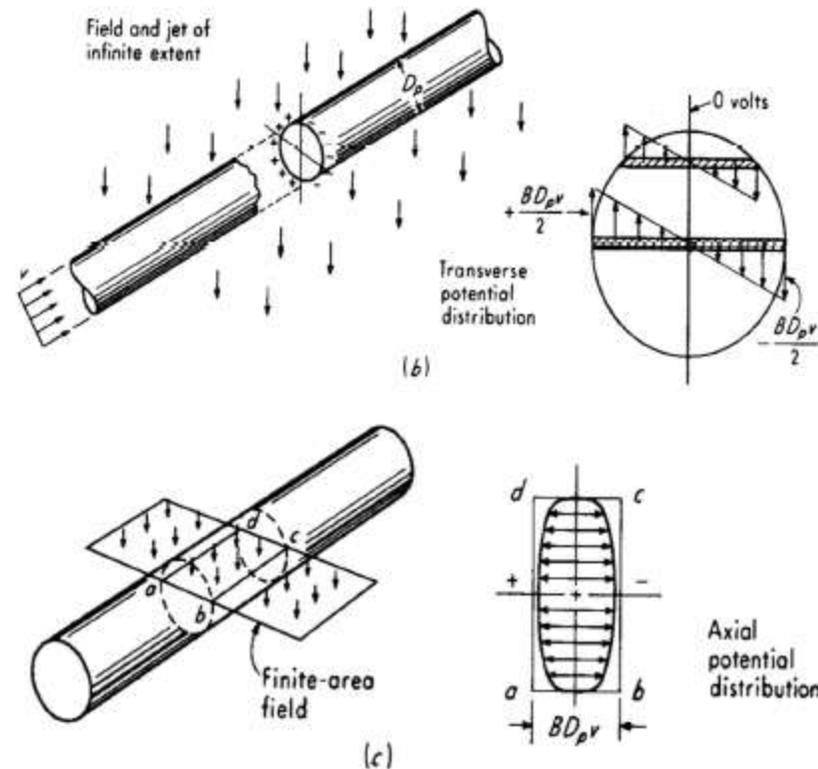
Il flusso di corrente attraverso il conduttore mobile, di resistenza R , genera una caduta di potenziale iR

Ai terminali del conduttore avremo una tensione $e - iR$

Misuratori elettromagnetici

Consideriamo un flusso cilindrico di fluido conduttore con profilo di velocità uniforme che attraversa un campo magnetico

Se il fluido che attraversa il campo magnetico è conduttore, una forza elettromotrice verrà indotta sul cilindro metallico, la quale produrrà una differenza di potenziale massima (pari a $BD_p v$) ai lati diametralmente opposti del cilindro. Questo effetto è limitato all'area interessata e coperta dal campo magnetico.

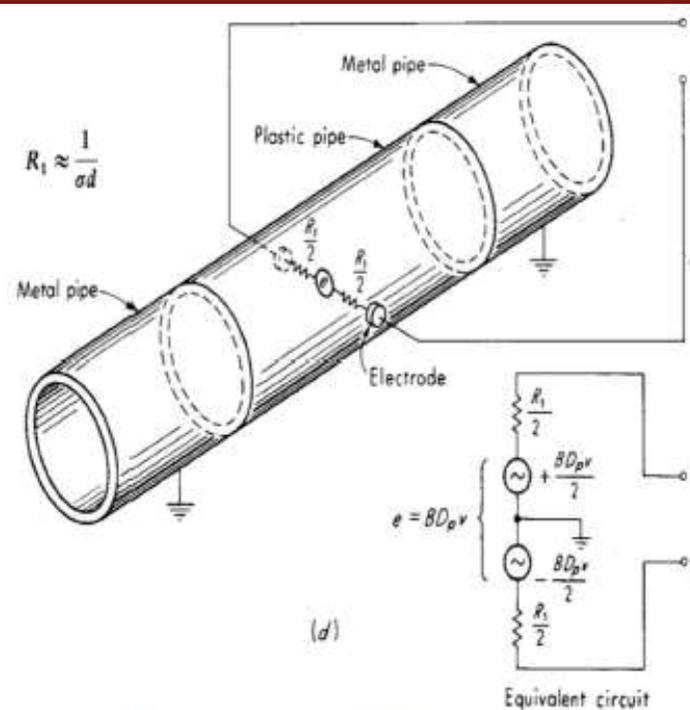


Misuratori elettromagnetici

Condotta non magnetica in materiale non conduttore.

Due elettrodi posti nei punti a massima differenza di potenziale.

Essendo il fluido conduttore ci sarà un percorso di conduzione tra i due elettrodi che forniscono un segnale in tensione.



Il segnale in tensione risulta proporzionale alla velocità del fluido

È stato dimostrato che e corrisponde alla velocità media di qualsiasi profilo simmetrico rispetto al centro del tubo.

Misuratori elettromagnetici

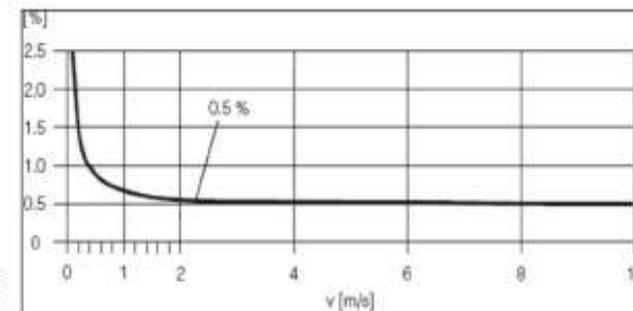
Applicazioni e vantaggi

Sono utilizzati da più di 50 anni
Possono misurare la velocità di un qualsiasi fluido conduttore ($\sigma \approx 1\mu\text{S/cm}$; alcuni dispositivi: $\sigma \approx 0.1\mu\text{S/cm}$)
Non hanno parti in movimento
Non alterano il campo di moto
Non portano strizioni di diametro quindi non aggiungono perdite



Caratteristiche tecniche (Yokogawa)

Errore: 0.5% o.r.
Portate: 0.2 - 1000 m³/h
Consumo: 10W
Uscita: 4-20 mA
Alimentazione: 200-240 VAC o 24 VAC/DC



Misuratori ad ultrasuoni

Principio di funzionamento

Il principio operativo si basa sulla modalità di propagazione di un disturbo di pressione attraverso un fluido.

La velocità con cui si propagano i disturbi dipende infatti dalle caratteristiche del fluido e dalla sua velocità.

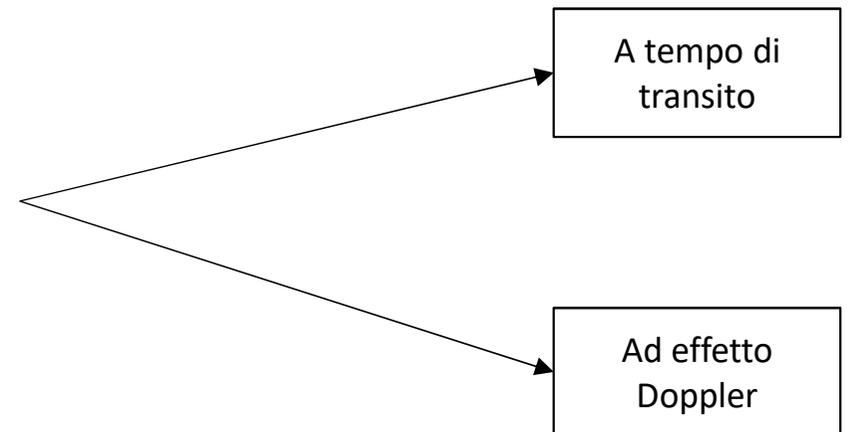
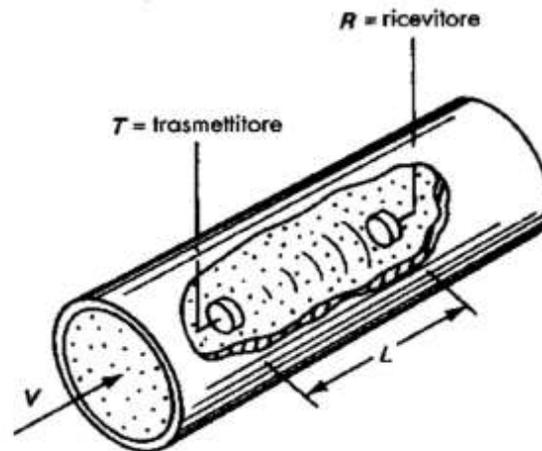
Vengono utilizzati brevi treni di onde sinusoidali (circa 10 MHz).

Comunemente si usano trasduttori a cristalli piezoelettrici. Al cristallo trasmettitore viene data energia elettrica sotto forma di brevi impulsi di tensione ad alta frequenza che mettono in vibrazione il cristallo.

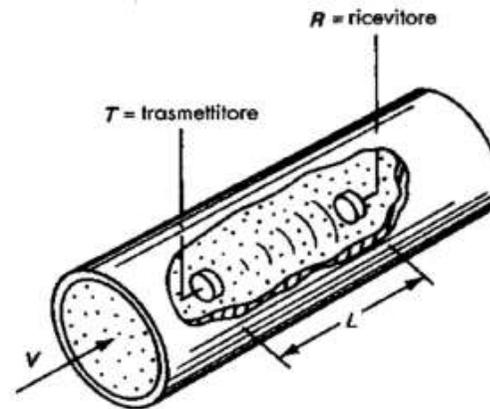
La vibrazione viene comunicata al fluido e si propagherà attraverso di esso.

Il cristallo ricevitore è esposto alle fluttuazioni e risponde vibrando.

Il moto di vibrazione produce un segnale elettrico ad esso proporzionale.



Misuratori ad ultrasuoni a tempo di transito



Con velocità di flusso nulla il tempo t_0 di passaggio degli impulsi risulta:

$$t_0 = \frac{L}{c} \quad \begin{array}{l} L = \text{distanza tra trasmettitore e ricevitore} \\ c = \text{velocità del suono} \end{array}$$

Se il fluido si muove con velocità V il tempo di passaggio t diventa:

$$t = \frac{L}{c + v} = L \left(\frac{1}{c} - \frac{v}{c^2} + \frac{v^2}{c^3} - \dots \right) \approx \frac{L}{c} \left(1 - \frac{v}{c} \right) \rightarrow \Delta t = \frac{Lv}{c^2}$$

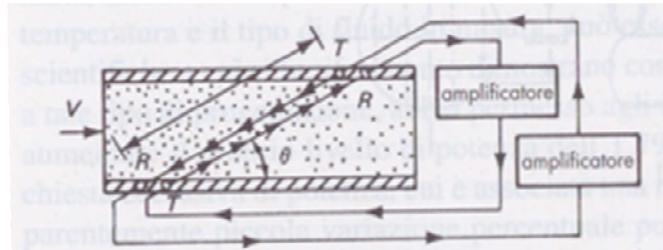
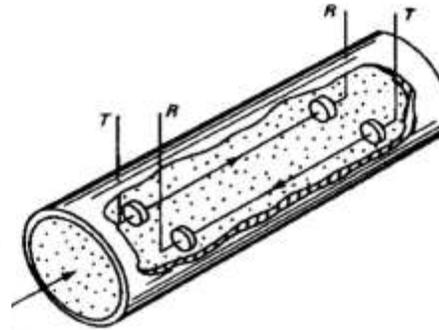
$L = \text{cost}$, c varia con la temperatura \rightarrow errore significativo perché compare al quadrato, inoltre Δt è piccolo.

ad esempio in H_2O : se $V = 3.05 \text{ m/s}$, $L = 305 \text{ mm}$ e $c \approx 1520 \text{ m/s} \rightarrow \Delta t = 0.4 \mu\text{s}$

Misuratori ad ultrasuoni a tempo di transito

t_1 : tempo nella direz. del flusso
 t_2 : tempo nella direz. opposta
 Δt è doppio rispetto a prima
 Rimane la dipendenza da c^2

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Lv}{c^2 - v^2} \approx \frac{2Lv}{c^2}$$



$$\Delta f = \left| \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right| = \frac{2v \cos \theta}{L}$$

Misuratori ad ultrasuoni ad effetto Doppler

L'effetto Doppler consiste nella percezione apparente di una variazione di frequenza, rispetto alla frequenza originale emessa da una sorgente che si trovi in movimento rispetto all'osservatore stesso

Un emettitore manda un treno di onde alla frequenza f_1 (circa 1 – 5 MHz) con angolo α ($\lambda=c/f_1$).

Le onde colpiscono le particelle che si muovono a velocità v_p .

Le particelle che si allontanano dall'emettitore vedono una lunghezza d'onda $\lambda_p = (c - v_p \cos(\alpha))/f_1$.

Il ricevitore vede una lunghezza d'onda:

$$\lambda_p = \frac{(c - 2v_p \cos(\alpha))}{f_1} \quad f_2 = \frac{(f_1 \cdot c)}{(c - 2v_p \cos(\alpha))}$$

Misurando la differenza di frequenza abbiamo una misura della velocità del flusso.

Si misura la velocità delle particelle, non del liquido

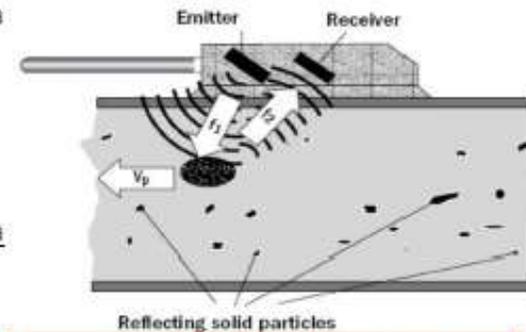
Non invasivo, non ci sono parti in movimento

Ci deve essere un numero sufficiente di particelle riflettenti nel flusso

Le particelle devono avere diametro grosso per avere una buona riflessione

La velocità del suono delle particelle deve essere nettamente differente da quella del liquido.

Per avere una misura corretta necessita di molti diametri a monte (20 D)

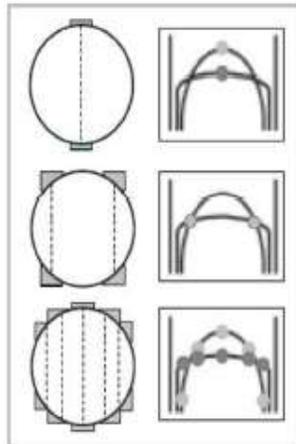


$$f_1 - f_2 = \Delta f = \frac{(2v_p f_1 \cos \alpha)}{c}$$

Misuratori ad ultrasuoni

Larger number of measuring paths = greater measuring accuracy at varying Reynolds number

Fig. 9 shows on the left in each case the position of the measuring paths, and on the right a longitudinal section through the tube with implied laminar and turbulent flow profiles in the tube centreline. The values sensed by the measuring beams at laminar flow are marked with dots on the respective profile line.



Single-beam ultrasonic flowmeters, at the top in Fig. 9, are used mostly for turbulent flows, e.g. for water. They show an error of measurement of approx. 30% at the transition from turbulent to laminar flow.

Dual-beam ultrasonic flowmeters, Fig. 9 (centre), show an error of measurement of only 0.5% at this turbulent/laminar transition. They have been used for more than 15 years for process measurements. They are also used for monitoring officially calibrated differential-pressure flowmeters that are subject to wear from the dirt particles in crude oil and then have noticeable measurement errors.

The ALTOSONIC V ultrasonic volumetric meter with 5 measuring paths (at the bottom in Fig. 9) senses

the flow profile so well that it can completely compensate for its effects on measuring accuracy and also, given changes from "laminar" to "turbulent", stays well within its allowable error of measurement of $\pm 0.15\%$.

Sensibilità al profilo del flusso

Si possono usare più traiettorie e mediare i risultati ottenuti



- Permettono di misurare sia fluidi puliti che sporchi
- Approccio *clamp on* meno invasivo
- Impiegati in principio per liquidi si impiegano anche per gas (misura gas infiammabili nelle raffinerie) e vapore.

Misuratori a distacco di vortici

Il principio di funzionamento si basa sul fenomeno di distacco di vortici (karman vortex) a valle di un corpo solido dai bordi smussati immerso in una vena fluida investito da un flusso stazionario.

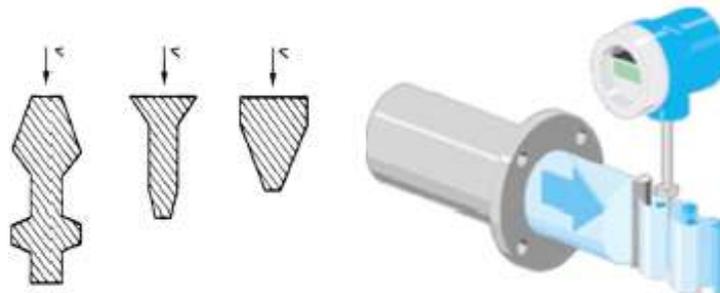
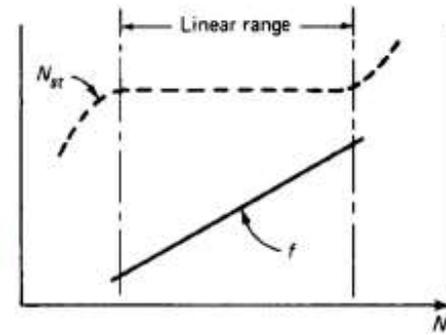
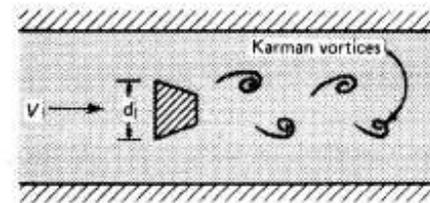
Se Reynolds > 10000 si ha formazione di vortici con frequenza di distacco:

$$f = \frac{(N_{st}V)}{d}$$

Per opportune forme del corpo $N_{st} = \text{cost}$ su un vasto intervallo di Reynolds

Quindi f proporzionale a V

Ci sono diverse forme per i corpi da cui si ha il distacco di vortici.



Misuratori a distacco di vortici

Per la misura della frequenza si possono usare materiali piezoelettrici, piezoresistivi, si può monitorare l'interruzione, dovuta al passaggio dei vortici, di fasci ultrasonici.

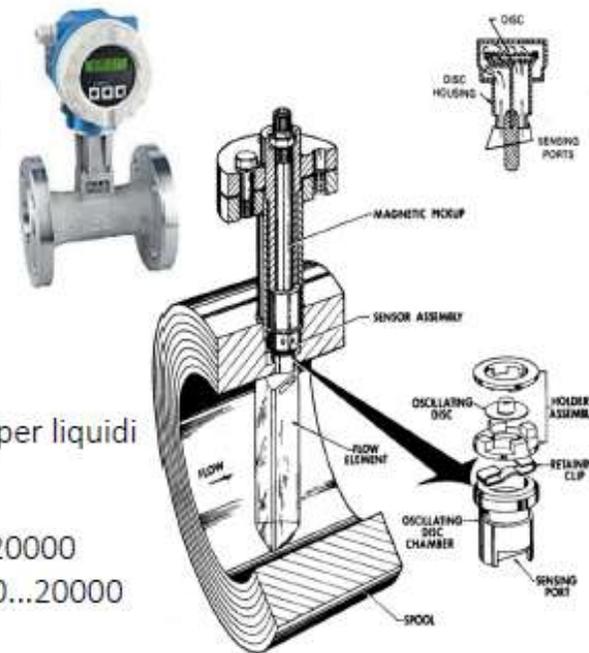
Quello in figura avverte la differenza di pressione per mezzo di un diaframma elastico

Applicazioni e vantaggi

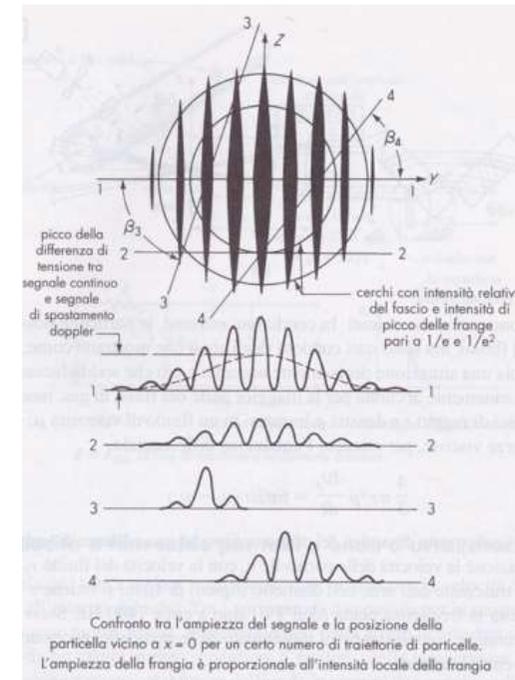
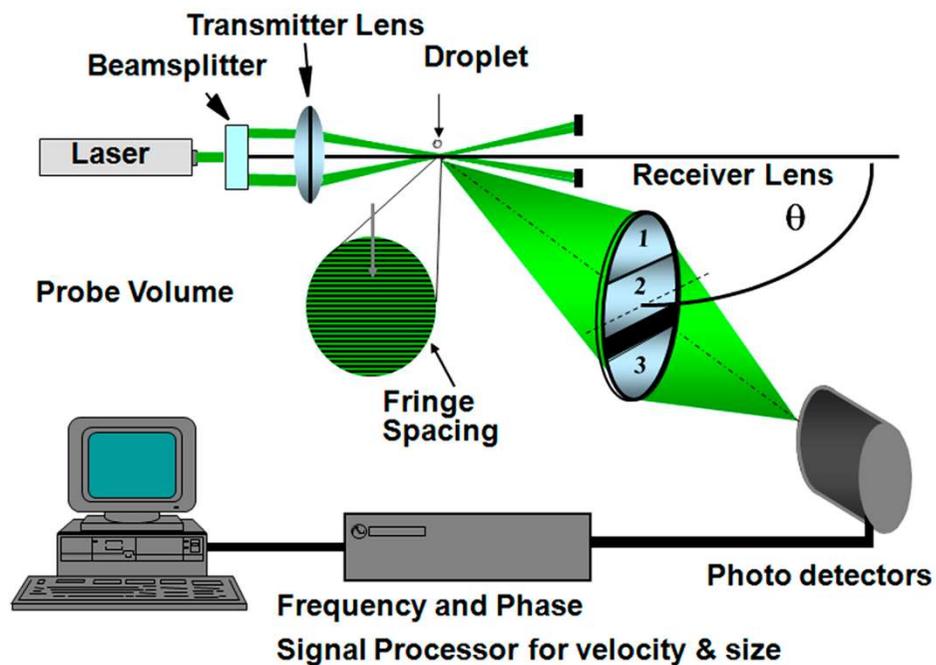
Misure volumetriche di vapore, gas e liquidi
Non hanno bisogno di ricalibrazione
Minime perdite di pressione
Campo d'impiego 15:1 per gas e vapore, 40:1 per liquidi

Errore: Liquidi: $< 0.75\% \text{ o.r. } Re > 20000$
 $< 0.75 \text{ o.f.s } Re \text{ tra } 4000 \dots 20000$

Gas/vapore: $< 1\% \text{ o.r. } Re > 20000$
 $< 1 \text{ o.f.s } Re \text{ tra } 4000 \dots 20000$



Misuratori di portata laser – Anemometro laser - doppler



Misuratori di portata laser – Anemometro laser - doppler

I principali **svantaggi** di questo sistema di misurazione sono:

- l'elevato costo
- il fatto che per effettuare la misura è necessario che fluido e condotto siano perfettamente trasparenti.

Nonostante ciò è uno strumento di **altissima precisione** nella misura della velocità, poiché riesce ad analizzare un'area **ristrettissima** (praticamente puntiforme) del condotto dal momento che la misura viene effettuata nel punto d'intersezione dei raggi laser.



Misure 2016 - Taccani

Misuratori di portata laser – Particle Image Velocimetry

PIV (Particle Image Velocimetry):

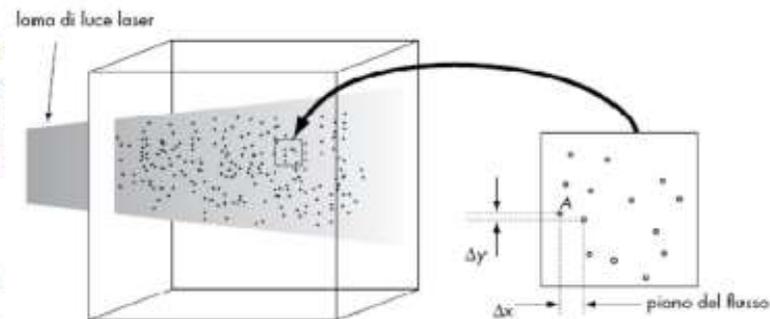
è una tecnica di misura di tipo quantitativo, più **sofistica** dell'anemometro laser-doppler, basata sulla **cross-correlazione di immagini digitali**.

Il **flusso viene inseminato** con delle **particelle traccianti** (seeding) con densità più prossima possibile a quella del fluido da studiare (spesso si usano vapori di olio), in modo da seguirne quanto più possibile il moto.

Si illumina la sezione da esaminare con **due impulsi consecutivi e ravvicinati di luce laser**, convertiti tramite un apparato ottico in **lame di luce**.

Le **particelle rifrangono la luce**, che viene catturata da una **telecamera**, con l'aiuto di un **sincronizzatore**.

Si ottengono così **due immagini della posizione**.



Δt = intervallo di tempo tra due impulsi

Δx = spostamento della particella in direzione x

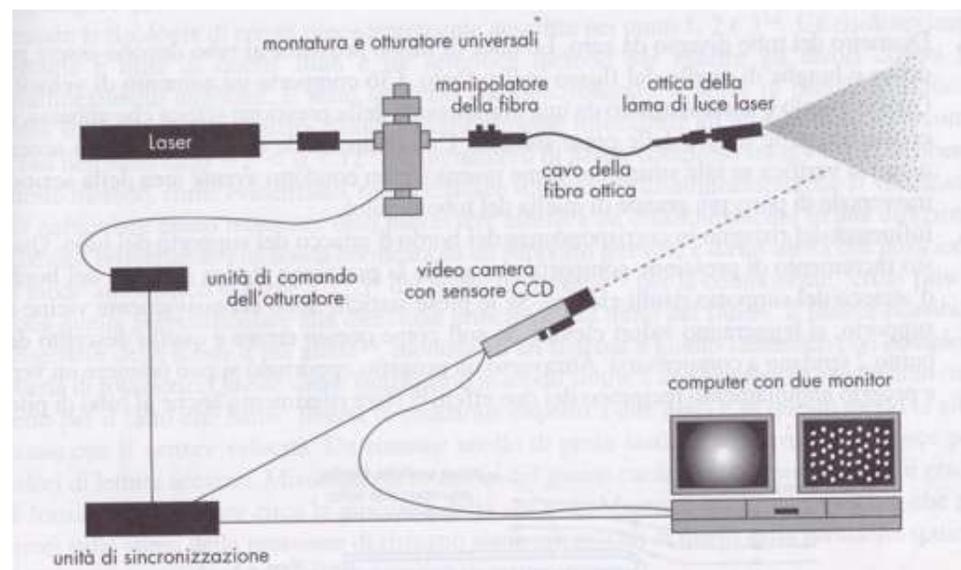
Δy = spostamento della particella in direzione y

velocità in A

$$v_x = \Delta x / \Delta t \text{ per } \Delta t \rightarrow 0$$

$$v_y = \Delta y / \Delta t \text{ per } \Delta t \rightarrow 0$$

Misuratori di portata laser – Particle Image Velocimetry



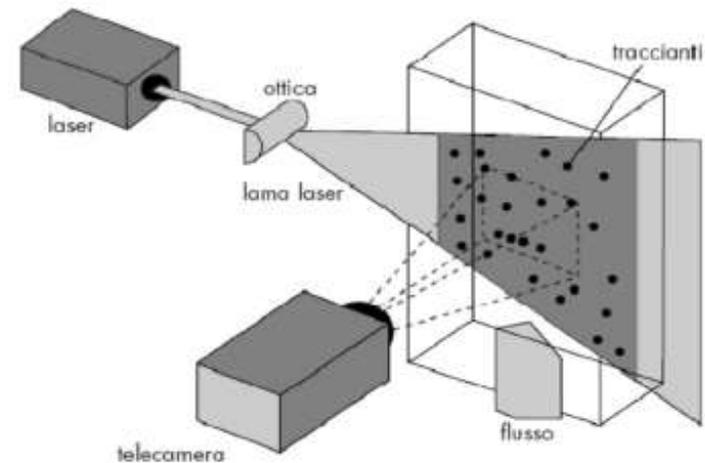
Misuratori di portata laser

Vantaggi:

- sistema molto preciso;

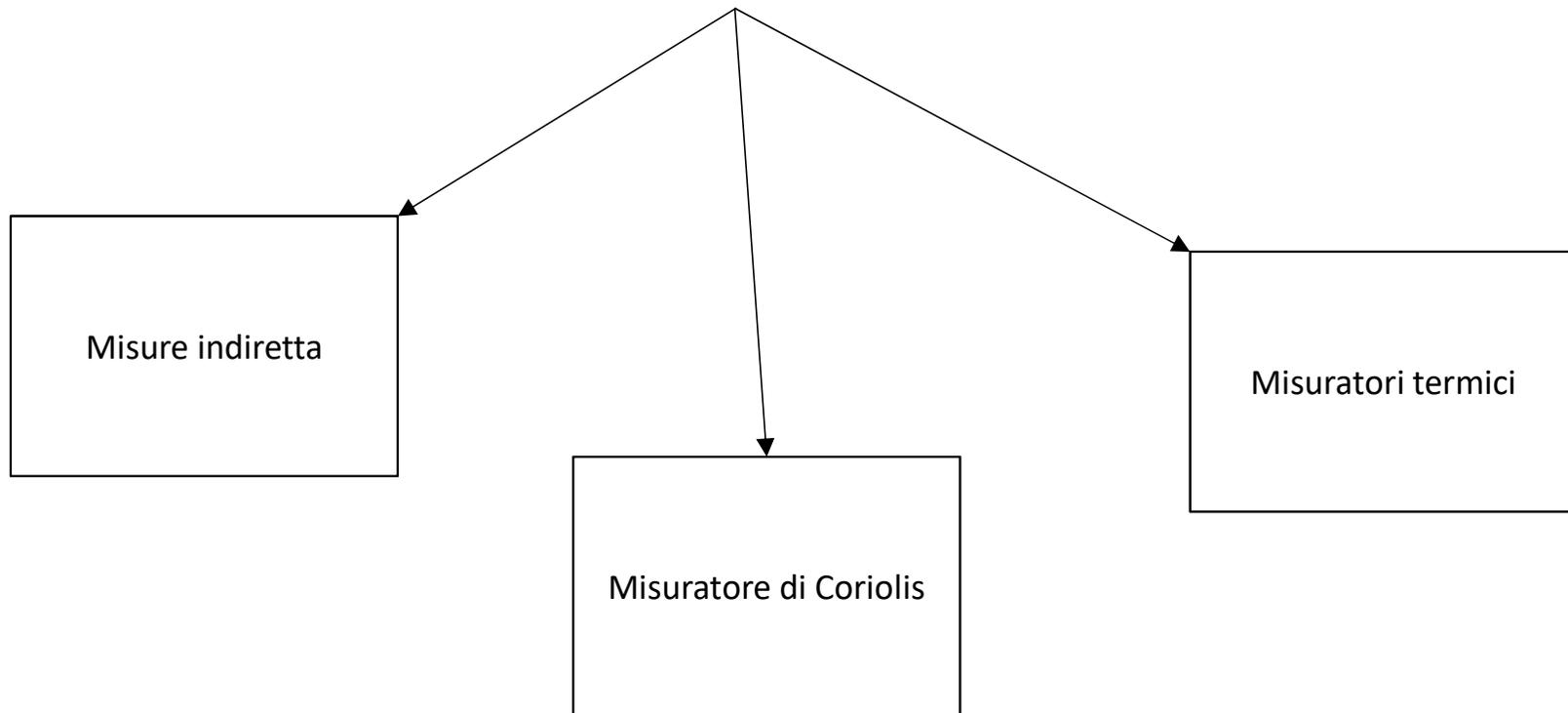
Svantaggi:

- molto costoso;
- la tubazione deve avere un accesso ottico trasparente;
- difficoltà riguardanti le concentrazione di particelle; poche particelle descrizione del campo di moto non esauriente mentre se le particelle sono troppe sarà difficile identificarle nelle immagini;
- non si possono misurare le componenti di velocità ortogonali al piano laser (campo di velocità solo bidimensionale);

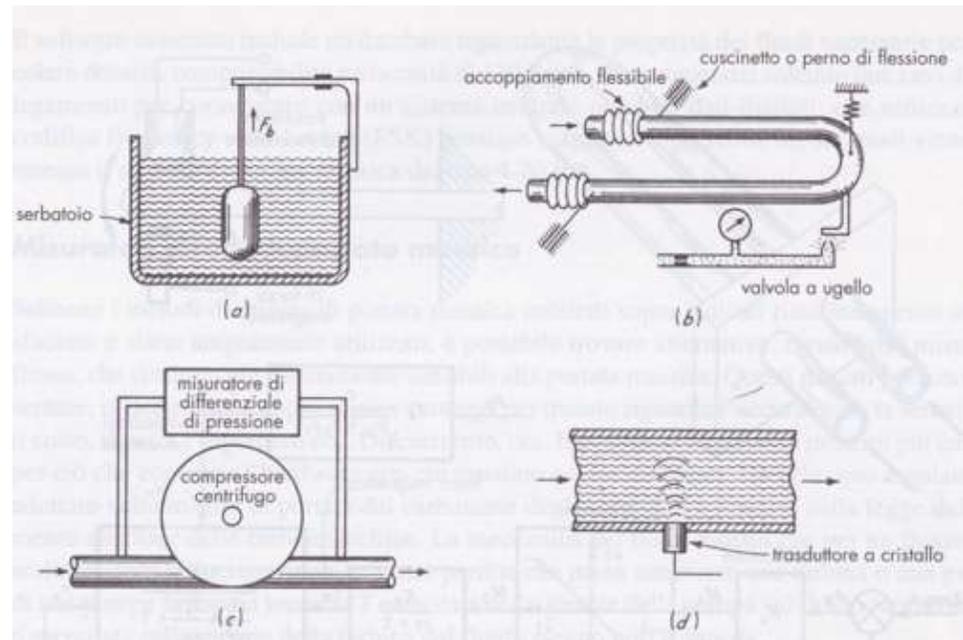


Misuratori di portata massici

In certe applicazioni è più importante misurare la portata massica rispetto a quella volumetrica. La portata massica può essere ricavata da quella volumetrica, nota la densità dell'oggetto di misura, oppure la portata massica può essere misurata per via diretta.



Misure di portata volumetrica accoppiata a misure di densità



Misuratore massico di Coriolis

Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento si basa sulla generazione controllata di forze di Coriolis.

La forza di Coriolis è presente ogni qualvolta abbiamo la sovrapposizione di un moto rotatorio e di una traslazione

$$\vec{F}_C = -2m(\vec{v} \times \vec{\omega})$$

F_C è la forza di Coriolis, m è la massa del corpo che si muove con velocità v rispetto al sistema di riferimento non inerziale rotante, \mathbf{X} rappresenta il prodotto vettoriale e ω è la velocità angolare del sistema non inerziale, misurata rispetto a un sistema inerziale.

Il fluido deve sentire una velocità angolare ω il cui vettore sia perpendicolare alla velocità v del fluido

(in questo caso è un movimento oscillatorio prodotto dalla flessione del tubo a C attorno ai suoi supporti). (Video Emerson)



La forza di Coriolis è una forza apparente, a cui risulta soggetto un corpo quando si osserva il suo moto da un sistema di riferimento che sia in moto rotatorio rispetto a un sistema di riferimento inerziale

Misuratore massico di Coriolis

I sensori di movimento installati nel tubo di Coriolis sono sensibili all'angolo di torsione θ .

Un elemento infinitesimo di massa del fluido (dM) avente densità ρ , induce una forza d'inerzia pari a:

$$dM(2\vec{\omega} \times \vec{v})$$

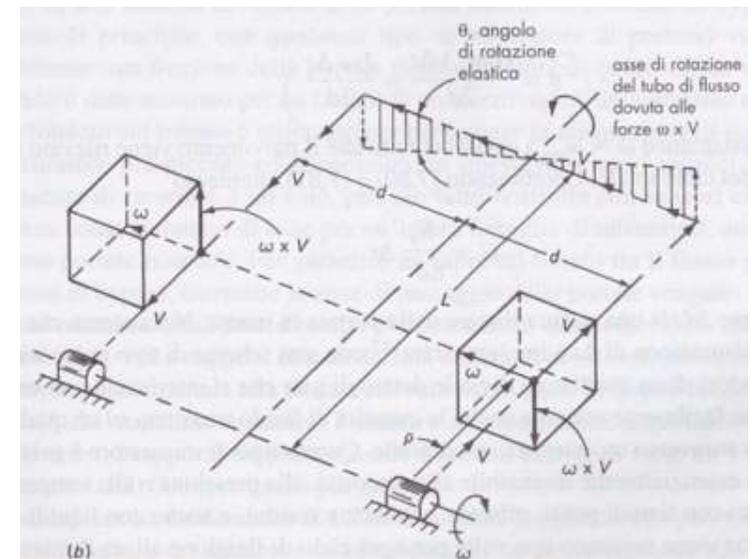
La forma a C del tubo fa sì che la velocità del fluido cambi segno tra ingresso ed uscita. Pertanto, una coppia di masse (una entrante e l'altra uscente) generano una coppia torsionale d'inerzia dT

$$dT = 2(2\vec{\omega} \times \vec{v})dM * d$$

Da cui

$$T = 4\omega Gd \int_0^L d\rho = 4Ld\omega G$$

Dove G è la portata massica. Pertanto la coppia T oscilla alla velocità angolare ω che porta a torcere il tubo a C.



Misure di portata massica – Misuratore massico di Coriolis

In queste condizioni il sistema agisce come una molla di rigidezza K_S , il cui angolo di torsione θ è direttamente proporzionale alla portata massica:

$$\theta = \frac{4Ld\omega}{K_S} G$$

Sensori di spostamento installati ai lati del tubo rilevano il passaggio dell'oscillazione dello stesso. Il ritardo di attivazione tra i due sensori (dovuto all'oscillazione del tubo) risulta quindi proporzionale all'angolo di torsione:

$$\theta = \frac{L\omega}{2d} \Delta t$$

Pertanto, dal tempo di sfasamento si può risalire al valore di portata massica:

$$G = \frac{K_S}{8d^2} \Delta t$$



Misuratore massico di Coriolis

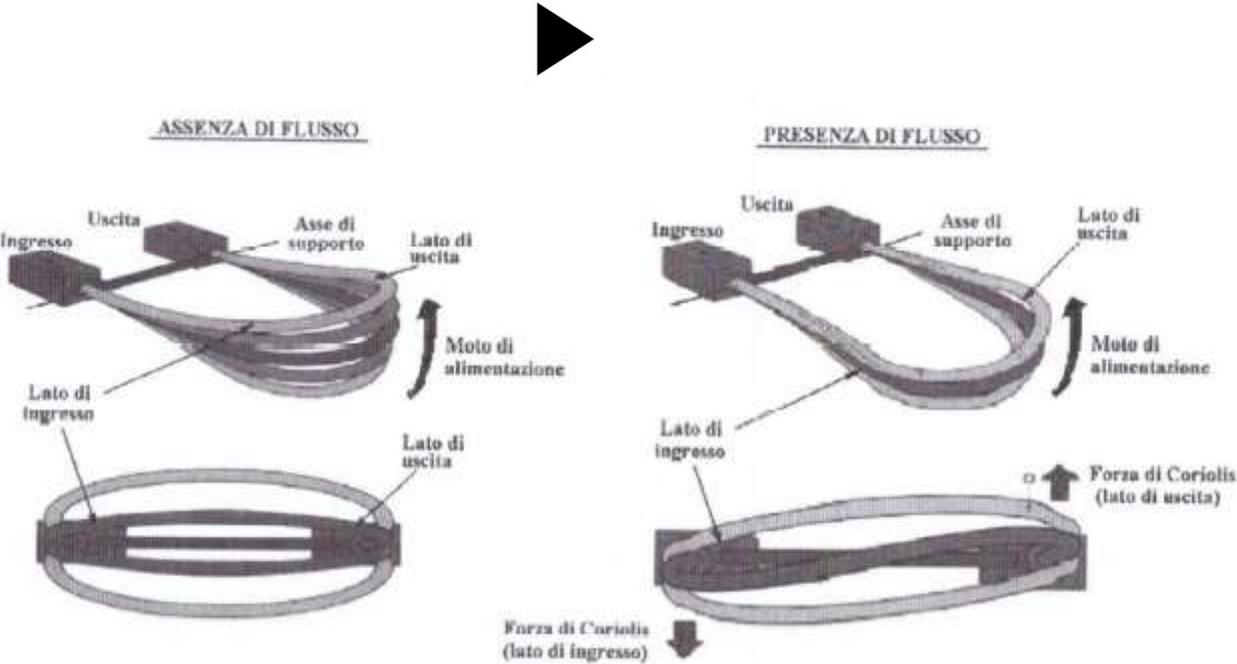


Figura 2.32 – Deformazioni indotte nella tubazione di misura

Misuratore massico di Coriolis

Tipologie costruttive

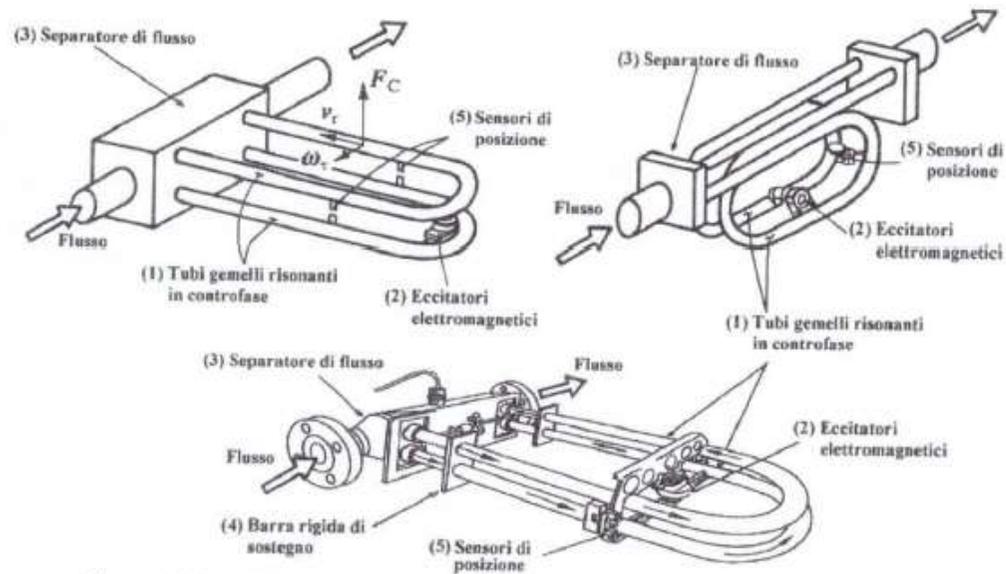
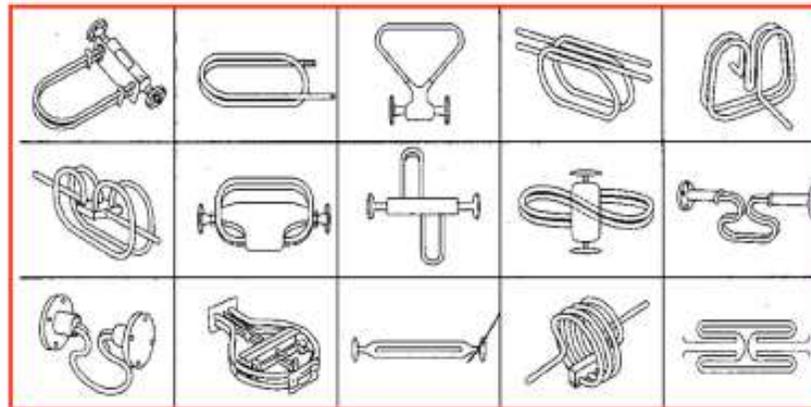


Figura 2.33 – Differenti tecnologie costruttive dei misuratori ad effetto Coriolis

Misuratore massico di Coriolis



- Privo di ostruzioni
- Insensibile alla viscosità, alla pressione e alla temperatura
- Si può usare con liquidi puliti, miscele, schiume, residui e liquidi contenenti gas.

Misuratore massico di Coriolis

Caratteristiche tecniche (Endress+Hauser Yokogawa)

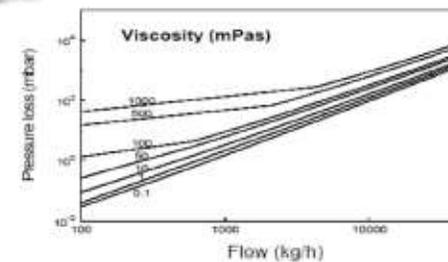
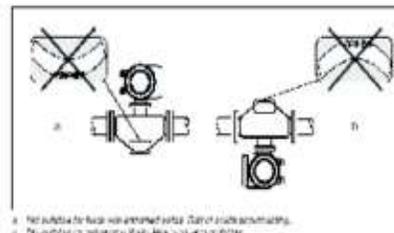
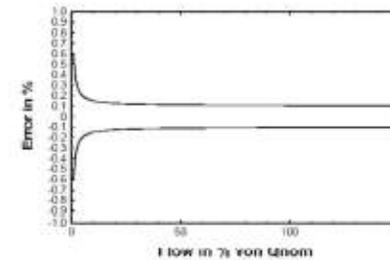
Range di portata: fino a 2200 t/h

Range di temperatura: -40 a 150°C (possibilità di elettronica separata -200°C a 150°C).

Uscita: 4 – 20 mA

Alimentazione: 220 VAC

Errore: Liquidi: $\pm 0.1\%$ o.r.
Gas: $\pm 0.5\%$ o.r.



Misuratore massico termico

Principio di funzionamento (corrente costante)

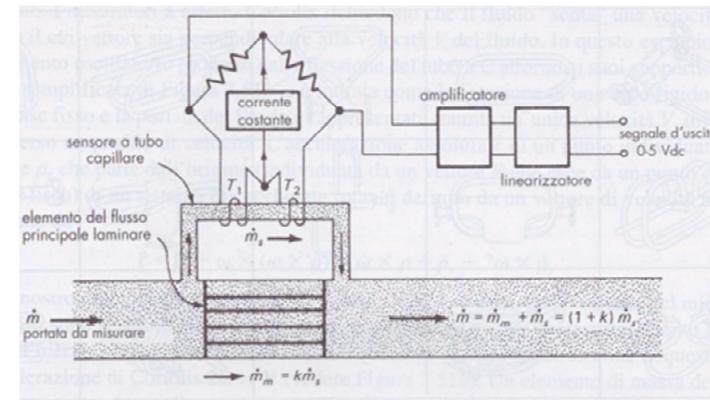
Il principio di funzionamento si basa sui principi della trasmissione di calore.

Il misuratore riportato in figura sfrutta il sistema del bypass.

Viene misurata solo una frazione della portata totale, in questo modo possiamo fare misure di portata maggiore con un misuratore più piccolo ed economico

Il risultato viene poi moltiplicato per un fattore di proporzionalità (fisso e noto).

Sia la condotta di scorrimento che quella di misura sono progettate in modo da garantire un flusso laminare in modo da garantire la scalabilità del risultato di misura tramite il fattore di proporzionalità, considerato che la caduta di pressione è proporzionale per tutti gli elementi costitutivi del flusso laminare.



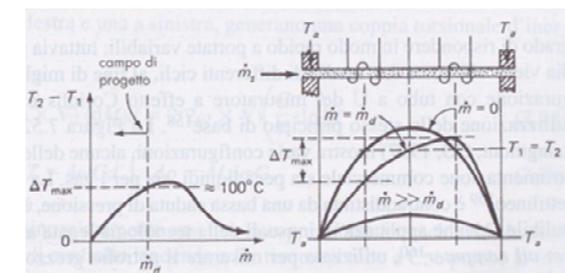
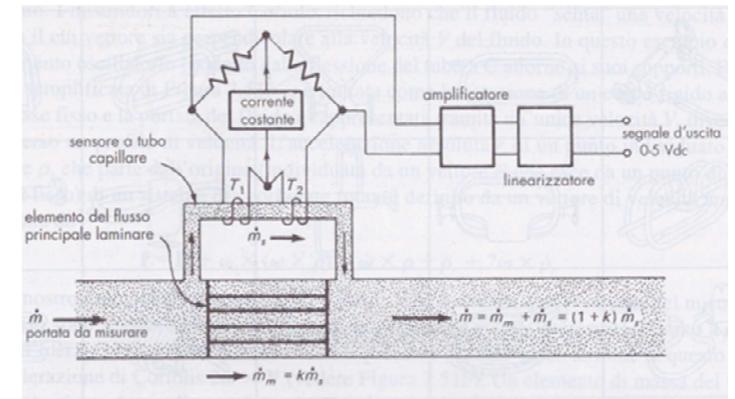
Misuratore massico termico

Il tubo capillare ha diametro di 0.787 mm e lunghezza tra 50 e 100 volte il diametro (portata = 20 cm³/min).

Entrambe le zone sono progettate per avere flusso laminare Vengono usate canalette sottili di sezione rettangolare.

Ci sono due avvolgimenti elettrici posti attorno alla superficie esterna del sensore a tubi che fanno sia da riscaldatori (heater) che da sensori di resistenza-temperatura e forniscono una quantità di calore costante al tubo per qualsiasi valore di portata.

I due avvolgimenti sono su due lati adiacenti di un circuito a ponte e le resistenze del ponte sono tali che questo sia bilanciato per una portata nulla.

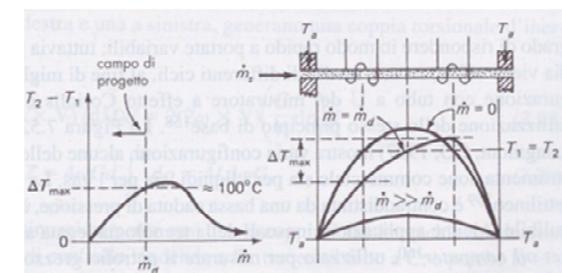
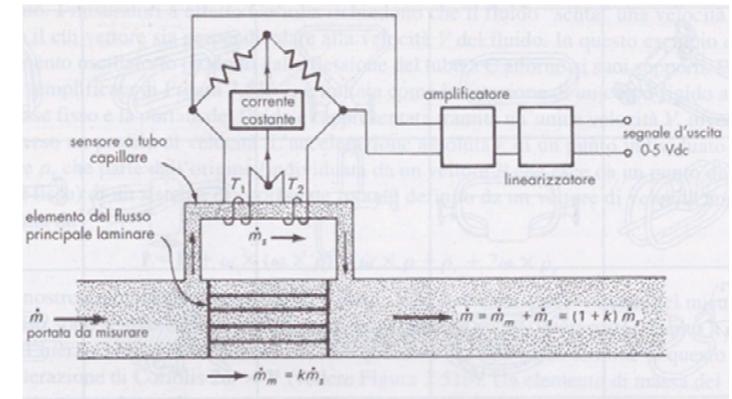


Misuratore massico termico

Per una portata nulla il sistema è "termicamente simmetrico".

Tutto il calore fornito dalle resistenze elettriche viene utilizzato per bilanciare la perdita di calore del tubo verso lo spazio circostante che si suppone rimanga a temperatura T_a ($T_1 - T_2 = 0$).

- Facciamo fluire una portata \dot{m}
- Il flusso, inizialmente a temperatura T_a , riceve calore dal tubetto, si scalda e lasciando la prima zona si porta via energia secondo: $\dot{m}c_p T_1$
- T_1 diminuisce (vedi grafico)
- La diminuzione di T_1 è proporzionale a m
- Il ponte si squilibra, si genera un nuovo equilibrio termico.
- T_2 resta circa costante perché riceve e perde più o meno la stessa quantità di calore dal fluido che scorre.
- Se la portata \gg della portata di progetto l'effetto di raffreddamento del fluido rende T_1 e T_2 molto basse e simili (si raffreddano entrambe).
- La portata in massa è legata a T_1 ma è meglio utilizzare il segnale $T_2 - T_1$ (reso disponibile dal circuito a ponte) perché dà uscita nulla per portata nulla e rende lo strumento meno sensibile alla temperatura esterna (T_1 e T_2 risentono nello stesso modo della variazione di T_a).



Misuratore massico termico – un esempio commerciale

Caratteristiche tecniche (temperatura costante)

https://www.youtube.com/watch?v=VUL0xWFUeY&feature=emb_rel_end

Il flusso passa su due termoresistenze PT100

Una è usata come sensore di temperatura di riferimento e legge la temperatura del fluido

l'altra funziona da heater; facendo variare la corrente al suo interno, è mantenuta ad una differenza di temperatura costante rispetto alla prima.

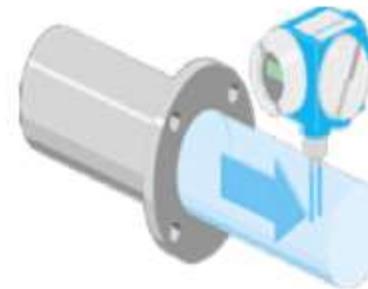
Maggiore è la portata che fluisce, maggiore è la quantità di calore asportata dal fluido e maggiore è la corrente da spendere per mantenere la differenza di temperatura tra le due PT100 costante.

$$Q = mc_p \Delta T = RI^2$$

Misurando la corrente richiesta per mantenere il profilo voluto ho una misura della portata m che sta fluendo.

Migliora la linearità e il tempo di risposta.

Flanged version,
DN 15...150



Insertion version for
large pipe diameters, DN
80...1000



Misuratore massico termico – un esempio commerciale

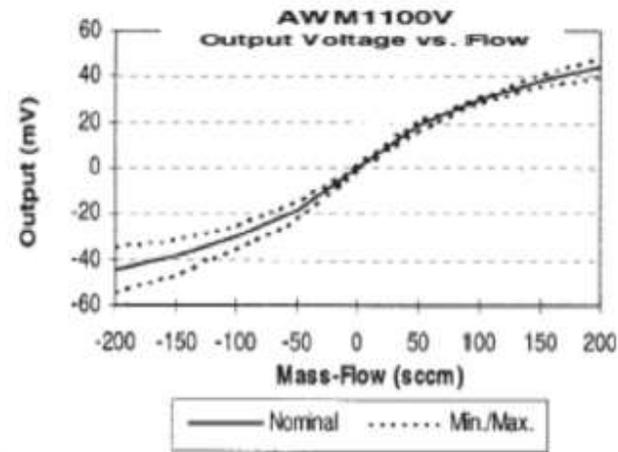
Caratteristiche tecniche (Endress+Hauser)

Errore: $\pm 2\% R \pm 0.5\% FS$
Range di temperatura: $-10 \dots +100 \text{ }^\circ\text{C}$
Rangeability: 100 : 1
Uscita: 4 – 20 mA
Aliment.: 20 – 30 VDC
Consumo: $< 3W$



Caratteristiche tecniche (Honeywell)

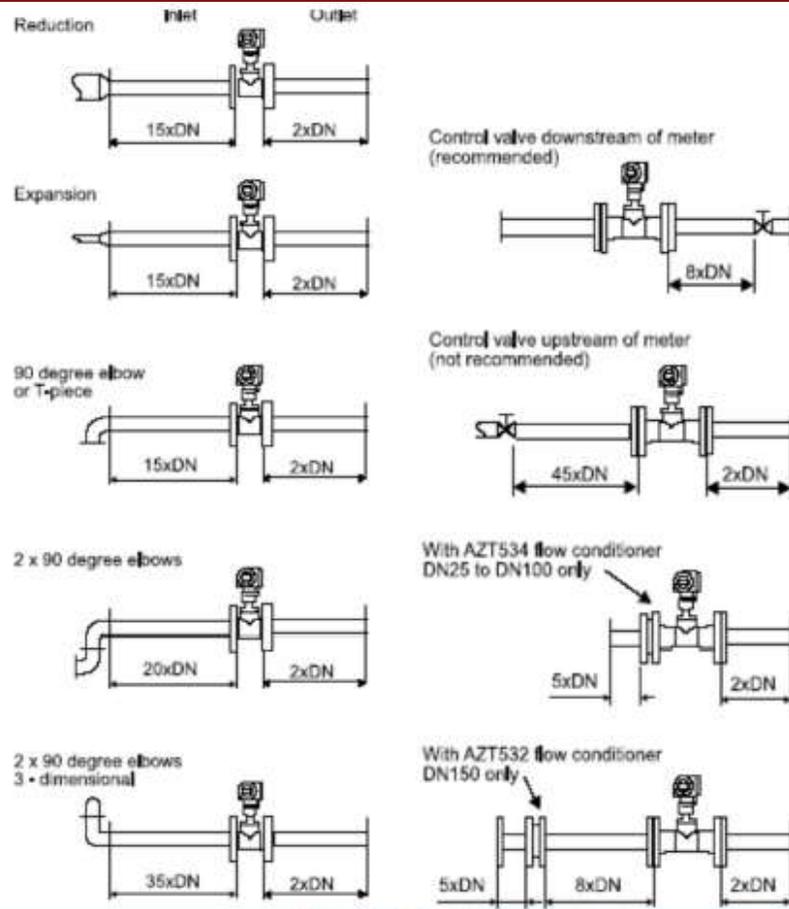
Errore: $\pm 1\%$ o.f.s.
Range di portata: $-600 +1000 \text{ sccm}$
Range di temperatura: $-25^\circ\text{C} +85^\circ\text{C}$
Uscita: mV
Alimentazione: 8-15 VDC
Consumo: 30 mW



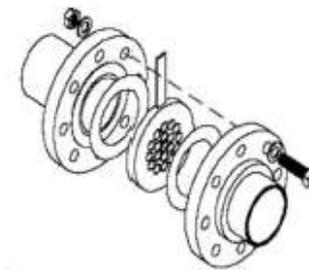
Misure 2016 - Taccani

57

Misuratore massico termico: installazione



Quando il diametro del tubo è largo e ci sono problemi di spazio di può usare un condizionatore di flusso che consente di ridurre i diametri a monte



Fonti

- Si ringrazia Federico Ustolin per il supporto dato nella preparazione della presentazione
- **Prof. M. De Luca – Università di Firenze**
- Prof. C. Cinelli – Università di Firenze
- Paul G. Honchar, "Diaphragm Meters Applications, Installations and Maintenance";
- Echo Energy Solutions s.r.l. – "Misure della velocità dell'aria ambiente";
- Naumchik I.V., Kinzhagulov I.Yu., Kren A.P., Stepanova K.A. (2015). "Mass flow meter for liquids.". Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics 15 (5): 900–906;
- **Sandro Longo, Marco Petti, "Misure e Controlli Idraulici", McGraw-Hill, 2006;**
- PCE Instruments;
- **Giuseppe Leo Guizzi, Università degli studi di Roma Tor Vergata, "Misure, controllo e diagnostica dei sistemi energetici;**
- Instrumentation and control engineering – "Hot wire anemometer";
- Purdue University – School of Aeronautics and Astronautics, "AAE 520 Experimental Aerodynamics – Hot-wire anemometer";
- Dante Dynamics - "The Laser Doppler Anemometer for two velocity component measurements";
- R. Montanini, Università degli studi di Messina – Appunti del corso di Misure meccaniche e termiche, "Misure di portata e di velocità dei fluidi".